

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 26 au 30 AVRIL 1977

- LOCALISATION SOUS-MARINE PRECISE DANS LES TROIS DIMENSIONS -
- THREE-DIMENSIONAL UNDERWATER ACCURATE LOCALIZATION -

CLAUDE C. LEROY

CIT-ALCATEL, Div. Marine, Z.I. des Paluds, 13 400 AUBAGNE.

RESUME

La prospection et l'exploitation des océans pose sans cesse de nouveaux problèmes de localisations sous-marines. On décrit ici les nombreuses applications des systèmes acoustiques dits à "base courte" réalisés sous les sigles AMS et AMU en s'attachant à leurs performances. (L'exposé donne des résultats obtenus et les compare favorablement aux estimations théoriques établies avec des hypothèses pessimistes).

Après un rappel des principes de mesure et du cas de l'ancrage dynamique, où la localisation dans 0,3 % de la hauteur d'eau est réalisée à la verticale, on étend largement le sujet aux systèmes de localisation de poissons remorqués, de sous-marins d'intervention, etc ... ainsi qu'à la mesure précise (à quelques centimètres près) de la distance entre deux points sous l'eau.

Les profondeurs de travail étudiées vont jusqu'à 6 000 mètres et les distances obliques jusqu'à 10 000 mètres.

SUMMARY

Prospective and working in the oceans continuously brings in new problems concerning underwater localizations.

This paper describes the various applications of the so called "short base" acoustic systems that have been developed under the "AMS" and "AMU" names. Their performances are emphasized and practical results are compared, at their benefit, with the theoretical estimates that had been established with pessimistic hypotheses.

The principles of the measurements are first recalled, mainly in the field of dynamic positioning where localization accuracies of 0,3 % of water depth could be achieved. The study is subsequently extended to the localization of towed vehicles, rescue submarines, etc, as well as to the accurate measurement (of the order of one or two inches) of the distance between two points underwater. Working conditions cover depths up to 20,000 feet and ranges up to 10,000 yards.

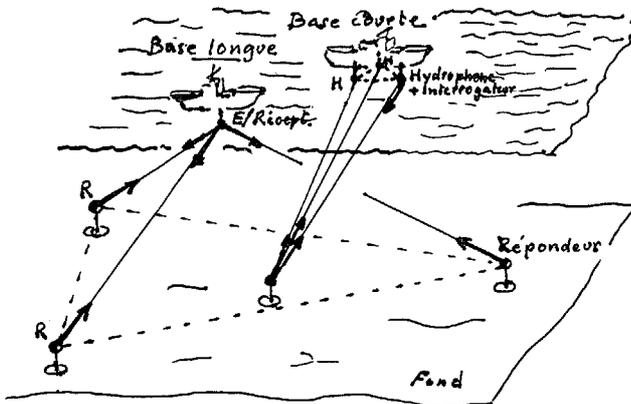


1. GENERALITES.

1.1 La prospection et l'exploitation des ressources des océans posent sans cesse de nouveaux problèmes de localisations sous-marines. Il peut s'agir de repérage absolu d'un point dans l'eau, mobile ou non, par rapport à un système connu de référence, tel que : coordonnées géographiques, structure ou balises posées sur le fond, etc - (cartographie, marquage d'une épave, ancrage dynamique, ...). Dans d'autres cas, le problème à résoudre est la mesure, depuis un bâtiment de surface, de la distance relative entre 2 points (réentrée d'outil, sauvetage d'un sous-marin, ...).

Dans d'autres cas encore, on demande d'effectuer des mesures précises de la géométrie d'une configuration dans l'eau (angles dans les trois dimensions et distance entre des extrémités de pipelines à connecter, ...) et ces mesures doivent alors être faites depuis un dispositif de mesure immobile et rapproché, la précision obtenue depuis un navire éloigné et en mouvement devenant insuffisante.

Nous avons déjà décrit, dans un exposé au GRETSI en 1973, le système de positionnement dynamique du navire de forage PELICAN, et en particulier l'écartomètre acoustique adopté qui permet un ancrage fiable. Ce dispositif de mesure est couramment baptisé de nos jours "base courte", par opposition à la "base longue". Cette dernière utilise des répondeurs éloignés les uns des autres, placés sur le fond. On mesure alors les différents temps de parcours AR d'un interrogateur/récepteur à ces répondeurs. La pyramide aplatie constituée par les transducteurs est résolue par intersection de cercles en surface, une fois la base étalonnée.

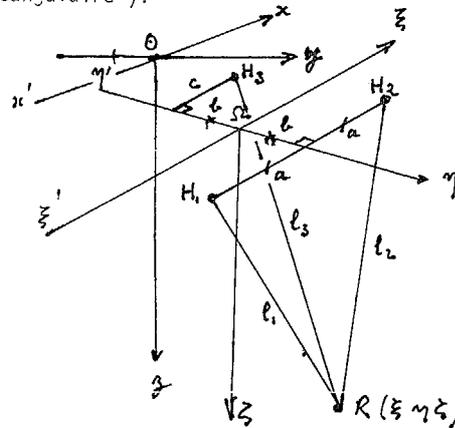


Dans la "base courte", la pyramide est inversée, et de forme allongée. L'interrogateur/récepteur du sommet devient un répondeur (récepteur/émetteur), les répondeurs deviennent des hydrophones, et il est nécessaire d'adjoindre un interrogateur à l'un quelconque d'entre eux (ou à deux ou plus si l'on désire de la redondance).

1.2 Les équations donnant les coordonnées ξ , η , ζ d'un répondeur dans le trièdre de référence formé par une base hydrophonique à 3 hydrophones (cas minimal) s'écrivent (voir les définitions sur le schéma) :

$$\begin{aligned} 4a\xi &= (l_1+l_2)(l_1-l_2) && a \text{ positif} \\ (1) \quad 4b\eta &= (l_1+l_3)(l_1-l_3) + 2(a+c)\xi && (b \text{ positif} \\ &&& (c \text{ algébrique}) \\ \zeta^2 &= l_1^2 - (\xi+a)^2 - (\eta-b)^2 \end{aligned}$$

L'équation en η se simplifie si $c = -a$ (base "rectangulaire").



On passe de ces coordonnées à celles xyz, où xOy est horizontal et O en un point choisi, par une transformation classique faisant intervenir les angles de roulis et de tangage instantanés (dont la connaissance précise doit être assurée par une centrale de verticale).

Prenant comme exemple, pour simplifier, la première des équations 1 et introduisant les temps de parcours T_1 , T_2 , etc du transducteur acoustique vers les hydrophones, il vient

$$(2) \quad 4a\xi = c^2(T_1+T_2)(T_1-T_2) \approx c^2(T_1+T_2)(t_1-t_2)$$

où les t désignent les instants d'arrivée.

La quantité t_1-t_2 (et les correspondantes t_1-t_3 , etc) est mesurée avec précision. Reste T_1+T_2 (et T_1+T_3 , etc ...).

Si l'on opère avec un émetteur déclenché par fil, on a directement accès aux mesures de T_1 et T_2 .

Quand, au contraire, on opère avec un répondeur, si l'interrogateur est suffisamment près de l'un des hydrophones pour être confondu avec lui, on a une très bonne approximation de T_1+T_2 par T'_1+T_2 , où $T'_1 \neq T_1$ désigne la durée du trajet aller de l'interrogateur supposé en H_1 vers le répondeur. L'erreur d'approximation est due aux mouvements du navire.

Lorsque l'interrogateur ne peut plus être confondu avec un hydrophone, les quantités (T_1+T_2) , etc, peuvent quand même s'évaluer à partir de (T'_1+T_2) etc, moyennant des équations plus compliquées. (Voir les équations du PELICAN).

Remarquons enfin que si l'on ne dispose que de 2 hydrophones et d'un interrogateur, alignés selon ξ' , la mesure de ξ reste possible. Si l'on a accès à ζ par d'autres mesures (profondeur d'eau connue par exemple), alors η peut être calculé par :

$$(3) \quad \eta^2 = l_1^2 - (\xi+a)^2 - \zeta^2 \neq \rho^2 - \xi^2 - \zeta^2 \text{ si } \zeta \gg a$$

ρ est alors la distance oblique moyenne. Ce principe que nous avons baptisé "px", permet une mesure précise de x et une mesure plus lâche de y , ce qui peut conserver de l'intérêt dans certains cas (mesure du dépointage d'un poisson remorqué).

1.3 Le système décrit au GRETSI en 1973 concernait le PELICAN version 1972. On utilisait des émetteurs distincts des interrogateurs, les équations plus compliquées étaient traitées par ordinateur. Cet ordinateur était aussi chargé de toute la gestion de l'acoustique (décision des instants d'interrogation, genèse des fenêtres de réception, etc ...). Le besoin de s'affranchir de l'ordinateur d'une part pour poursuivre l'ancrage sur écartomètre acoustique en cas de panne du premier, et aussi celui de disposer d'un écartomètre autonome à multiples usages, a dé-

bouché sur l'écartomètre AMS (Acoustic Measuring System). L'AMS opère à l'aide d'un microprocesseur et avec les équations (1). Il est, dans sa version normale, capable d'utiliser des répondeurs ou des émetteurs déclanchés et gère l'ensemble de façon à ce qu'il n'y ait pas de chevauchement de signaux en réception.

Les multiples applications de l'AMS seront décrites plus loin. La planche illustrative donnée à la suite du texte schématise quelques cas d'utilisation, auxquels il convient d'ajouter l'ancrage dynamique et la réentrée d'outil qui lui est associée.

- 1.4 Dans tout ce qui précède, le point à localiser est muni d'un répondeur ou d'un émetteur déclanché et l'on a accès aux quantités $(T_1 + T_2)$, etc ... Une deuxième façon d'utiliser la "base" courte consiste à employer un simple émetteur cadencé indépendant (ping). On doit alors suppléer au manque d'information sur $(T_1 + T_2)$ par l'introduction dans le calcul de la valeur estimée pour ζ . Tout revient dans l'équation (1) à effectuer une première mesure de ξ et η avec $(l_1 + l_2)_1$, etc..., = ζ puis à calculer $(l_1 + l_2)_2$ à partir de ξ_1 , η_1 et ζ , d'où des secondes valeurs ξ_2 , η_2 qui permettront de calculer $(l_1 + l_2)_3$, etc ... Ce calcul itératif s'effectue facilement en analogique par une boucle d'asservissement. L'équipement que nous avons réalisé sur ce principe porte le nom d'AMU (Acoustic Measuring Unit). N'étant pas maître des instants d'émission, on ne peut évidemment pas utiliser la protection temporelle de fenêtres évolutives. D'autres critères d'élimination des fausses données ont dû être adoptés. Les applications de l'AMU et les précisions obtenues seront exposées plus loin.

2. PRECISION DES MESURES.

- 2.1 Partant toujours de la première équation de (1), on trouve en différenciant et après arrangement des termes

$$d\xi = \frac{c}{4a} (l_1 + l_2) d(t_1 - t_2) + \frac{c}{4a} (l_1 - l_2) d(T_1 + T_2) + 2\xi \frac{dc}{c} - \xi \frac{da}{a} \quad (4)$$

L'erreur provient de 4 termes $d(t_2 - t_1)$, $d(T_1 + T_2)$, $\frac{dc}{c}$ et $\frac{da}{a}$.

Le premier de ces termes est en quelque sorte une erreur angulaire sur la direction dans laquelle est situé le répondeur. L'erreur produite sur ξ est tout naturellement proportionnelle à la distance oblique $(l_1 + l_2)/2$.

Le second terme d'erreur engendre en quelque sorte un éloignement ou un rapprochement du point où l'on situe le répondeur, d'où une erreur sur ξ dépendant de l'orientation selon laquelle on voit le répondeur (le coefficient $(l_1 - l_2)/4a$ en est le reflet). Le troisième terme est l'erreur sur la connaissance de la célérité du son. Son effet est double : erreur sur la mesure angulaire, puisque c'est la différence de temps qui est mesurée et non la différence de marche, et erreur sur la distance du répondeur. Tout ceci se reflète dans la proportionnalité de $d\xi/\xi$ avec $2 dc/c$.

Le quatrième terme provient de la mesure imparfaite de a et donne une erreur $d\xi/\xi$ directement égale à da/a .

A part une légère contribution de l'imprécision sur la mesure des temps d'arrivée dans l'erreur sur $(T_1 + T_2)$, les 4 termes de l'équation (4) sont indépendants.

D'autre part, les différentes erreurs $d(t_1 - t_2)$, $d(T_1 + T_2)$, etc ... sont le résultat d'une combinaison d'erreurs aléatoires de causes variées et d'er-

reurs constantes ou lentement variables pour lesquelles on ne peut que donner une borne.

La célérité du son par exemple ne peut fluctuer de façon significative d'une information d'écartométrie à l'autre. Il en est de même des dimensions de la base ! Par contre, on commet sur (c) comme sur (2a) une erreur d'appréciation ou d'étalonnage dont on peut estimer la limite. Cette erreur se traduit par un biais systématique dont il faut tenir compte dans toute mesure absolue. Par contre, l'erreur sur la différence des 2 coordonnées ξ_1 et ξ_2 varie comme $(\xi_1 - \xi_2)$ et devient nulle à la limite pour des points très voisins (problèmes de réentrée d'outil en ancrage dynamique, etc ...). Il conviendra donc selon les problèmes rencontrés d'entrer dans le détail des causes d'erreurs pour tenir compte de leur plus ou moins grande corrélation. Les précisions globales données seront alors exprimées en valeurs quadratiques moyennes, c'est-à-dire que l'on écrira l'équation (4) sous la forme :

$$(5) \langle \delta x \rangle^2 = \frac{c^2}{16a^2} (l_1 + l_2)^2 \langle \delta(t_1 - t_2) \rangle^2 + \dots + \frac{\xi^2}{a^2} \langle \delta a \rangle^2$$

où les termes $\langle \delta \rangle^2$ sont les erreurs quadratiques moyennes attendues. Les deux premiers de ces termes seront eux-mêmes évalués par additions quadratiques de termes, ou calculables (erreurs aléatoires), ou dont on connaît la borne. Les deux derniers seront les bornes des erreurs sur (a) et sur (c). L'erreur sur $(t_1 - t_2)$ est prise égale à :

$$(6) \langle \delta(t_1 - t_2) \rangle^2 = 2[\langle \delta t_B \rangle^2 + \langle \delta t_F \rangle^2 + \langle \delta t_E \rangle^2] + (d|t_1 - t_2|_R)^2$$

Dans cette formule, les $\langle \delta t_B \rangle$ etc sont les erreurs aléatoires de mesure du temps d'arrivée sur un hydrophone vu la méthode utilisée, dues aux bruits (indice B), aux fluctuations (F) et à l'électronique (E).

Quant à $d|t_1 - t_2|_R$, c'est l'erreur systématique sur la mesure de $t_1 - t_2$ due aux différences de réglage des canaux hydrophoniques.

- 2.2 Rappelons que l'AMS mesure les instants d'arrivée par franchissement d'un seuil après détection intégration et que ce seuil est lié au bruit de façon à minimiser l'erreur tout en conservant une protection contre les fausses alarmes.

On a (voir conférence 1973) :

$$(7) \delta t_B = \frac{K}{S/B} \text{ avec } K = \sqrt{\frac{\tau}{2\Delta f}}$$

où τ est la constante de temps de la D.I. et Δf la largeur de bande de filtrage.

On a d'autre part :

$$(8) \delta t_F = -\tau \text{ Log } \frac{1 - \frac{1}{1 - \alpha} \frac{Q}{S/B}}{1 - \frac{Q}{S/B}}$$

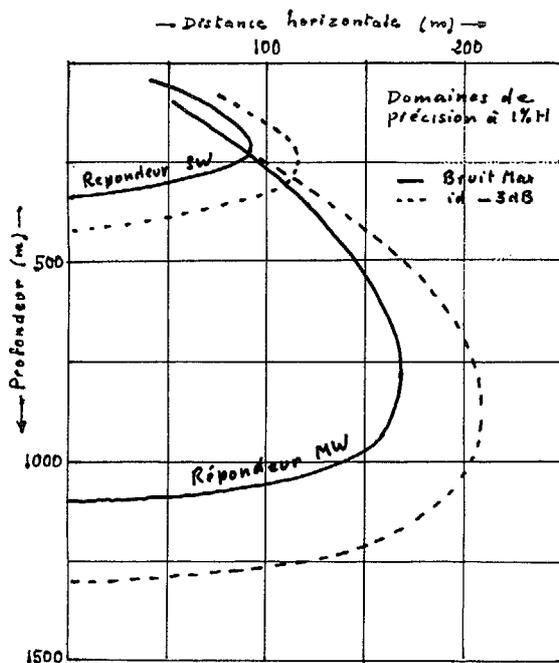
où Q désigne le rapport seuil de détection sur bruit (choisi par réglage), et où α désigne la variation relative du signal et du bruit à un instant donné, entre ce qui est attendu et ce qui est obtenu sur un hydrophone. On pose $-20 \log(1 - \alpha) = F$, fluctuation en décibel, de l'ordre de $-0,5$ à $-1,5$ dB selon les cas ; la "fluctuation" étant d'autant plus grande que les hydrophones sont éloignés.

L'erreur $\delta(T_1 + T_2)$ est calculée par des méthodes analogues en tenant compte des erreurs de détection sur le répondeur (contribution majeure) et sur la base hydrophonique (d'où un terme commun mais qui est négligeable), et en plus du fait que le navire s'est déplacé entre l'interrogation et la réception. Ce dernier terme δT_N dû aux mouvements de plate-forme tient compte du pilonnement et de sa période, et de la dérive relative entre le navire

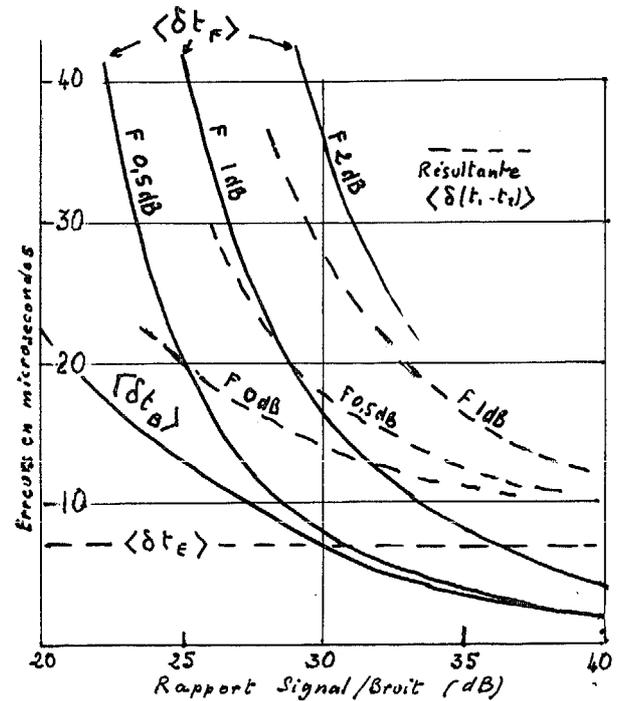


.../...

en surface et le point à localiser dans l'eau. Notons qu'il s'ajoute encore un autre terme d'erreur dû à ce que le niveau de bruit sur le répondeur peut être différent de celui escompté. Ceci varie l'intersection du seuil et de la courbe après D.I. Lorsque les erreurs sur ξ, η ont été évaluées, on peut calculer l'erreur sur ζ en différenciant la 3^è des équations (1). On passe ensuite à l'erreur finale sur xyz en introduisant les erreurs sur les angles instantanés de roulis et de tangage α et β . On trouverait par exemple $dx \approx z \cos \beta d\alpha < d\beta$, etc. Différents programmes de calculs ont été élaborés pour permettre d'évaluer la précision globale de l'équipement dans des conditions déterminées. Signalons tout de suite le fait que les paramètres à introduire sont de l'ordre d'une quarantaine (géométrie, directivités des transducteurs, niveaux, bruits, seuils, etc ...). La figure qui suit montre un exemple de calcul se rapportant à l'ancrage dynamique. On indique, dans le plan vertical à 45° des axes au navire, le lien des points où l'erreur aléatoire calculée atteint hors tout 1 % de la hauteur d'eau. On verra plus loin que les performances réelles obtenues ont été bien meilleures.



2.3 Si l'on analyse maintenant dans le détail l'importance relative des différentes sources d'erreur, on trouvera que le 1^{er} terme de l'équation (4) est prépondérant dans la plupart des cas, et que le terme $\langle \delta t_e \rangle$ compte pour peu dans $\langle \delta(t_1 - t_2) \rangle$. Il est alors intéressant de tracer sur un même graphique les erreurs données par (7) et par (8) en fonction du rapport signal/bruit. La courbe suivante montre les résultats obtenus avec les circuits utilisés en AMS ancrage. On voit que sauf pour des rapports S/B très élevés (en fait des rapports signal/seuil élevés), l'erreur due aux "fluctuations" est supérieure à celle due au bruit dès que ces fluctuations atteignent le niveau du demi décibel. Or, alors que les niveaux de bruits attendus sont relativement faciles à estimer, il n'en est plus de même des niveaux de fluctuation. D'autre part, en cas de mesure absolue, les erreurs de réglage, qui ont un effet identique aux fluctuations, deviennent en général prépondérantes.



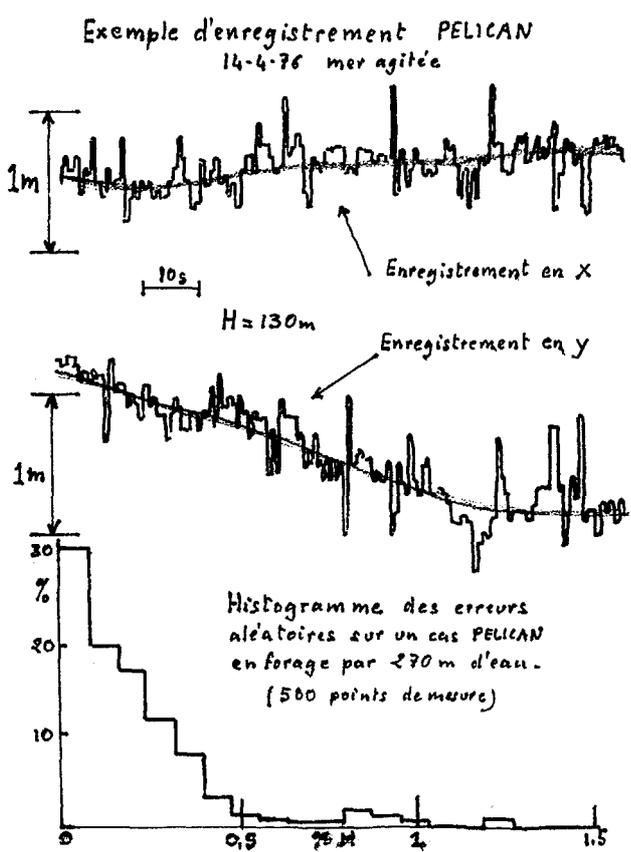
On voit aisément que l'erreur décroît quand on abaisse le seuil relatif, mais on augmente alors la probabilité de fausses mesures sur des dépassements de seuils dus aux bruits (fausses alarmes). En ancrage dynamique, où l'on ne peut tolérer qu'un taux faible de fausses alarmes, on a été amené à prendre un seuil relatif élevé (vers 20 dB). Dans d'autres applications, le seuil pourra être abaissé. Notons que le post traitement des informations, assuré par une sorte de filtrage temporel des données introduit dans l'AMS, permet d'abaisser le seuil. On hésite cependant à descendre en-dessous de 10 dB. Nous expliciterons les précisions couramment obtenues, hors tout, lors de l'examen des applications auquel nous allons maintenant procéder.

3. APPLICATIONS EN COURS DES MESURES EN BASE COURTE ET RESULTATS OBTENUS.

3.1 Ancrage dynamique.

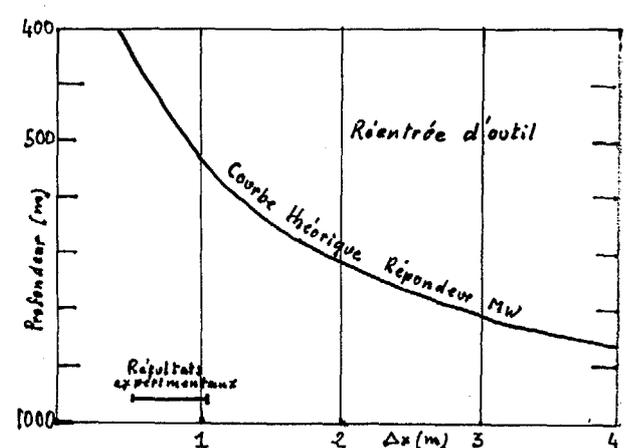
Le cas de l'ancrage dynamique d'un navire de forage a déjà été présenté au GRETSI. Rappelons que le problème à résoudre est le maintien du centre de la table de forage dans un cercle de rayon inférieur à 6 % de la hauteur d'eau H. Ce cercle est en principe centré autour de la verticale du puits de forage mais il peut en être décalé à dessein (jusqu'à 10 % H). Pour assurer la stabilité de l'asservissement du navire, il importe, au rythme de 1 information toutes les 0,5 à 1 s selon la profondeur, que l'erreur aléatoire sur chaque coordonnée x et y soit inférieure à 1 % H. Une légère erreur fixe systématique supplémentaire est tolérable. Les écartomètres acoustiques AMS ont été intégrés dans les équipements "APS" (Acoustic Positioning System) sur les navires de forage PETREL, PELICAN, PELERIN et PINGUIN (en cours). Pour le PELICAN, on remplaçait ainsi l'équipement initial par un ensemble standard compatible entre autres du simulateur de comportement construit pour ces navires. Cet équipement, qui utilise un APS standard complet et un ordinateur, permet à la fois l'entraînement du personnel des navires, la simulation de situations variées

et la localisation éventuelle des défauts. Un autre AMS assure également l'écartométrie pour l'ancrage dynamique du TALISMAN. Actuellement, la profondeur opérationnelle d'ancrage est passée de 300 m (premier PELICAN) à 1300 m et elle devrait atteindre 3000 m dès que la technologie des têtes de puits le permettra (L'AMS a été étudié pour un fonctionnement jusque 3000 m, extensible à 6000 m). Pour atteindre ces profondeurs, de nouveaux types de répondeurs ont dû être réalisés. Les versions actuelles (MW pour "medium water") ont été calculées pour le forage jusqu'à 1300 m. Comme pour le premier équipement du PELICAN (répondeur SW, pour "Shallow Water"), on a effectué ce calcul en considérant le bruit maximum enregistré sur le navire afin que le positionnement puisse être assuré par tous les temps. L'avant dernière figure illustre le type d'abaque obtenu. A l'heure actuelle, les différents navires ont effectué avec plein succès de nombreuses campagnes de forage au Labrador, Groenland, Méditerranée, Golfe de Guinée, etc. Lors de la campagne du Labrador 1974 par exemple, le PELICAN a tenu l'ancrage 90 jours consécutifs avec seulement deux courtes interruptions de l'écartométrie acoustique dues à de gros bancs de poissons. En ce moment même le PELERIN fore avec succès par 960 m de fond. Les enregistrements effectués durant ces campagnes fournissent les valeurs successives des positions mesurées du navire dans le temps. Des exemples de tels enregistrements sont fournis dans la figure qui suit. Les courbes moyennes représentent le déplacement réel du navire, qui est lent. Les fluctuations rapides d'une information à l'autre correspondent aux erreurs aléatoires de mesure. Dans la plupart des cas, on a trouvé que cette erreur exprimée en $\delta x / H$ était comprise entre 0,3 et 0,5 %. On trouvera également ci-dessous la répartition des erreurs sur un cas moyen. Ces performances sont meilleures que prévues. Nous reviendrons sur ces données en 3.5 pour les commenter.



3.2 Réentrée d'outil.

Le problème principal à résoudre est de mesurer l'écart horizontal en $\Delta x \Delta y$ entre l'extrémité de la tige d'outil et le centre du cône d'accès au puits de forage à mieux que 2 mètres près. En effet, au-delà de cette distance la caméra optique (qui permet la visualisation fine autorisant l'opération finale de réentrée) ne porte plus dans l'état actuel de la technique. On dispose pour résoudre le problème de 2 répondeurs sur l'outil en plus des 2 répondeurs sur la plaque de base. Base et outil sont interrogés alternativement de façon à recevoir sur la base hydrophonique dans l'ordre, et sans chevauchement, les réponses d'un répondeur de base, puis d'un répondeur d'outil, puis du second. Les réceptions étant rapprochées (dans 50 à 80 ms), les corrections de plate-forme sont les mêmes, les bruits stationnaires, et les fluctuations des signaux réduites. Hors tout les calculs avaient indiqué (voir figure) qu'il serait illusoire d'utiliser ce mode de localisation différentielle au-delà de 600 m. Les essais actuels du PELERIN par 960 m de fond ont prouvé le contraire. La réentrée différentielle est opérationnelle. L'estimation des opérateurs est que la fluctuation est de l'ordre de 50 cm. Nos observateurs opèrent plutôt pour 1 mètre (on ne dispose pas encore des enregistrements). Par contre, il existe un biais systématique de 4 m qui une fois connu a pu être compensé automatiquement en changeant le point de consigne du navire. Ce biais, qui est donc de 0,4 % de la hauteur d'eau, est dû aux différences de réglages et de comportement des circuits entre les canaux de réception mis à dessein à des fréquences différentes (25 et 32 kHz) pour éliminer toute interférence. Par contre, la valeur de 0,1 % sur l'erreur aléatoire est tout à fait remarquable.



3.3 Ecartométrie pour système de sauvetage de sous-marin.

Le système décrit ici correspond approximativement à la configuration VII de la planche illustrative. (La différence réside dans ce que le répondeur du corps mort d'ancrage est interrogé acoustiquement). Un exemplaire a été fourni en 1973 à la "Harbour Branch Foundation", Fort Pierce, Floride. Le petit navire d'intervention "Sea Guardian" est muni de 3 hydrophones et d'un interrogateur formant une base de 4 mètres seulement. Le sous-marin d'intervention A est dans ce cas un simple engin non habité ("Cord") muni de propulseurs et télécommandé par câble. Il peut évoluer dans un certain rayon autour d'un corps balisé. Le but de l'opération est de guider l'engin de sauvetage vers le sous-marin B et d'assurer l'arrimage d'un câble sur ce sous-marin, câble qui serait ensuite repris par un navire de sauvetage plus important, disposant des moyens de levage. Dans la



première phase fondamentale de l'opération, il importe de maintenir le "Sea Guardian" en position telle que le câble ne se rompe pas et de mesurer avec précision la position relative de l'engin de sauvetage et du sous-marin en difficulté sur le fond. Ce dernier est systématiquement muni d'un répondeur interrogé par l'AMS, tandis que le Cord est interrogé électriquement par son câble ombilical. L'ensemble est opérationnel jusqu'à 600 m de profondeur et pour des portées de 500 à 1000 m. L'AMS, dont le microprocesseur est spécialement programmé pour cette utilisation, est muni de deux baies de visualisation permettant à deux opérateurs d'agir, l'un pour maintenir le Sea Guardian en position, et l'autre pour amener le Cord sur le sous-marin. L'ensemble a subi de nombreux essais et différentes démonstrations fructueuses ont été exécutées. Là encore la précision obtenue était meilleure que celle fournie à l'utilisateur et qui était basée sur un niveau de bruit de "mer 6 + 30 dB" et de fluctuations de ± 1 à 1,5 dB.

3.4 Systèmes divers de localisation - Cas de l'AMU.

En plus des AMS en service pour les applications précédentes, deux autres équipements ont été utilisés pour la mesure de la position de plate-formes de forage ancrées (De dimensions comme en I). Dans ce cas la base de mesure atteint des dimensions importantes qui permettent des mesures fines de la position de la plate-forme, d'où la possibilité de corriger sa position en agissant sur les treuils de l'ancrage. Un autre AMS est présentement utilisé par le navire ASTRAGALE pour effectuer de l'exploration sur zones. Tout comme dans le cas du sauvetage de sous-marin, on opère avec des "offsets" importants.

L'écartométrie pour plate-formes non ancrées dynamiquement et pour la localisation limitée à des distances inférieures à 2 ou 3 fois la hauteur d'eau a conduit à la réalisation d'un équipement simplifié, moins performant que l'AMS mais tout à fait suffisant pour les taches envisagées. Il s'agit de l'AMU où, comme expliqué plus haut, on doit entrer une estimation de la hauteur d'eau dans le calcul. L'AMU était à l'origine conçu pour fournir la position de 2 pingers en pourcentage de la hauteur d'eau (mesure de x/H). Son originalité réside dans le fait que l'on va au-delà de l'approximation d'ondes planes, permise seulement quand la base $2a$ est petite devant H . Un calculateur analogique effectue un asservissement en x/H qui permet un calcul suffisamment précis. Dans les premiers AMU, le calcul était possible jusqu'à des offsets de 100% H . L'AMU actuel amélioré permet la localisation jusqu'à 300 % H . L'erreur surajoutée par le calculateur varie de 0,3 % H dans l'axe à 0,8 % H environ à 3 H . De tels AMU sont actuellement utilisés ou en passe de l'être pour la localisation de poissons remorqués (RCV) ou de sous-marins habités d'exploration. Les essais préliminaires dans le lac Léman ont donné toutes satisfactions. Un AMU de localisation est actuellement en service opérationnel en mer du Nord. Comme pour les AMS, les fluctuations aléatoires des coordonnées ont été trouvées très faibles.

3.5 Remarques générales sur les précisions observées.

De tout ce qui précède, on tire la conclusion que les précisions observées sont meilleures que les estimations faites. Certes, comme il a été dit plus haut les conditions de bruit environnant ont toujours été évaluées de façon pessimiste pour conserver une large marge de sécurité. Il n'en reste pas moins vrai que même dans le cas de bruit moyen, les résultats sont meilleurs que prévus. Il est inté-

ressant de se reporter alors aux courbes donnant les valeurs comparatives de δt_B et δt_F . Les courbes sont positionnées les unes par rapport aux autres pour le réglage de seuil adopté en ancrage dynamique. On constate aisément qu'une "fluctuation" de 0,5 dB produit la même erreur que le bruit pour un $S/B \geq 30$ dB. Les fluctuations de 1 et 2 dB donnent des erreurs beaucoup plus grandes, de même que la fluctuation même faible l'emporte sur le bruit pour des rapports $S/B < 25$ dB.

Dans le cas d'ancrage dynamique dont les erreurs de mesures ont été illustrées, on avait $S/B \geq 30$ dB et une base de 10 m de côté. Pour une précision $(\delta x)/H$ de 0,3 % il faut $(t_1 - t_2) \approx 20 \mu s$ ce qui entraîne que les "fluctuations" sont de l'ordre de 0,5 dB seulement alors qu'en l'absence de données nous avions adopté 1,5 dB par sécurité vu la turbulence du milieu.

De même, si on se réfère à la réentrée d'outil, on trouvera que pour obtenir les 0,5 à 1 m de précision différentielle observés par 1000 de fond avec une base de 20 m, on trouverait qu'il faut des mesures de $t_1 - t_2$ à environ + 10 μs , ce qui prouve de nouveau la faible valeur des fluctuations et la réduction du bruit entre l'ancrage tout temps et l'ancrage réentrée limité au beau temps.

4. AUTRES APPLICATIONS ACTUELLEMENT ENVISAGEES POUR LES AMS.

La planche schématique en fin de cet article illustre diverses applications possibles de l'AMS. Dans la plupart des cas, les commentaires seraient superflus et nous nous contenterons ici d'exposer un certain nombre de situations concrètes correspondant à des problèmes qui nous ont été posés par des utilisateurs potentiels. Ces problèmes peuvent se diviser en plusieurs catégories :

4.1 Localisation d'engins.

a) Localisation d'un engin remorqué par câble.

Selon le cas, on pourra être amené à utiliser un AMU, un AMS à 3 (ou 4) hydrophones dans un plan horizontal (x et y désirés avec précision), le même à 3 (ou 4) hydrophones dans un plan vertical (y et z désirés avec précision) ou un AMS à 2 hydrophones seulement (y (ou x) seul désiré avec précision, z estimé ou connu, système dit " ρx "). Dans tout déclenchement par câble, on s'affranchit de l'erreur de détection sur le répondeur qui intervient sur ρ ou z .

b) Localisation d'un engin autonome à grande distance.

Une version à fréquence plus basse (vers 10 kHz) de l'AMS est envisagée pour la localisation par des fonds pouvant atteindre 6000 m et des distances horizontales du même ordre. L'AMS est en principe envisagé, ou un AMU modifié muni d'un interrogateur.

4.2 Navigation sur un champ d'exploitation.

Les problèmes précédents se rapportaient à des géométries où le rapport distance/ H restait limité à 1 ou 2. Dans un champ en exploitation sur le plateau continental par 200 m de fond par exemple, les portées souhaitables peuvent atteindre 5, voire 10 H . Il est certain que dans ce cas la base longue offre plus de précision et devient compétitive car étant à poste fixe pour un usage long, la perte de temps de son étalonnage est largement compensée. Notons ici que, vu ses capacités de calcul et la façon dont sont constitués les codes d'interrogation (succession d'impulsions régulièrement espacées à différentes fréquences), rien n'empêche théoriquement

L'AMS d'effectuer une écartométrie du type base longue. Un trio de répondeurs peut être interrogé simultanément en envoyant des impulsions contenant la totalité des 3 codes et quant au calcul de résolution, il peut être effectué par la même méthode car il s'agit de résoudre la pyramide inversée. La seule difficulté réside dans le fait de maintenir le suivi automatique de réceptions très éloignées les unes des autres. Une légère discrimination fréquentielle en réception est alors souhaitable. Revenant à la base courte, elle reste applicable dans ces problèmes s'il ne s'agit que de se diriger vers les têtes de puits du champ (approche) sans exiger de précision inutile avant d'être au voisinage du puits où l'on retrouve évidemment des précisions de 0,5 % soit 1 m dans ce cas. Notons que l'AMU ne peut plus être utilisé dans ces problèmes par suite du trop grand "offset", alors que le problème est résoluble par l'AMS puisque la pyramide peut être calculée aussi oblique qu'elle soit.

4.3 Ancrages dynamiques spéciaux.

On trouve des problèmes spéciaux d'ancrage dynamique dans les navires poseurs d'oléoducs où l'on désire une avance automatique du navire par bords programmés, suivant une route donnée, avec de plus un cap tenant compte du courant sous-marin pour assurer au mieux la pose rectiligne du pipe-line. Un autre problème posé par exemple, concernait l'avance lente automatique de gros chalands pour le chargement des boues déversées par des tapis roulants de dragues mécaniques. Les fonds étant extrêmement faibles la solution retenue a été une triangulation du type ρx sur trajets acoustiques horizontaux.

4.4 Problèmes relatifs aux pile-lines.

Nous venons de citer l'ancrage dynamique des poseurs de pipe-lines. En fait, une foule de problèmes se greffent autour de la pose, de l'exploitation et de la maintenance ultérieure. Nous ne ferons qu'énumérer quelques problèmes posés et pour lesquels des solutions AMS ont été étudiées.

- a) Près-balissage de la pose souhaitée
 - b) Mesure de la position exacte réalisée
 - c) Mesure de la configuration dans l'eau, dans les 3 dimensions de la section de pipe-line entre la partie assise et le navire. Ce problème est spécialement délicat. On désire surtout connaître les déformations au voisinage immédiat du navire (en sortie de "stinger" plus précisément), ceci afin d'éviter les ruptures.
 - d) Jalonnage d'un pipe-line et système permettant à un navire d'intervention de le rejoindre, puis de le suivre.
 - e) Réparation d'un pipe-line : balissage de l'avarie et navigation d'engins d'intervention destinés à couper la section avariée, à prendre les mesures de la configuration des deux extrémités du pipe, déformées par la discontinuité des contraintes, et finalement à venir poser une longueur convenablement galbée pour refaire la jonction.
- C'est dans ce genre de problèmes (dont une illustration schématique est donnée dans l'exemple III de la planche) que nous avons rencontré les impératifs les plus astreignants du point de vue des précisions demandées : distances entre les extrémités à quelques cm près, configuration angulaire à 2° près. On a fait appel alors à des bases de mesures localisées sur les engins et à des fréquences toujours au-dessus de 20 kHz. Afin d'assurer la précision, on utilise au maximum les capacités de filtrage de l'AMS. Il a été dit plus haut que son microprocesseur est capable d'effectuer un lissage de données. L'extension de ce lissage permet d'effectuer des mesures pré-

cises sur des données accumulées durant plusieurs minutes par l'engin d'intervention posé sur le fond, donc immobile. Le gain de traitement sur N informations est alors supérieur à la simple moyenne qui donnerait \sqrt{N} . Les erreurs systématiques sont à réduire au mieux et les méthodes différentielles sont employées chaque fois que possible. Ce principe, utilisé pour un positionnement dans les 3 dimensions (base de réception composite elle-même dans les 3 dimensions) permet aussi les mesures angulaires grâce à l'emploi de doublets de répondeurs distants de 2 mètres disposés sur des structures fixées à chaque extrémité de pipe-line.

5. CONCLUSION.

Les systèmes à base courte AMS et AMU ont largement prouvé leurs possibilités d'adaptation à de nombreux problèmes de localisation sous-marine précise. La flexibilité de programmation de l'AMS et ses capacités de gestion de multiples répondeurs lui permettent de résoudre des cas complexes. Le post-traitement programmé d'un grand nombre de données d'écartométrie conduit à des précisions remarquables dans l'évaluation des distances entre points fixes.

D'une façon générale, les résultats observés en opération (ancrage dynamique, réentrée d'outil, repêrage, sauvetage de sous-marin, etc) ont toujours été meilleurs qu'espérés. Ceci est dû d'une part au fait que les niveaux de bruits adoptés pour les calculs ont toujours été pris élevés par précaution, et d'autre part à ce que les fluctuations relatives rapides des signaux et bruits reçus sur deux hydrophones éloignés de plusieurs mètres sont loin d'être aussi fortes qu'on ne l'avait craint.

Il reste encore à combattre les petites variations lentes ou systématiques de niveaux entre canaux de réception, qui peuvent introduire de légers biais systématiques de mesures. Ces biais ne sont à considérer que dans certains problèmes particuliers. Des études d'amélioration sont actuellement en cours qui devraient permettre de réduire les erreurs fixes au même niveau faible que les erreurs aléatoires.



- LOCALISATION SOUS-MARINE PRECISE DANS LES TROIS DIMENSIONS -

