

## TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

---

SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

Claude LEROY

---

### RESUME

L'ancrage dynamique d'un navire nécessite de connaître à tout instant sa position précise et son orientation par rapport à des références fixes sur le fond de la mer.

On examine ici des méthodes acoustiques permettant d'acquérir ces données, et l'on passe en revue les difficultés liées à l'environnement marin. On décrit en particulier le système adopté sur le navire de forage le Pélican. Quelques résultats obtenus dans des conditions réelles de forage sont commentés.

### SUMMARY

The dynamic anchoring of a ship requires a continuous and precise knowledge of its position and orientation with respect to fixed references on the sea floor.

Acoustic methods enabling these data acquisitions are described, and the various difficulties due to the marine environment are reviewed. The system adopted for the drill ship Le Pelican is treated in detail and some results obtained during actual drilling operations are commented upon.

## 1. - INTRODUCTION

### 1.1. - Généralités

Les découvertes de plus en plus prometteuses du pétrole sous la mer entraînent actuellement le développement de techniques avancées pour le forage de puits sous-marins et leur exploitation.

Le forage par très faible fond (<40 m) est bien résolu grâce aux plateformes fixes ou semi-fixes. On a tout naturellement extrapolé ces méthodes à des fonds plus grands par l'utilisation de plateformes ancrées. Cependant, l'ancrage d'une plateforme de forage par les méthodes traditionnelles est une opération longue et coûteuse. De plus la solution est peu flexible car une fois la plateforme ancrée sa déconnection est laborieuse. Enfin et surtout cette technique ne peut être étendue aux grands fonds.

On a donc imaginé d'appliquer les méthodes d'ancrage dynamique, beaucoup plus souples, à des navires de gros tonnage conçus pour le forage. Ces méthodes, où un jeu complexe de propulseurs indépendants permet d'opérer sur le navire des poussées réglables à tout instant en intensité et direction, avaient déjà été utilisées dans de petits bâtiments de recherche ou d'intervention devant se maintenir en un point fixe. L'extrapolation de cette technique à un navire de forage pose cependant de nombreux problèmes car le navire doit impérativement être maintenu à l'aplomb du forage avec une tolérance sévère.

Le premier bâtiment à utiliser ce procédé, le Glomar Challenger, avait bénéficié d'un certain nombre de conditions favorables : utilisation pour le forage scientifique par grands fonds (>2000 m), d'où tonnage limité, bruit propre réduit et grands déplacements horizontaux possibles. Ces avantages disparaissent pour un navire de plus grand tonnage chargé d'effectuer du forage d'exploitation, c'est à dire d'assurer le tubage du trou foré et la pose d'une tête de puits par des fonds très variables et aussi faibles que 80 m. Les problèmes de précision de positionnement se trouvent accrus et nous nous proposons ici de les examiner sous l'angle du traitement de l'information en prenant comme exemple le système adopté pour le navire de forage Le Pélican qui a réalisé plusieurs forages de trois tubés dont un profond en mer du Nord durant l'automne 1972.

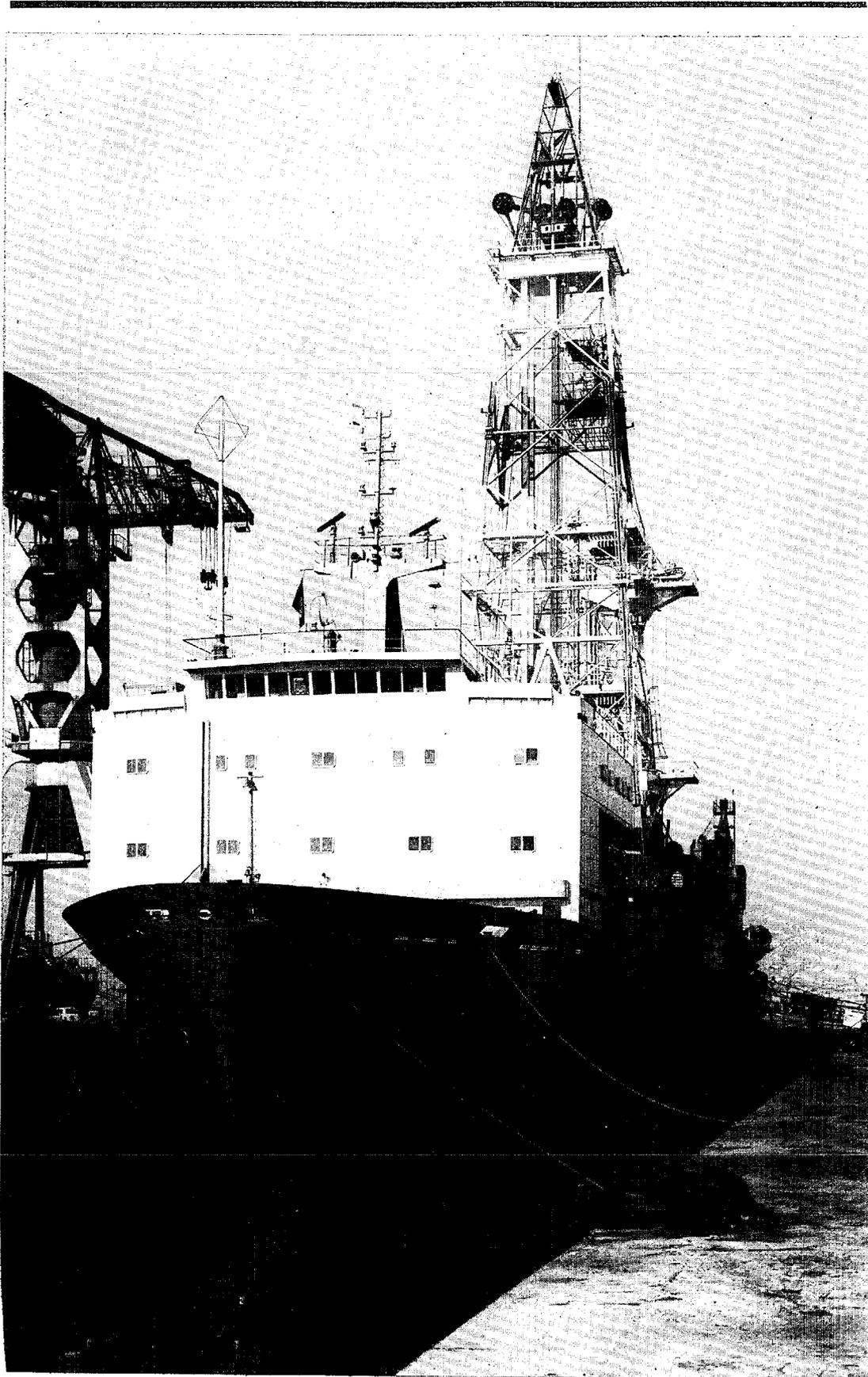
### 1.2. - Le Pélican

Le Pélican (fig. 1) est un navire de 15000 t environ, de 149 m de long, 21 m de large et 7 m de tirant d'eau, conçu pour le forage en mer. Opérationnel en 1972, il est doté d'équipements ultra modernes.

Les problèmes d'ancrage à résoudre initialement étaient les suivants : maintenir le centre du navire (table de forage) à l'intérieur d'un cercle de rayon égal à 6% de la hauteur d'eau par des fonds de 50 à 300 m (soit une tolérance sur le déplacement horizontal de 3 à 18 m seulement).



SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN





## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

Ces tolérances devaient être respectées pour des durées d'opération susceptibles d'atteindre jusqu'à 4 mois, avec des conditions d'environnement pouvant comporter des rafales de vent de 65 noeuds et des hauteurs significatives de vagues de 5 m, le roulis et le tangage du navire restant par ailleurs dans  $\pm 10^\circ$  et  $\pm 5^\circ$  respectivement.

Pour assurer ces performances il était à priori demandé de connaître à tout instant la position absolue du navire (écartométrie) à 1% près de la profondeur d'eau. Le maintien de la position s'effectuait par la commande du pas de 7 hélices tournant à vitesse constante: 5 hélices transversales (thrusters) de  $\varnothing$  2,40 m, 1500 CV, 240 t/mm réparties en 3 sur l'avant et 2 sur l'arrière, et 2 hélices principales (force longitudinale) de  $\varnothing$  4 m, 3000 CV, 145 t/mm.

L'ensemble du dispositif d'asservissement du Pélican, depuis l'acquisition des données nécessaires jusqu'à la fourniture des courants électriques pour la commande des moteurs d'orientation des pales d'hélices devait être très redondant et assurer la survie de l'ancrage à toute première panne quelle que soit son origine. C'est la raison pour laquelle la solution choisie comprend (fig. 2 et 3).

- pour les mesures d'écartométrie :

deux inclinomètres à fil tendu,  
un dispositif acoustique précis et redondant

- pour les données auxiliaires :

courantomètres, houlomètres, anémomètres, centrales de verticale et de cap,

- pour le traitement des informations, l'élaboration des commandes, et le logging des données et manoeuvres :

deux ordinateurs,  
un calculateur analogique

En fonctionnement normal, l'asservissement est assuré par l'un des ordinateurs à l'aide des données de l'acoustique qu'il gère et traite.

En cas de panne de l'ordinateur de service, le second prend le relais, compte tenu du fait qu'il a en mémoire les dernières données de mesure et les derniers ordres aux propulseurs.

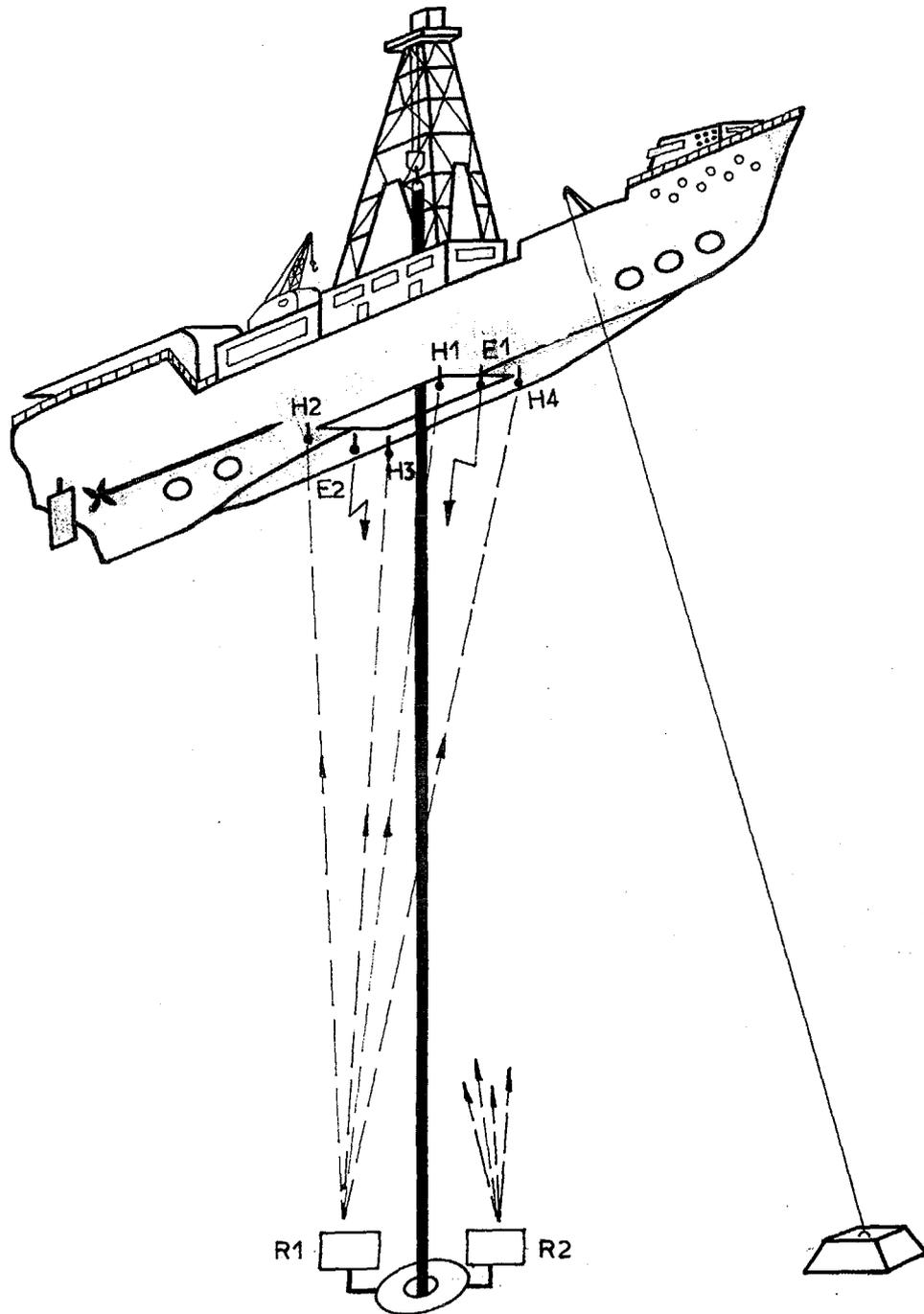
En cas de panne simultanée des deux ordinateurs, le calculateur analogique assure le positionnement temporaire à l'aide des données des inclinomètres et compte tenu du fait que lui aussi possède en copie les derniers ordres des ordinateurs.

En cas de manque total d'information en provenance de l'acoustique durant un certain temps tolérable grâce à une extrapolation des données de l'écartométrie, les inclinomètres assurent le relai du système acoustique.



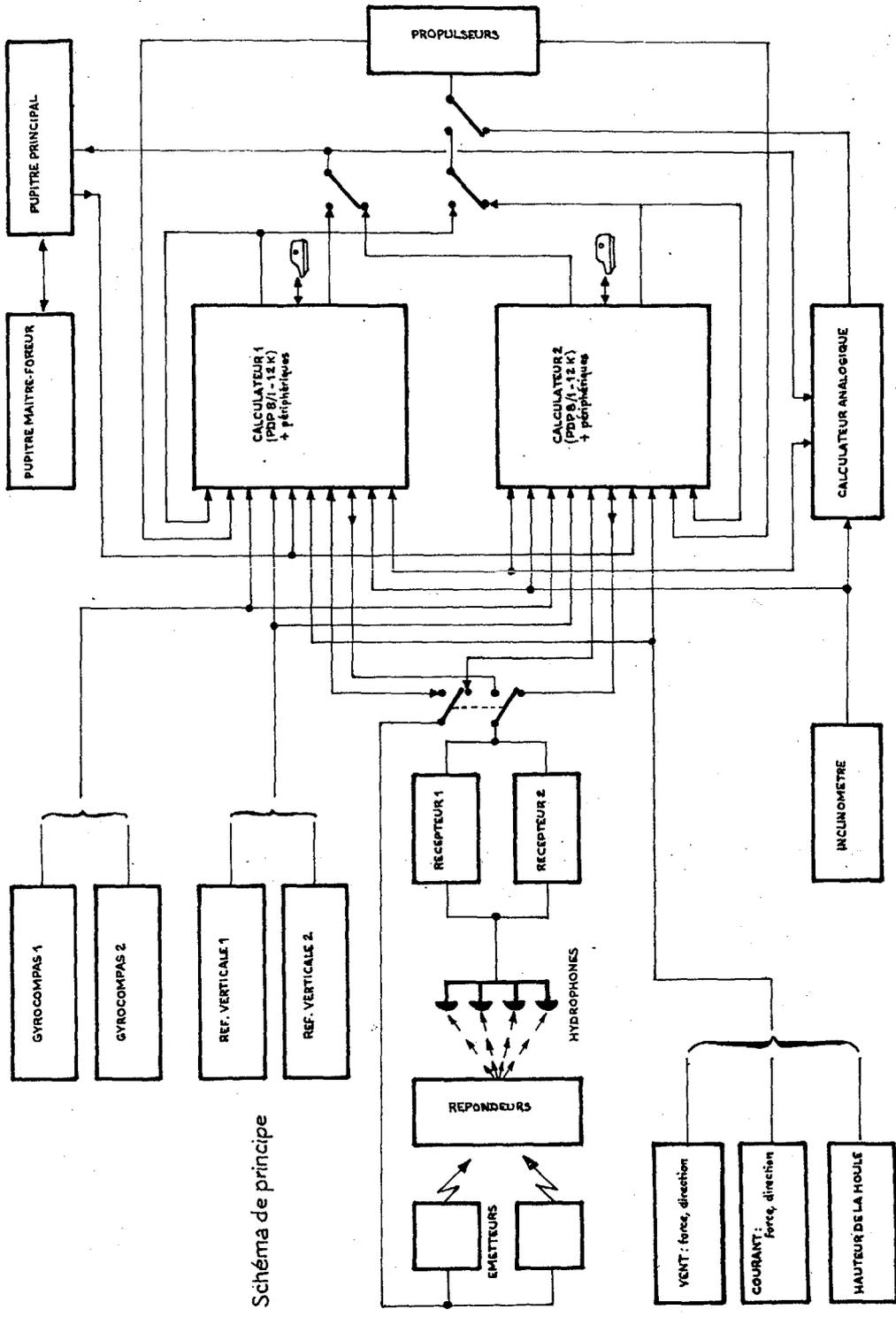
SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

fig: 2



SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

FIG. 3





## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

L'ancrage opérationnel étant avant tout assuré à partir de l'écartométrie acoustique et des calculs par ordinateur, c'est cet ensemble que nous considérerons dans tout ce qui suit. Cet ensemble permet d'ailleurs d'assurer d'autres fonctions telles que le repérage d'un forage momentanément abandonné (pour raisons de mauvais temps par exemple), la réentrée de l'outil pour une reprise du forage et le guidage d'une tourelle de plongée permettant la surveillance visuelle des opérations.

### 2. - PRECISIONS REQUISES POUR L'ASSERVISSEMENT

Dans le système d'écartométrie acoustique les informations de position sont fournies par une suite discrète de valeurs échelonnées dans le temps et entachées d'erreurs pratiquement indépendantes (on suppose corrigées les erreurs systématiques). La cadence d'information est constante en l'absence de données erratiques ou de manques. On conçoit aisément qu'il existe une relation cadence d'information - erreur d'information à satisfaire pour maintenir le navire en position compte tenu de ses caractéristiques dynamiques et des puissances disponibles.

Un calcul complet déborderait le cadre de cette étude car il faut tenir compte des mouvements naturels du navire que l'on ne désire pas compenser, à savoir le balancement de ce dernier autour de sa position d'équilibre (roulis, tangage, lacet, pilonnement). Ces mouvements, tant qu'ils restent dans les limites fixées, ne compromettent pas la tenue des tiges de forage, et leur réduction demanderait un surcroît inutile de puissance.

La prise en considération de l'amplitude de ces mouvements par rapport aux erreurs des mesures écartométriques devient par contre inutile dans le cas des forages profonds. Nous ne ferons ici qu'esquisser le problème dans ce cas simplifié en nous bornant à une seule dimension (un seul degré de liberté).

Soit alors  $X$  la transformée de Laplace du déplacement,  
 $F_p$  celle de la force exercée par les propulseurs  
 $F_e$  celle de l'ensemble des autres forces.

La loi fondamentale de la mécanique donne :

$$s^2 X^2 = \frac{1}{Ma} (F_p + F_e) \quad (1)$$

D'autre part, le rôle de l'ancrage est de créer, d'après les lectures de la position du navire, des forces  $F_p$  de la forme  $F_p = KX$ , ou plutôt,  $X$  étant entaché d'erreur, de la forme :

$$F_p = K (X + \varepsilon) \quad (2)$$

L'élimination d'une part de  $F_p$ , d'autre part de  $X$  permet de rem-

SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

placer (1,2) par le système équivalent :

$$\psi = \frac{K}{Ma s^2} / \left( 1 + \frac{K}{Ma s^2} \right) \tag{3}$$

$$X = -\psi \varepsilon + \frac{1-\psi}{Ma s^2} F_e \tag{4}$$

$$F_p = -\psi [F_e + Ma s^2 \varepsilon] \tag{5}$$

$\psi$  a une interprétation très simple : c'est la fonction de transfert en boucle fermée du système. En tant que telle elle doit être holomorphe dans la partie droite du plan  $s$ .

Nous utiliserons les formules (4) et (5) pour exprimer que si  $F_p = F_o/s$  l'erreur  $E(X^2)$  est minimale, et que d'autre part, l'accroissement quadratique moyen de la force exercée par les propulseurs, dans l'intervalle de temps entre deux pointés s'écrit, en l'absence de déplacement :

$$\delta^2 = - \frac{(\Delta t)^3 E^2 Ma^2}{2i\pi} \int_{-i\infty}^{i\infty} \psi \bar{\psi} s^6 ds = \Delta t E^2 Ma^2 I_1 \tag{6}$$

où  $\bar{\psi}(s) = \psi(-s)$

et on devra exprimer que  $\delta$  est aussi petit que possible.

Comme  $E(x^2)$  est donnée par :

$$E(x^2) = - \frac{1}{2i\pi} \frac{F_o^2}{Ma^2} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{(1-\psi)(1-\bar{\psi})}{s^6} ds = \frac{F_o^2}{Ma^2} I_2 \tag{7}$$

on pourra employer la méthode des opérateurs de Lagrange et rendre minimale  $I_1 + \lambda I_2$

En posant  $\Lambda = s_o^{12}$ , puis  $\frac{s}{s_o} = x$ , il faudra rendre minimale

$$\int_{-i\infty}^{i\infty} \left[ \frac{(1-\psi)(1-\bar{\psi})}{x^6} + \psi \bar{\psi} x^6 \right] dx$$

la méthode est connue et donne :

$$\psi(x) = \frac{1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2}{P(x)} \tag{8}$$



SYSTÈME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

avec :

$$P(x) = 1 + x^6 + \alpha_1 (x + x^5) + \alpha_2 (x^2 + x^4) + \alpha_3 x^3$$

$$\alpha_1 = \sqrt{2} (1 + \sqrt{3})$$

$$\alpha_2 = (1 + \sqrt{3})^2$$

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{3}{2}} (1 + \sqrt{3})^2$$

D'après (6) on a alors :

$$\int_0^2 = \Delta t^3 E^2 Ma^2 s_0^7 \mathcal{J}_1 = \Delta t^3 E^2 Ma^2 s_0^7 \times 2,50$$

De même :

$$X = \frac{F_0}{Ma s_0^2} \phi(s_0 t)$$

$$\text{avec : } \phi(\tau) = \frac{1}{2i\pi} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{(1 - \psi(x)) e^{\tau x}}{x^3} dx$$

dont le maximum  $\mathcal{J}_2$  est atteint pour  $\tau = 3,48$  et est égal à  $\mathcal{J}_2 = 1,30$

Dans le problème d'ancrage  $X$  est donné par sa valeur  $k_x$  en ‰ de la profondeur d'eau  $H$  et  $E$  devra être exprimé de même :

$$k_x = \frac{100 X}{H} \quad \text{et} \quad k_E = \frac{100 E}{H}$$

L'erreur maximale admissible est donnée par :

$$k_x = \frac{100 \mathcal{J}_2}{H} \frac{F_0}{Ma s_0^2}$$

Si par conséquent la profondeur minimale d'adaptation est  $H_m$  on aura :

$$s_0 = \sqrt{\frac{F_0}{Ma} \frac{100 \mathcal{J}_2}{k_x H_m}} \quad (9)$$



SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

Le nombre de pointés observés avant d'atteindre le maximum devra être égal à 30 au moins et ce nombre est donné par :

$$n = \frac{3,5}{\Delta t s_o} \quad (10)$$

Enfin l'écart de lecture admissible est donné par :

$$k_e = \frac{100 \delta}{H_M (\Delta t)^{3/2}} \frac{1}{Ma \sqrt{s_o}^{7/2}} \quad (11)$$

où  $H_M$  est la profondeur maximale d'adaptation

$$\text{avec } F_o = 3 \times 10^5 \text{ N} \quad (30 \text{ tonnes})$$

$$Ma = 3 \times 10^7 \text{ kg}$$

$$k_x = 6$$

$$\delta = 2000 \text{ N} \quad (\text{ordre de grandeur de la plage morte de la commande des propulseurs})$$

on trouve :

$$s_o = \frac{0,47}{\sqrt{H_m}} \quad k_e = 0,061 \cdot \frac{H_m^{7/4}}{H_M (\Delta t)^{3/2}} \quad \Delta t \leq 0,25 H_m$$

$$\text{avec } H_m = 1000 \text{ m} \quad H_M = 3000 \text{ m} \quad (\text{forage profond}) \text{ on trouve}$$

$$\Delta t < 8 \text{ s} \quad \text{et en prenant } \Delta t = 2 \text{ s} \quad \text{il vient } s_o = 0,015 \quad k_e = 1,28$$

On voit donc qu'une erreur de l'ordre du 1% de la hauteur d'eau est compatible avec des données acquises au rythme de 1 toutes les 2 secondes pour un ancrage profond.

Un calcul analogue mais plus rigoureux pour le cas de l'ancrage 50 - 300 m montrerait qu'il faut un rythme d'acquisition de donnée de 2 informations/seconde à 1% d'erreur pour ancrer le navire avec suffisamment d'assurance. Le système adopté fournit par seconde deux informations doubles (une par chaque répondeur) avec une précision meilleure que 1% de la hauteur d'eau.



### 3. - ECARTOMETRIE ACOUSTIQUE - PRINCIPE DE LA MESURE

#### 3.1. - Généralités

Le système d'écartométrie acoustique du Pélican est basé sur la mesure des temps de parcours des trajets acoustiques directs reliant un émetteur d'interrogation sur le navire, un répondeur près du trou de forage, et trois hydrophones de réception à bord du navire. Pour obtenir une redondance d'information et une grande sécurité de fonctionnement, avec survivance aux diverses pannes possibles, on dispose en fait de 2 émetteurs, 2 répondeurs et 4 hydrophones.

Le choix d'une méthode de calcul par ordinateur pour l'asservissement du navire à tout naturellement influencé la solution adoptée pour l'écartométrie acoustique. Il devenait en effet possible d'une part de gérer l'acoustique par ordinateur et d'autre part d'effectuer des calculs sans aucune approximation susceptible de réduire la précision. En particulier la solution répondeur sur le fond s'est avérée extrêmement avantageuse par rapport à la solution émetteur libre (ou "pinger"), car elle permet d'obtenir des informations sélectionnées, plus précises, et uniquement à la demande, ce qui augmente l'autonomie du système.

#### 3.2. - Equations de la mesure

Soit (fig.4)  $\Omega(\xi, \eta, \zeta)$  un trièdre droit de référence lié au navire de la façon suivante :

$\Omega \xi$  intersection de l'axe du derrick avec le plan des hydrophones de mesure.

$\Omega \xi$  parallèle au plan de symétrie du navire et au plan des hydrophones, et orienté vers l'avant ;  $\Omega \eta$  parallèle au plan des hydrophones et orienté vers tribord ;  $\Omega \zeta$  orienté vers le bas.

On veut obtenir les coordonnées  $x, y, z$  du trou de forage par rapport à un trièdre droit  $O, x, y, z$  lié au navire,  $O$  étant sur l'axe du derrick au niveau de la plateforme de forage ( $Oz = \xi_0$ ) le plan  $x, O, y$  étant cette fois horizontal avec  $Ox$  vers l'avant et  $Oy$  vers tribord.

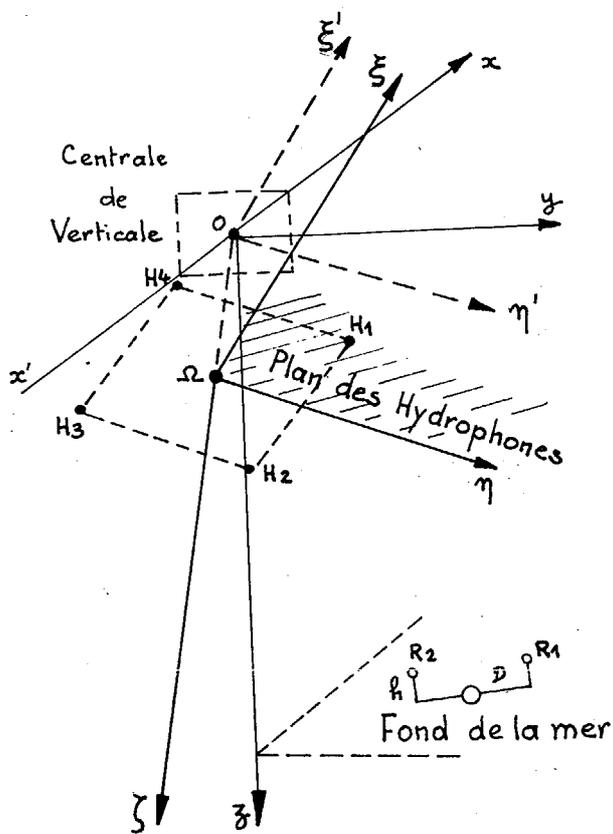
On dispose pour ce faire de deux répondeurs 1 et 2 disposés symétriquement par rapport à l'axe de forage, à une distance connue  $l$  de celui-ci et à une hauteur  $h$  au-dessus du fond. L'orientation  $\alpha$  du vecteur  $\vec{R}_2 \vec{R}_1$  joignant les deux répondeurs est connue de façon absolue par un étalonnage préliminaire, et le cap  $\varphi$  du navire est mesuré à tout instant, de même que les angles  $R$  et  $T$  de roulis et tangage, (fig.4) par une centrale de cap et de verticale.

On trouve immédiatement que les coordonnées  $x_1, y_1, z_1$  et  $x_2, y_2, z_2$  des

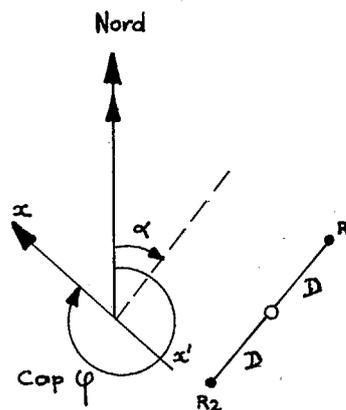


TRIEDRES DE REFERENCE

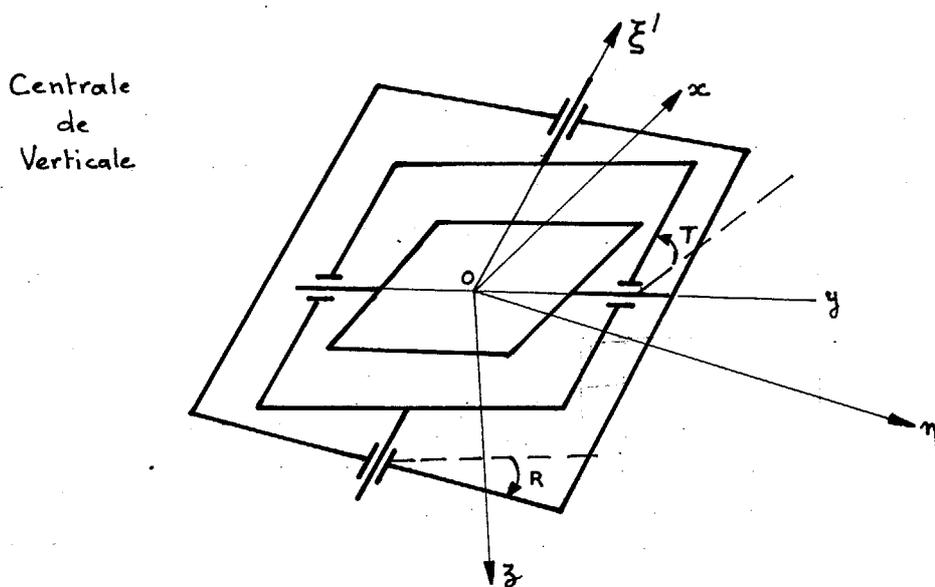
FIG. 4



ANGLES AU FOND



ANGLES DE ROULIS ET TANGAGE





SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

répondeurs  $R_1$  et  $R_2$  sont liées à  $x, y, z$ , par :

$$\begin{cases} x = x_1 - D \cos (\alpha - \varphi) \\ y = y_1 - D \sin (\alpha - \varphi) \\ z = z_1 - D \end{cases} \quad \begin{cases} x = x_2 + D \cos (\alpha - \varphi) \\ y = y_2 + D \sin (\alpha - \varphi) \\ z = z_2 - D \end{cases} \quad (12)$$

et que  $x_i, y_i, z_i$  ; sont eux mêmes liés à  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  par :

$$\begin{cases} x_i = \xi_i \cos T + \eta_i \sin T \sin R + (\zeta_i + \zeta_0) \sin T \cos R \\ y_i = \eta_i \cos R - (\zeta_i + \zeta_0) \sin R \\ z_i = -\xi_i \sin T + \eta_i \cos T \sin R + (\zeta_i + \zeta_0) \cos T \cos R \end{cases}$$

Le problème se ramène donc à la mesure des coordonnés  $\xi, \eta, \zeta$  des répondeurs par rapport aux axes liés à la base de mesure (fig.5).

Soit 2a et 2b les côtés du rectangle formé par la base des 4 hydrophones de réception. Pour des raisons évidentes de facilité de calcul ce rectangle a pour axes  $\Omega \xi$  et  $\Omega \eta$ . Il aurait été également souhaitable de disposer les émetteurs d'interrogation au voisinage des hydrophones ou sur les axes. Par suite de contraintes liées à la construction du navire, les émetteurs ont dû être placés de façon légèrement décalée par rapport à la quille, aux points de coordonnées (c,d) et (-c, -d).

Disposant de quatre hydrophones et de 4 émetteurs, il existe 8 jeux de formules pour obtenir  $\xi, \eta, \zeta$  selon les trois hydrophones considérés et l'émetteur choisi. Ces formules se groupent aisément en 4 groupes dans chacun desquels il suffit de remplacer c par -c et d par -d pour passer d'une formule à l'autre.

Nous considérerons dans notre exemple le traitement par les hydrophones 1,2,3 (formules (4) et (4')).

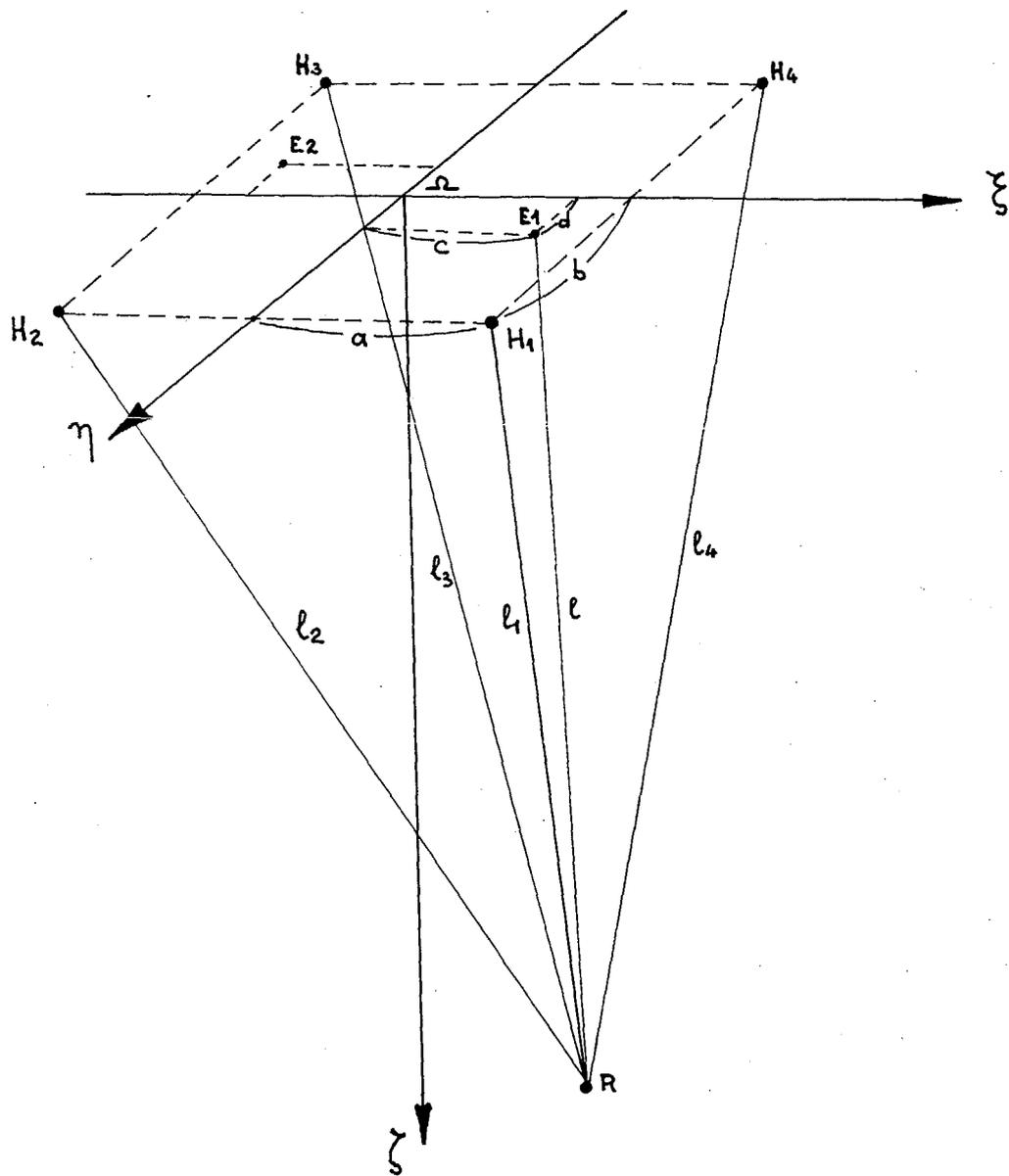
Désignant par  $l_1, l_2, l_3$  les distances du point  $M(\xi, \eta, \zeta)$  à localiser aux hydrophones 1, 2 et 3 on trouve immédiatement :

$$\begin{aligned} 4a \xi &= l_2^2 - l_1^2 = (l_2 - l_1) (l_2 + l_1) \\ 4b \eta &= l_3^2 - l_1^2 = (l_3 - l_1) (l_3 + l_1) \end{aligned} \quad (14)$$

Les quantités  $(l_i - l_j)$  sont proportionnelles aux différences des temps d'arrivées  $\Delta t_{ij} = (t_i - t_j)$  des trajets sonores.



FIG. 5





SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

Par contre, les quantités  $(l_i + l_j)$  ne sont pas accessibles par mesures directes mais elles sont voisines du double de la distance entre le centre  $\Omega$  de la base hydrophonique et le répondeur. Pour  $l_i + l_j \gg 2a$  et  $2b$ , de faibles valeurs des déplacements  $x, y$  et des angles  $R$  et  $T$ , et pour des variations relatives réduites de  $z$  (pilonnement faible), il serait possible de prendre une valeur moyenne pour l'ensemble des  $l_i + l_j$ . C'est le cas d'un ancrage par grand fond

(3000 m par exemple). La précision de mesure des  $\Delta t$  étant limitée comme nous le verrons plus loin il est nécessaire d'opérer avec des valeurs confortables pour  $a$  et  $b$ , en sorte que la condition

$$l_i + l_j \gg 2a \text{ et } 2b$$

cesse rapidement d'être valable. Un rapide calcul montrerait que dans le cas du Pélican opérant par 50/300 m de fond une équation simplifiée serait insuffisante.

Les équations à utiliser procèdent donc de la résolution complète de la pyramide formée par le répondeur et les trois hydrophones plus l'émetteur d'interrogation. Un calcul simple mais fastidieux conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \xi = (l_2 - l_1) \omega_4 \\ \eta = (l_3 - l_2) \left[ \frac{a}{b} \omega_4 + \frac{1}{4b} (l_3 - l_1) \right] \\ \zeta^2 = \left[ 2a \omega_4 + \frac{l_2 - l_1}{2} \right]^2 - (\xi + a)^2 - (\eta - b)^2 \end{cases} \quad (15)$$

où la quantité  $\omega_4$  est donnée par :

$$2\omega_4 = \frac{m^2 + L_1 L_2 - \frac{b-d}{2b} (l_3 - l_2) (l_3 - l_1)}{a(L_3 + L_2) - (a+c)(l_2 - l_1) - \frac{ad}{b} (l_3 - l_2)} \quad (16)$$

avec  $m^2 = (a^2 + b^2) - (c^2 + d^2)$

et  $L_i = l + l_i$ ,  $l$  étant la distance  $\Omega R$  entre l'émetteur et le répondeur.

Le système interrogation - réponse permet la mesure directe des quantités  $L_i$  avec une certaine précision et les quantités  $l_i - l_j$  sont mesurées avec encore plus de précision. On a donc tous les éléments pour le calcul de (15) et (16).

Ces formules sont lourdes mais sont en contrepartie rigoureusement valables dans tous les cas de figure. Elles permettent une écartométrie avec des dépointages aussi grands que l'on veut. En particulier elles



## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

permettent d'assurer la fonction "approche" du navire, c'est à dire de repérer un point de forage momentanément abandonné (à cause du mauvais temps par exemple) et de se diriger vers lui.

Notons que dans le cas du Pélican, on a utilisé une forme légèrement simplifiée en prenant :

$$2\omega_4 = \frac{m^2 + L_1 L_2}{a(L_3 + L_2) - (a + c)(l_2 - l_1)} \quad (17)$$

On trouve aisément que les termes omis n'entraînent qu'une erreur tout à fait négligeable.

Bien entendu les formules précédentes sont uniquement applicables pour l'ensemble émetteur 1, hydrophones 1 2 et 3. Pour l'émetteur 2 on applique (17) avec  $\omega_4$  changé remplacé par  $\omega_4'$  vérifiant :

$$2\omega_4' = \frac{m^2 L_1 L_2}{a(L_3 + L_2)}$$

(c en - c entraîne au dénominateur  $(a-c)(l_2 - l_1)$  qui est négligeable)

On dispose ainsi d'un jeu complet de formules pour les différentes combinaisons émetteur-hydrophones utilisées.

Ces formules ont été numérisées et, les valeurs effectivement mesurées (différences de temps) étant quantifiées, une mise en forme adéquate avec facteurs d'échelles appropriés a permis de réaliser les calculs en simple précision malgré la dimension réduite des registres de calculs (12 bits). La recherche de formules optimales quantifiées, comprenant la détermination des coefficients, tous entiers, s'est faite par approximations successives avec calcul statistique par ordinateur des erreurs  $\delta\xi$ ,  $\delta\eta$ ,  $\delta s$  dans le domaine utile de variation des coordonnées  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $s$ . Ces erreurs ont pu être limitées à environ 0,1% de la profondeur d'eau.

### 3.3. - Précisions requises

3.3.1. - On a vu précédemment que l'on cherchait à obtenir une précision sur l'écartométrie meilleure que 1% de la profondeur d'eau H, soit :

$$\frac{\delta x}{H} < \frac{1}{100} \quad \text{et} \quad \frac{\delta y}{H} < \frac{1}{100}$$

On verra plus loin que l'erreur la plus importante provient des incertitudes sur la mesure des différences de temps d'arrivée  $\Delta t_{ij}$ . On a donc cherché à réduire les autres erreurs pour qu'elles n'entraînent


 SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN
 

---

que des imprécisions  $\delta x$  et  $\delta y$  de quelques ‰ de la hauteur d'eau.

L'examen des équations (12) montre qu'avec  $D = 5$  m il faut assurer l'alignement des répondeurs avec le centre de forage à mieux que  $3^\circ$  près et assurer  $\delta D < 10$  cm  $\delta \alpha$  et  $\delta \varphi <$  quelques degrés. Cette dernière condition est néanmoins surabondante en fonctionnement normal car on évalue  $x$  et  $y$  par la demi-somme des valeurs trouvées en interrogeant chaque répondeur.

D'autre part, les équations 13 montrent qu'il faut mesurer les angles  $R$  et  $T$  à mieux que  $0,2^\circ$  près en moyenne (1).

3.3.2. - Un calcul d'erreur sur les équations (15,16) serait fastidieux et surabondant. Pour évaluer la précision requise sur les mesures acoustiques proprement dites, il est suffisant de considérer les équations (14) et d'opérer avec des majorantes.

Soit donc par exemple l'équation :

$$4a \xi = (l_2 - l_1)(l_2 + l_1)$$

On dispose d'un système où l'on interroge au temps  $t_0$  connu le répondeur considéré, et où l'on mesure les temps d'arrivée  $t_1$  et  $t_2$  sur les hydrophones 1 et 2. D'autre part, on connaît avec une erreur  $\delta \tau$  le retard  $\tau$  introduit par construction (voir plus loin) entre l'instant de réception sur le répondeur du signal d'interrogation, et l'instant où le répondeur renvoie un signal. En désignant par  $C$  la célérité du son il vient pour l'erreur  $\delta \xi$  :

$$\delta \xi = \frac{1}{4a} \left[ (l_2 - l_1) \delta (l_2 + l_1) + (l_2 + l_1) \delta (l_2 - l_1) \right]$$

et comme  $l_2 + l_1 \sim 2H$

$$\frac{\delta \xi}{H} \sim \frac{1}{2a} \left[ \frac{l_2 - l_1}{2H} \delta (l_2 + l_1) + \delta (l_2 - l_1) \right] \quad (18)$$

ou, en introduisant les temps d'attente de la réponse  $T_i = t_i - t_0$

$$\frac{\delta \xi}{H} \sim \frac{C}{2a} \left[ \frac{l_2 - l_1}{2H} \delta (T_1 + T_2) + \delta (t_2 - t_1) \right] \quad (19)$$

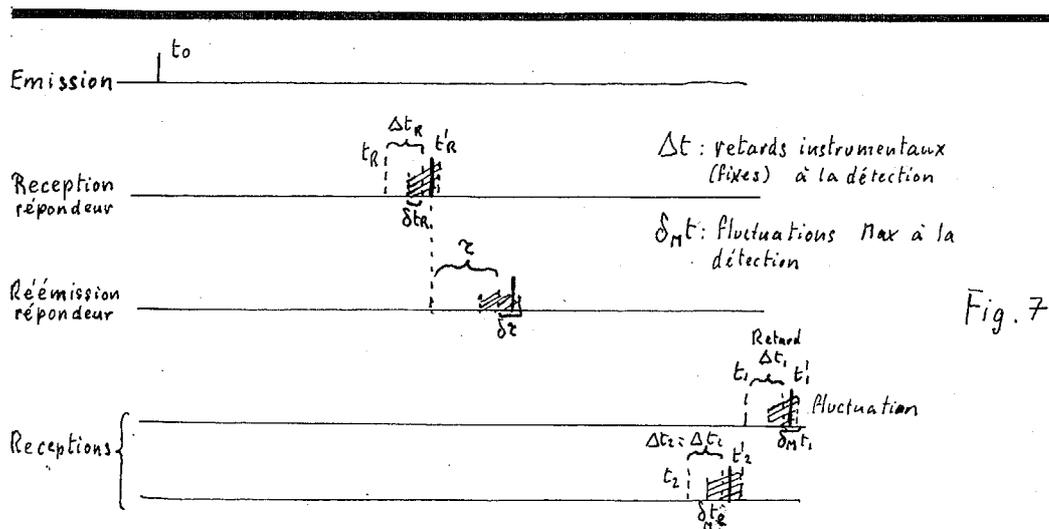
Il ressort immédiatement de (19) que l'erreur admissible sur la mesure de  $t_2 - t_1$  est beaucoup plus petite que celle sur  $T_1 + T_2$ .

(1) On trouverait que la rotation maximale du navire entre les réceptions sur les hydrophones extrêmes est inférieure à cette valeur, de l'ordre de  $0,03^\circ$ .





## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN



L'erreur  $\delta\tau$  est faible et de l'ordre de  $\frac{\tau}{1000}$ . Elle n'est que très lentement variable (dérive des valeurs d'un circuit RC). Elle n'introduit donc qu'un biais systématique très faible ( $\tau < 100$  ms) dans le positionnement et n'affecte pas le comportement de l'asservissement.

On prendra donc pour les calculs :

$$|\sigma(T_1 + T_2)| < |\delta_M t_R| + |\delta_M t_1| + |\delta_M t_2| \sim |\delta_M t_R| \text{ comme on le verra ultérieurement.}$$

En ce qui concerne l'erreur  $\sigma(t_2 - t_1)$  on aura (voir plus loin)

$$|\sigma(t_2 - t_1)| < |\delta_M t_2| + |\delta_M t_1|$$

et comme les mesures de  $t_i$  sont indépendantes mais de mêmes caractéristiques statiques

$$\left| \frac{\delta \xi}{H} \right| \sim \frac{c}{2a} \sqrt{\left(\frac{t_2}{30}\right)^2 + 2(\sigma_{t_i})^2} \quad (21)$$

### 3.4. - Erreurs de mesure

3.4.1. - Les performances de l'écartométrie acoustique seront donc essentiellement liées à la précision de mesure des  $t_r$  et  $t_i$ . Les signaux utilisés sont des impulsions à fréquence pure d'une certaine durée. A cause des nombreux réflecteurs présents autour de l'appareillage, en particulier le riser qui longe de très près les trajets acoustiques dans leur totalité, il était impossible d'opérer la mesure des  $t_i - t_j$  par la mesure des différences de phases sur une onde établie.

Seule la mesure des fronts d'ondes correspondant aux trajets directs avant toute réflexion est possible. Le problème est, contrairement aux cas les plus courants rencontrés en acoustique sous-marine



# SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

(détection) un problème où le rapport signal/bruit est fort mais où la précision demandée est grande.

Le traitement essentiel effectué sur les signaux tant au niveau répondeur qu'au niveau hydrophones consiste à effectuer successivement les opérations suivantes :

- préamplification,
- filtrage,
- amplification fonction du niveau de bruit (CAG)
- détection double-alternance
- intégration à constante de temps modérée (on doit atteindre un niveau suffisant avant l'arrivée des réflexions quelques ms seulement après le signal)
- génération d'un signal logique au franchissement d'un seuil (pour déclenchement d'un circuit réponse ou pour comptage).

Les erreurs de mesures proviendront de trois fluctuations fondamentales :

- fluctuations de l'enveloppe détectée dues à la présence du bruit
- fluctuation du seuil par rapport à l'amplitude finale dues aux variations de bruit (CAG) et du signal (fluctuations de propagation)
- fluctuations électroniques ("jitter" électronique et effet de quantification dans le temps des signaux logiques)

### a) erreurs dues au bruit

En utilisant les formules générales donnant le moment d'ordre deux d'une sinusoïde additionnée à un bruit après détection établie par Middleton (1), on obtient, dans le cas d'une détection linéaire avec rapport S/B élevé à l'entrée, et après suppression des composantes autour de  $f_0$  :

$$C_s(\tau) = \frac{A^2 + \sigma^2}{\pi^2} + \frac{8\sigma^2}{\pi^2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right) C(\tau) \cos \omega_0 \tau + \frac{\sigma^4}{8\pi A^2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right) C(\tau)^2 + \dots \quad (22)$$

où le signal d'entrée est de la forme  $A \cos \omega_0 t$ , le bruit ayant une covariance  $\sigma^2 C(\tau)$ .

Notons que le troisième terme est négligeable.

(1) An Introduction to Statistical Communication Theory  
David MIDDLETON, Mc Graw Hill Book Co.



## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

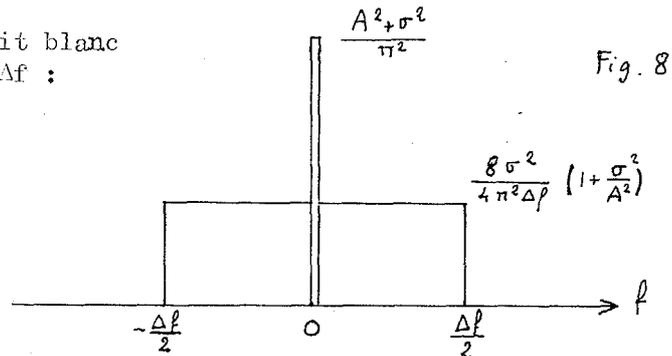
Le spectre de ce signal s'obtient en prenant la transformée de Fourier. En appelant  $\gamma(f)$  le spectre du bruit

$$\gamma_S(f) = \frac{A^2 + \sigma^2}{\pi^2} (f) + \frac{8\sigma^2}{2\pi^2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right) \left[ \gamma(f - f_0) + \gamma(f + f_0) \right] + \frac{\sigma^2}{8\pi A^2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(n) \gamma(f - n) dn + \dots \quad (23)$$

Dans le cas d'un bruit blanc de largeur de bande  $\Delta f$  :

$$\gamma(f_0) = \frac{\sigma^2}{2\Delta f}$$

(voir figure 8)



Le signal de sortie est égal à :

$$E(S+B) - E(B) = \frac{\sqrt{A^2 + \sigma^2}}{\pi} - \frac{\sigma}{\pi} = \frac{A}{\pi} + \frac{\sigma^2}{2A\pi} - \frac{\sigma}{\pi} \quad (24)$$

$$\# \frac{A - \sigma}{\pi}$$

Le bruit de sortie a pour niveau spectral :

$$\frac{2\sigma^2}{\pi^2 \Delta f} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right)$$

Après passage dans un filtre RC sa puissance est :

$$\sigma_S^2 = \frac{\sigma^2}{2RC \Delta f \pi^2} \left(1 + \frac{\sigma^2}{A^2}\right)$$

Le rapport signal sur bruit de sortie vaut donc, dans la mesure où le filtre RC n'affaiblit pas la sinusoïde qui est de durée limitée, et où :

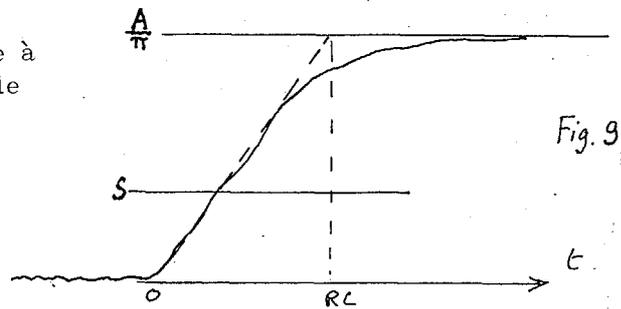
$$\frac{1}{4RC} < \frac{\Delta f}{2}$$

$$\frac{A - \sigma}{\sigma \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{A^2}}} \sqrt{2RC \Delta f} \quad \# \quad \left[ \frac{S}{B} \right]_e \sqrt{2RC \Delta f} \quad (25)$$

SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

L'impulsion est appliquée à un seuil S. La pente moyenne de la montée vaut (fig.9)

$$\frac{\pi RC}{A}$$



L'incertitude sur l'instant de passage au seuil peut être estimée par sa variance  $\sigma_T$  en admettant qu'à l'instant moyen  $\sigma_T$  de passage la variance de l'incertitude de la tension est  $\sigma_S$ , donc :

$$\sigma_T = \sigma_S \times \frac{\pi RC}{A}$$

d'où  $\sigma_T \neq \frac{\sigma}{A \sqrt{2 RC \Delta f}} \times RC = \frac{\sigma}{A} \sqrt{\frac{RC}{2 \Delta f}}$  (26)

$$= \sqrt{\frac{RC}{2 \Delta f}} \times \frac{1}{\left[ \frac{S}{B} \right] e}$$

Dans le Pélican on a réalisé la mesure au niveau des hydrophones sur des impulsions de 2 ms à 25 kHz, filtrées dans  $\Delta f = 4000$  Hz. Les flancs du filtre étaient suffisamment abrupts pour éliminer l'oscillation résiduelle après intégration (composante autour de 50 kHz). L'intégration se faisait avec une constante de temps de  $RC = 0,5$  ms.

Les puissance et directivité à l'émission des répondeurs ont été calculées pour obtenir un rapport S/B à l'entrée supérieur à 34 dB.

On trouve alors en appliquant (26)

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{5 \times 10^{-4}}{8000}} \times \frac{1}{50} = 5 \mu s ; \quad t = 5 \mu s \quad M^t \quad 10 \mu s$$

b) erreurs dues aux fluctuations de niveau

On détecte l'instant t où la courbe enveloppe d'équation

$$y = A \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right] \text{ atteint le seuil } S \text{ (fig. 10)}$$

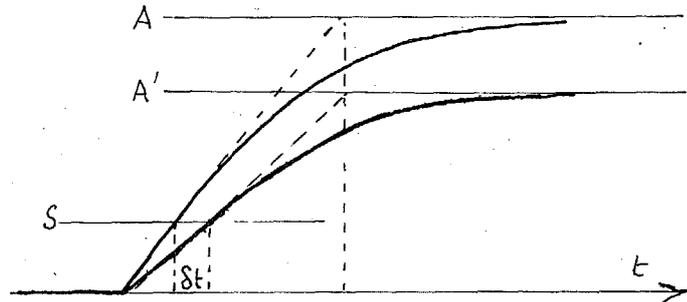


SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

soit :

$$-\frac{t}{T} = \log \left(1 - \frac{S}{A}\right)$$

$$\frac{t}{T} \sim \frac{S}{A} + \frac{1}{2} \left(\frac{S}{A}\right)^2$$



Si A varie de A en A' on aura :

$$\delta t = t' - t = T \left[ S \left( \frac{1}{A'} - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{2} S^2 \left( \frac{1}{A'^2} - \frac{1}{A^2} \right) \right]$$

et en posant  $A' = A(1 - \alpha)$  et après simplifications :

$$\delta t = T \left[ \frac{S}{A} \frac{\alpha}{1 - \alpha} + \frac{1}{2} \left( \frac{S}{A} \right)^2 \frac{\alpha(2 - \alpha)}{(1 - \alpha)^2} \right] \quad (27)$$

Du point de vue de la précision on a intérêt à prendre  $S/A$  le plus petit possible, mais une valeur trop faible de  $S/A$  conduirait à une probabilité de faux déclenchements trop élevée. Dans le système du Pélican on a adopté un dispositif CAG + seuil adapté à chacun des problèmes, répondeurs et hydrophones.

A titre d'exemple, en reprenant la valeur précédente de  $S/B > 34$  dB on trouverait pour un réglage  $\frac{S}{A} = \frac{1}{10}$  (seuil 20 dB sous le signal et 14 dB au dessus du bruit) et une fluctuation de signal  $\leq 3$  dB ( $\alpha = 0,3$ ) une fluctuation maximum  $\delta_{nt} = 24 \mu s$ . Le même calcul avec une fluctuation moyenne de 1,5 dB donnerait  $\delta_{nt} = 14 \mu s$ .

c) erreurs d'origine électronique

On peut estimer à  $\pm 5 \mu s$  les imprécisions d'origine électronique. La génération de signaux logiques s'effectue d'autre part de façon numérique par comptage à l'aide d'une horloge électronique à 250 kHz. La quantification de 4 en 4  $\mu s$  des instants d'arrivée conduit à un signal logique retardé de 0 à 4  $\mu s$  par rapport au signal réel. Ce retard a été pris en considération dans le calcul en faisant comme si l'arrivée était 2  $\mu s$  avant le signal logique, d'où une erreur de  $\pm 2 \mu s$  au maximum.

Au total les erreurs d'origine électronique à la réception sont donc inférieures à  $\pm 7 \mu s$ .

SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

Dans l'exemple précédent on voit que la valeur maximale de l'erreur  $\delta t_i$  est de  $10 + 24 + 7 = 41 \mu s$ , l'erreur quadratique moyenne n'étant que de  $15,5 \mu s$ .

Les erreurs  $\delta(t_i - t_j)$  sur les différences de temps d'arrivée sont uniquement dûes aux erreurs  $\delta t_i$  si le système de détection est le même pour tous les  $t_i$ , c'est à dire si les retards  $\Delta t_i$  (fig.7) sont les mêmes. Cette dernière condition a été réalisée avec soin et ceci justifie l'équation (21).

On verra plus loin que la minimisation des  $\delta t_r$  est plus difficile à réaliser que celle des  $t_i$ . Si l'on tolère  $\delta t_r = 15 \delta t_i$  on voit que :

$$\left| \frac{\delta \xi}{H} \right|_M \sim \frac{c}{2a} (2,5 \delta_M t_i) \tag{28}$$

$$\frac{\overline{\delta \xi}}{H} \sim \frac{c}{2a} (1,5 \overline{\delta t_i}) \tag{29}$$

Avec la valeur adoptée  $2a = 10 \text{ m}$  et les erreurs calculées plus haut l'application des formules (28) et (29) donne :

$$\left| \frac{\delta \xi}{H} \right|_M \sim 1,5 \%$$

$$\frac{\overline{\delta \xi}}{H} \sim 0,35 \%$$

La première valeur, correspond au minimum de rapport S/B admis et à des erreurs toutes maximales et toutes dans le même sens, est hautement improbable. Dans la pratique on a bien une écartométrie à mieux que 1% de la hauteur d'eau.

4. - REALISATION ET PERFORMANCES

4.1. - Problèmes généraux

Nous venons de voir que la précision requise pour l'écartométrie acoustique est très sévère mais peut être réalisée au prix de rapports signal/bruit élevés et de précautions particulières. L'ensemble de



SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

---

l'acoustique peut être généré par divers phénomènes :

a) les fluctuations du niveau des signaux. Celles-ci peuvent avoir plusieurs origines :

- \* variation du niveau d'émission si des phénomènes de cavitation se produisent par suite de la présence d'écrans de bulles d'air au voisinage du transducteur. Ces bulles proviennent essentiellement du sillage créé par les propulseurs et leur présence dépend des manoeuvres et courants,
- \* absorption sonore variable par suite de ces mêmes bulles ou d'autres interceptions (banes de poissons, boues en suspension en début de forage, etc).

b) les bruits

Ils sont essentiellement de trois sortes :

- \* bruits ambiants dans la mer. Aux fréquences utilisables (5 - 50 kHz), les bruits les plus élevés se produisent pour de très fortes précipitations ( $N_{is} = -20$  dB). Exceptionnellement, dans des régions très localisées on pourrait aussi avoir affaire à des bruits d'origine biologique (crevettes claqueuses),
- \* bruit des propulseurs du navire. Ces bruits sont très élevés et peuvent présenter des claquements de cavitation,
- \* bruits de forage. Essentiellement générés au niveau du fond ou du riser (claquement de tiges) ces bruits dépendent beaucoup du terrain rencontré et de la phase du forage. Ils sont particulièrement élevés dans les périodes de percement de bouchons de cimentages. Ils présentent souvent des caractéristiques impulsionnelles très nettes (pointes de bruit 20dB au dessus du niveau moyen).

c) le masquage des trajets et les réflexions

Les différents éléments constituant la tête de puits et empilés progressivement les uns sur les autres (BOP par exemple) portent la hauteur totale des constructions sur le fond à plus de 10 m avec un diamètre moyen de plusieurs mètres. D'autre part, le riser est un tube de 60 cm de diamètre longeant les trajets acoustiques et pouvant intercepter l'un d'entre eux.

Ces différentes difficultés obligent à effectuer ou bien un très grand nombre de mesures dont beaucoup seront entachées d'erreurs, ou bien des mesures moins fréquentes mais infiniment plus fiables. C'est cette dernière solution qui a été choisie grâce à la possibilité de traitement par ordinateur.



## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

La grande précision requise pour la mesure des instants d'arrivée du signal demande l'emploi de fréquences élevées. Cependant les fluctuations des signaux dues aux inhomogénéités, bulles d'air, etc... risquent d'être plus grandes à haute fréquence. On a vu que ces fluctuations constituaient la principale source d'erreur. C'est pourquoi on a choisi des fréquences intermédiaires compatibles également avec les niveaux de bruits attendus. Dans le sens navire - fond on a utilisé des fréquences plus basses car l'erreur permise sur la mesure de  $t_R$  est supérieure et il est plus facile d'installer un émetteur plus puissant et plus grand sur le navire que sur la plaque de base du forage.

La régularité des  $\Delta t_i$  et la simplification des problèmes de filtrage (bande passante suffisante) a conduit à utiliser une seule fréquence de réponse et à différencier les répondeurs par leur fréquence d'interrogation. De plus, par cette méthode un seul répondeur fonctionne à la fois, ce qui simplifie la gestion des informations.

On a adopté 25 kHz comme fréquence de réponse et 7 et 9 kHz comme fréquences d'interrogation.

### 4.2. - Principe de fonctionnement

Disposant de deux émetteurs d'interrogation, deux répondeurs et quatre hydrophones de réception on a réalisé le système de la façon suivante :

1°) à partir des données de positionnement  $x$  et  $y$ , du cap  $\varphi$  du navire, et de l'orientation du vecteur répondeurs (1), l'ordinateur détermine par calcul quels sont les couples émetteur - répondeur les mieux en vue directe. De cette façon les risques de masquage sont supprimés de façon certaine pour au moins un couple, et la plupart du temps pour les deux.

Cette détermination faite, l'ordinateur envoie au coffret pilote l'ordre d'interrogation par l'émetteur choisi à la fréquence correspondant au répondeur qui lui a été affecté. Les interrogations sont faites alternativement vers l'un et l'autre répondeurs à la cadence de deux/seconde par répondeur.

2°) Les signaux d'interrogation sont codés. En effet, les risques de faux déclenchements des répondeurs sont élevés par suite des caractéristiques du bruit près du forage (pointes très courtes de bruit). Les circuits de détection des répondeurs correspondent au schéma général donné en 3.4.1. à savoir que l'on y détecte

(1)  $\alpha$  est déterminé par la moyenne d'un très grand nombre de mesures effectuées avant de forer, donc en l'absence de riser.



## SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

l'arrivée du front d'ondes de la même manière, avec réglages appropriés, mais on dispose en plus d'un circuit de validation. Celui-ci détecte le codage réalisé sur la fin de l'impulsion d'interrogation et l'ordre de réponse n'est donné qu'après validation. C'est la raison du retard  $\tau$  introduit précédemment (paragraphe 3.3.2.)

Une fois la réponse envoyée le répondeur est bloqué durant une période de 400 ms (inférieure de à l'intervalle de 0,5 s entre 2 interrogations).

Cette dernière précaution permet d'éviter que le répondeur ne réponde à une interrogation ayant fait deux fois le trajet avec réflexions sur le fond et la surface de la mer. Cette éventualité risquait de se produire pour les faibles hauteurs d'eau dans le cas de rapports S/B élevés.

Le blocage du répondeur demande par contre une plus grande immunité aux faux déclenchements car alors la séquence normale de fonctionnement risque d'être rompue.

L'ensemble des précautions prises a permis d'annuler presque complètement la probabilité de faux déclenchement des répondeurs, au prix d'une imprécision accrue sur la mesure des  $t_R$  (réglages des seuils bien au dessus du bruit, filtrage plus étroit, etc). On a vu précédemment que cette imprécision était tolérable.

3°) Le signal retransmis par le répondeur est attendu sur les hydrophones dans une plage connue du domaine temps. Tout signal tombant en dehors est nécessairement faux. Pour réduire la probabilité de fausses mesures il y a naturellement intérêt à n'accepter les signaux qu'à l'intérieur d'une porte temps et à minimiser la durée d'ouverture de cette porte.

Le système est géré par un ordinateur qui réalise une porte temps adaptative, déterminée à chaque fois à partir de l'instant d'interrogation en tenant compte du groupement des réponses reçues dans la porte précédente et de l'évolution de la géométrie.

4°) De la même manière qu'au (1°), l'ordinateur détermine quels sont, parmi les quatre hydrophones de réception, les trois qui sont le mieux en vue du répondeur interrogé. Le calcul de la géométrie se fait en priorité à partir des mesures sur ces trois hydrophones.

5°) Une série de tests permet de valider les données d'écartométrie. L'absence de réponse est immédiatement détectée et signalée. Les valeurs d'écart x y impossibles d'après les positions précédentes du navire et son évolution permise sont rejetées.

6°) les valeurs d'écartométrie x y z obtenues après l'interrogation d'un répondeur sont mises en mémoire. et on en fait la moyenne avec les données de l'autre répondeur obtenues 0,25 s plus tard. On élimine ainsi les erreurs sur l,  $\alpha$  et  $\varphi$  (formule 12). Cependant, si l'une des données manque ou est aberrante, on utilise la donnée correcte pour l'asservissement. Au total, l'asservissement voit donc arriver des informations au rythme de 2/seconde, chacune provenant en principe de deux mesures.

Notons enfin qu'en plus des fonctions précitées l'ordinateur effectue également la gestion de la fonction "réentrée" d'outil. Pour ce faire des ordres d'interrogation à une troisième fréquence de 12 kHz sont entrelacés à des instants appropriés avec les interrogations d'ancrage. Un répondeur d'outil placé à proximité de son extrémité répond (toujours à 25 kHz) et donne l'ordre à un émetteur symétriquement opposé de répondre 20 ms après. Deux portes temps sont ouvertes pour les réceptions et on effectue la demi-somme des coordonnées, puis la différence de ces valeurs et des valeurs d'écartométrie. Cette méthode différentielle élimine les erreurs sur les angles R,T,  $\alpha$  et  $\varphi$ .

#### 4.3. - Performances

Les signaux acoustiques utilisés par le Pélican (7 et 9 kHz, 20 ms codé, 250 W ; 25 kHz, 2 ms, 25 W) et les circuits et réglages utilisés ont permis, après mise au point lors des essais, de s'affranchir des faux déclenchements des répondeurs et de n'avoir que quelques % de manques de réponse. A la réception sur les hydrophones, le rapport S/B a toujours été trouvé supérieur à 40 dB et les fluctuations observées sur la mesure des différences de temps de parcours de l'ordre de 10  $\mu$ s seulement.

La précision hors tout de l'écartométrie acoustique (y compris toutes les imperfections d'implantations et les erreurs sur les angles de roulis, tangage et cap) a été évaluée à 0,6 % de la profondeur d'eau.

L'écartométrie différentielle pour réentrée a permis d'obtenir la position de l'outil par rapport au trou de forage à 20/30 cm près environ par 120 m de fond.

Quant à l'ancrage proprement dit du Pélican, il a été réalisé avec succès durant la période du 4/9 au 4/11/72 en mer du Nord avec une période de plus de 1 mois en positionnement dynamique et en forage par vent ayant atteint 60 noeuds. D'autres opérations en Méditerranée avec réentrée ont été effectuées depuis. La figure 11 reproduit un enregistrement des mouvements du navire tels qu'ils ont été mesurés par l'écartométrie. L'enregistrement correspond à un positionnement par 120 m de fond avec un vent moyen de 20 noeuds, atteignant 30 noeuds par rafales.



SYSTEME D'ANCRAGE DYNAMIQUE DU PELICAN

