

QUATRIEME COLLOQUE SUR LE  
TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

---

SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

Noël CLAVELLOUX  
Ingénieur THOMSON-CSF  
Division des Activités Sous-Marines  
29283 BREST

---

**RESUME**

Après un rappel des limitations théoriques on calcule la précision de la mesure de la vitesse en fonction des paramètres du Sonar et des caractéristiques du milieu marin de propagation.

On montre que l'on peut mesurer des vitesses aussi faibles que 0,01 noeud (5 mm/s) ce qui est très intéressant pour les opérations d'accostage et que l'erreur de navigation par intégration de la vitesse est de quelques  $10^{-3}$  de la distance parcourue.

On donne les résultats d'essais en mer sur pétrolier de 270.000 tonnes Latona de la Shell International.

Enfin on montre, pour la navigation, l'intérêt des associations avec une centrale de navigation par inertie et un système de positionnement par satellite.

**SUMMARY**

After a brief survey of the theoretical limitations the author gives the accuracy of the speed measurements in terms of Sonar parameters. It is possible, with the Doppler Sonar to measure speed as low as 5 mm/s during the docking operation or during the dropping of anchor line.

The navigation can also be so accurate as a few  $10^{-3}$  of the travelled distance. So for this operation, it is very interesting, to use the Doppler Sonar with an inertial or satellite system.

We give the results obtained on the "Latona" of the Shell International Company.

## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

### I - INTRODUCTION

L'encombrement des routes maritimes, la course au gigantisme dans les transports pétroliers, les risques de pollution en cas d'accident, ont conduit à améliorer les moyens de navigation. Il en est de même dans le domaine militaire où l'existence de sous-marins à propulsion nucléaire, lanceurs d'Engins, nécessite de connaître avec précision la position de ce porteur dans des conditions de discrétion interdisant toute mesure hors de l'eau.

Jusqu'à ce jour la mesure de la vitesse des bateaux se faisait, par rapport à l'eau de la mer, grâce à des mesures de pression (tube de Pitot) ou électriques (loch électro-magnétique).

Ces systèmes présentent les inconvénients suivants :

- L'écoulement du fluide près de la coque du porteur est perturbé ce qui limite la précision de la mesure.
- Le seuil de mesure est élevé (0,5 noeud environ).
- La dérive due aux courants marins n'est pas mesurée.

.../...



## SONAR DOPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Le sonar Doppler, par contre, a les avantages suivants :

- Il mesure la vitesse par rapport au fond ; on a donc une mesure de la dérive.

- Le seuil de mesure est faible (5mm/s). Ceci permet l'accostage des gros pétroliers (tonnage supérieur à 200.000 tonnes). La sécurité de cette opération exige une vitesse voisine de 0,1 noeud soit 5 cm/s.

Enfin rappelons que la réglementation de certains ports pétroliers exige que les gros navires y pénètrent avec une vitesse ne dépassant pas 10 à 12 cm/s.

C'est en rendant la vitesse longitudinale par rapport au fond aussi faible que possible que l'opération de mouillage de la ligne d'ancres peut se faire sans danger de cassure.

Toutes ces raisons nous montrent le progrès que permettra l'utilisation du sonar Doppler sur les gros bateaux, pour les opérations devant se dérouler à faible vitesse. De plus la précision de la navigation peut être améliorée dans de grandes proportions.

Avant de calculer la précision qu'un tel appareil permet d'atteindre, nous allons montrer les contraintes qu'apporte le milieu marin.

.../...

## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

### II - RAPPELS DES PRINCIPES DE CONSTRUCTION D'UN SONAR

#### DOPPLER.

L'émission d'une onde acoustique (de pression) sinusoïdale de fréquence  $f_E$ , dont la direction de propagation fait l'angle  $\theta$  avec la verticale, est réfléchi (diffusion) par le fond. La mesure de cette fréquence ( $f_R$ ) fait apparaître une différence ( $f_E - f_R$ ) proportionnelle à la vitesse horizontale ( $V$ ) du porteur telle que :

$$f_E - f_R = f_E \frac{V}{c} \sin \theta \quad (1)$$

$f_E$  fréquence d'émission

$f_R$  fréquence de réception

$V$  vitesse horizontale du porteur dans le plan de mesure.

$\theta$  angle par rapport à la verticale.

$c$  vitesse de propagation de la vibration dans l'eau de mer.

Pour être insensible aux mouvements du porteur (roulis, tangage et pilonnement) on émet et reçoit dans deux directions symétriques par rapport à la verticale. (L'une donne un doppler haut, l'autre un doppler bas).



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Enfin pour mesurer la vitesse longitudinale, on place deux faisceaux dans un plan parallèle à l'axe du bateau. La mesure de la vitesse transversale se fait en plaçant deux faisceaux dans un plan perpendiculaire à l'axe du porteur.

### III - CONTRAINTES APORTEES PAR LE MILIEU MARIN

Les contraintes imposées par le milieu sont les suivantes :

- variations de la vitesse de propagation à cause des différences de température et de salinité entre la coque du bateau et le fond.

- absorption ou réflexion de l'énergie rayonnée par les hétérogénéités en suspension dans l'eau ou par les éléments biologiques vivants.

- bruit ambiant dans lequel il faut mesurer le signal réfléchi.

Enfin le fond se comporte de façon différente selon :

- la nature physique (vase, sable, roche).
- la fréquence d'insonification.
- le relief.

.../...



III.1. Variation de la célérité.

La vitesse de propagation de la vibration acoustique est fonction de la température et de la salinité. Ces variations sont importantes et peuvent rendre la mesure imprécise. Les ordres de grandeur sont les suivants :

+3,2 m/s pour une augmentation de température de 1° C.

+1,1 m/s pour une augmentation de salinité de 1‰.

Ainsi une variation de 10 degrés entraîne une variation de célérité de 32 m/s, soit environ 2 % d'erreur sur la mesure de la vitesse. De même le passage eau douce-eau de mer entraîne une erreur d'environ 3 %.

La mesure de la vitesse tient compte de la célérité au voisinage des transducteurs Emission-Réception. Une mesure précise doit prendre en compte les variations de ce paramètre ou, comme dans le cas de la réalisation Thomson-CSF, rendre la mesure indépendante par ajustement automatique de  $\theta$  de sorte que la quantité  $\frac{\sin\theta}{c}$  reste constante.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

### III.2. Absorption de l'énergie sonore.

L'absorption en eau de mer est fonction de la fréquence utilisée. Dans la gamme utilisée pour les sonars Dopplers (50KHz à 1000KHz) cette absorption est surtout due au phénomène de dissociation et de réassociation ionique du sulfate de magnésium. D'autre part ce phénomène varie avec la température, de sorte que à 0° C l'absorption d'une onde sonore à 70 KHz est équivalente à celle d'une onde à 200 KHz à 30°C.

L'absorption, à température constante, augmente lorsque la fréquence croît et limite la portée des systèmes.

Le tableau ci-contre donne les valeurs du coefficient d'atténuation en fonction de la fréquence pour une température comprise entre 0 et 30° C.

F KHz	a en dB/km
100	25 - 35
200	55 - 70
300	70 - 120
500	140 - 160

### III.3. Influence des turbulences - zone aérée - couche diffusante.

Les transducteurs étant placés sur le bateau et celui-ci étant en mouvement dans le fluide, il peut exister au voisinage du transducteur des zones de turbulences gênantes à cause des bulles d'air\* qu'elles contiennent.

.../...

## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

En effet l'air et l'eau ont des impédances acoustiques très différentes de sorte qu'une lame d'air au milieu d'eau ne transmet qu'une partie de l'onde sonore

Il en est de même pour les discontinuités biologiques. On rencontre en effet dans toutes les mers du monde une couche diffusante profonde (deep scattering layer) située entre 200 et 400 m d'immersion. Cette couche dont l'immersion varie avec l'heure, chaque jour, diffuse l'énergie et peut souvent être confondue avec le fond et donc introduire des erreurs de mesure et limiter la portée d'un sonar Doppler.

\* Dans les opérations d'accostage ces turbulences peuvent provenir de la masse d'eau mise en mouvement par les hélices des remorqueurs poussant ou tirant le pétrolier.

### III.4. Réverbération de fond.

L'énergie acoustique diffusée par le fond dans la direction du récepteur est fonction :

- de l'angle d'incidence.
- de la nature du fond.
- de la fréquence utilisée.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Plus l'angle d'incidence est faible, c'est-à-dire plus la direction d'émission s'écarte de la verticale, plus l'énergie renvoyée par le fond diminue. D'autre part pour que la courbure des rayons sonores, à cause des variations de célérité, reste faible il ne faut pas trop s'écarter de la verticale. Ces deux raisons font que l'angle de la direction d'émission par rapport à la verticale est choisi voisin de 30 degrés.

La nature du fond (roche, sable, gravier, vase) influence beaucoup le niveau diffusé. Les mesures "in situ" montrent un rapport 1000 (30 dB) entre le niveau reçu à incidence et distance constantes par diffusion sur de la roche et de la vase.

A titre d'exemple, on peut considérer que les ordres de grandeur suivants sont valables (en prenant comme référence la roche) :

roche	1	
gravier	1	
sable grossier	0,03	(-15 dB)
sable fin	0,01	(-20 dB)
vase	0,001	(-30 dB)

Ceci montre qu'à niveau de puissance d'émission donné la portée peut varier dans un rapport important.

La fréquence utilisée agit sur le coefficient de réflexion du fond. Celui-ci varie environ comme le carré de la fréquence.

.../...

SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGEIII.5. Propriétés statistiques de la réverbération de fond.

Pour un fond donné on constate que la variance du signal reçu est importante. Il y a deux raisons à cela :

- La première est due au fait que le fond rayonne l'énergie reçu avec des propriétés de directivité spatiale (avec des directions de rayonnement maximal et des directions de rayonnement minimal). Du fait des mouvements du porteur, l'antenne de réception balaye l'espace et reçoit donc des signaux d'amplitude différente.

- La seconde provient de ce que l'aire réverbérante du fond comporte un nombre de points brillants  $n$  fonction de l'ouverture du faisceau émission, de la durée d'émission et du relief (au sens granulométrie)

Avec certaines hypothèses simplificatrices on trouve que la densité de probabilité du module du signal total réverbéré est :

$$P(x) = \frac{2x}{n} e^{-\frac{x^2}{n}} \quad (2)$$

où

$x$  est le module du signal réverbéré.

$n$  le nombre de points brillants.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

La formule (2) est la loi de Rayleigh dont les grandeurs caractéristiques sont :

- Valeur moyenne  $\bar{x} = \frac{\sqrt{n\pi}}{2}$
- Valeur quadratique moyenne  $\bar{x}^2 = n$
- Variance  $s = n \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$

Elle montre également que la probabilité que le signal reçu soit 10 fois moins puissant que la valeur moyenne est de 25 pour cent. Cette probabilité est encore de 2,5 pour cent pour que le signal soit 100 fois moins puissant que la valeur moyenne.

### III.6. Bruit de la mer.

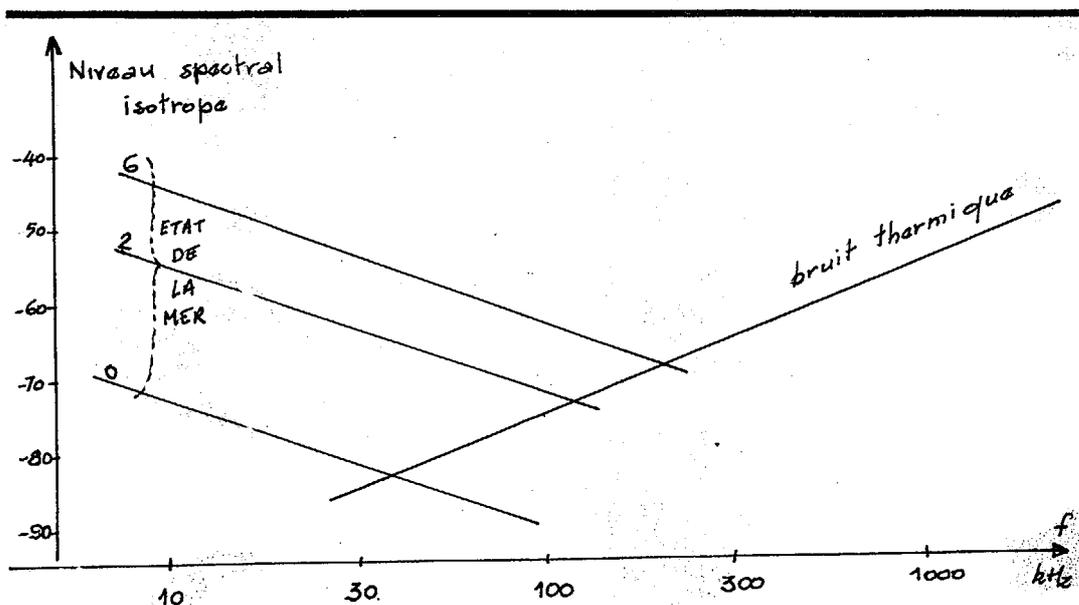
La mer étant un milieu en mouvement où existe la vie, est génératrice de bruits qui peuvent masquer les faibles signaux et perturber leur mesure.

Le niveau de bruit de mer est fonction, aux fréquences inférieures à 100 kHz, de l'état de celle-ci et son niveau varie donc avec la force du vent et les précipitations. Ce bruit a un niveau spectral isotrope qui décroît avec la fréquence. (Voir fig. 1).

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE



Pour les fréquences élevées le bruit de mer est celui de l'agitation moléculaire (bruit thermique).

Le choix optimal de la fréquence, en terme de bruit, est celui qui conduit à avoir le niveau spectral le plus faible donc pour les fréquences voisines de 300 kHz.

Ceci est d'autant plus vrai qu'il faut tenir compte du bruit propre du porteur.

### IV - LA MESURE DE LA VITESSE.

Après avoir examiné les contraintes apportées par le milieu de propagation, nous dresserons l'inventaire dans ce paragraphe des erreurs commises dans la mesure de la vitesse.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Comme il s'agit de mesurer la fréquence d'un signal en présence de bruit (voir paragraphe précédent), les causes d'erreur sont les suivantes :

- largeur du spectre rayonné.
- mesure de fréquence en présence de bruit.

D'autre part la formule (1) qui permet de calculer la vitesse nous montre qu'une autre cause d'erreur est l'imprécision sur  $\theta$  qui a pour cause :

- l'ouverture des faisceaux émission et réception.
- les mouvements du porteur (roulis et tangage).

### IV.1. Erreur due au spectre de fréquence.

Dans le cas d'un sonar à impulsion de durée  $T$  le spectre émis est de la forme :

$$S(f) = \frac{\sin \pi T (f - f_0)}{\pi (f - f_0)} \quad (2)$$

où  $f$  est la fréquence.

$f_0$  la fréquence émission.

$T$  la durée d'émission.

Avec l'hypothèse d'une densité de probabilité de mesure proportionnelle à la densité spectrale d'énergie transmise, on montre que l'écart quadratique moyen sur la mesure de fréquence est :

$$\Delta f = \frac{1}{4T}$$

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Cette erreur entraîne une erreur absolue sur la mesure de la vitesse et une erreur de position qui croît linéairement avec le temps.

### IV.2. Erreur due à la présence de bruit.

La mesure de la fréquence d'un signal en présence d'un bruit à caractéristique gaussienne se fait avec une erreur dont l'écart type est :

$$\Delta f = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \times \frac{1}{T} \times \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (4)$$

où  $T$  est la durée de la mesure.

$R$  le rapport signal à bruit en puissance.

Pour  $R = 4$  (6 dB)  $\Delta f$  est voisine de  $\frac{1}{4T}$  donc de même ordre de grandeur que l'erreur du paragraphe précédent.

Elle représente une erreur absolue sur la vitesse.

### IV.3. Incertitude due à l'ouverture des faisceaux acoustiques.

La formule (1) montre que le décalage Doppler est fonction de la direction d'émission et de réception par rapport à la verticale.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

L'ouverture des lobes introduit donc un spectre Doppler, autour de la fréquence centrale, d'autant plus large que l'ouverture des faisceaux est plus grande.

Les calculs donnent l'écart type moyen relatif tel que :

$$\frac{\Delta f}{f_d} = \sqrt{2} \frac{\sin \frac{2\alpha_3}{5}}{\text{tg}\theta} \quad (5)$$

où  $2\alpha_3$  est l'ouverture à -3dB d'un faisceau Emission ou réception.

$\theta$  l'angle par rapport à la verticale

C'est une erreur relative sur la mesure de la vitesse qui entraîne une erreur relative sur la distance parcourue.

Pour  $2\alpha_3 = 2$  degrés et  $\theta = 30$  degrés, l'écart type relatif est de l'ordre de  $1,6 \cdot 10^{-2}$ . Etant donné le nombre important de mesures effectuées avant affichage de la vitesse, cette erreur est ramenée à quelques  $10^{-3}$ . Dans le cas de calcul du point, le lissage dû au long temps d'intégration réduit de façon très importante cette erreur.

SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGEIV.4. Influence des mouvements du porteur.

A cause des mouvements du porteur en roulis et tangage la direction est variable autour de la verticale. Pour que l'erreur entraînée ne soit pas prohibitive la mesure suivant un axe se fait suivant deux directions symétriques écartées chacune de  $\theta$  par rapport à la verticale en l'absence de mouvement.

Une rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de ces deux directions entraîne l'augmentation d'un angle et la diminution de l'autre, de telle sorte qu'il y a compensation si l'on ajoute les "dopplers" de chaque direction.

L'écart de fréquence ainsi mesuré est :

$$f_d = 4 \frac{V}{c} f_0 \sin\theta \cos\gamma \quad (6)$$

où  $f_d$  = écart de fréquence dû au doppler

$V$  = vitesse du porteur.

$c$  = célérité dans l'eau de mer.

$\theta$  = angle de chaque direction avec la verticale.

$\gamma$  = angle de rotation.

Un angle de rotation de 8 degrés n'entraîne alors qu'une erreur relative sur la vitesse de  $10^{-2}$



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

### V - BILAN DES ERREURS - APPLICATIONS A L'ACCOSTAGE ET A LA NAVIGATION.

#### V.1. Accostage.

Dans le cas de l'accostage les seules erreurs qui soient à prendre en considération sont les erreurs absolues. En effet les vitesses mises en jeu sont faibles, par contre le seuil de mesure doit être aussi petit que possible.

Pour diminuer l'erreur provenant de la durée d'impulsion on émet une impulsion longue ou on travaille en émission continue.

D'autre part l'information de vitesse ne sera délivrée à l'opérateur qu'après un temps d'intégration (1,5s dans le cas du Sonar TH-CSF) assez long mais compatible avec le spectre des mouvements du bateau durant cette opération.

Enfin les opérations d'accostage se font en général par petits fonds ce qui permet :

- de faire la mesure avec un rapport signal à bruit très élevé  $R > 10^4$  (40 dB).
- de faire un grand nombre de mesures.

.../...

## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Avec  $R = 10^4$  et 16 mesures on trouve un écart quadratique moyen de 1,4 Hz. Ceci correspond, dans le cas du sonar Doppler THOMSON-CSF qui a une sensibilité de 100 Hz par noeud, à une vitesse de  $1,4 \cdot 10^{-2}$  noeud soit environ 7 mm/s.

Ce seuil est réellement très faible et permet une grande sécurité dans les opérations d'accostage où, grâce au sonar Doppler, le pilote connaît la vitesse longitudinale mais aussi les vitesses transversales avant et arrière.

### V.2. Mouillage de la ligne d'ancrage.

On sait combien cette opération est délicate avec les gros pétroliers \* lorsque sur la zone de mouillage existent des courants marins voisins de 1 ou plusieurs noeuds. Dans ce cas, pour opérer avec le maximum de sécurité, le Commandant annule la vitesse longitudinale par rapport au fond. Ce qui est très aisé grâce à l'utilisation du Sonar Doppler.

### V.3. Navigation.

On se place dans l'hypothèse d'une navigation sur fond à distance maximale (150 m pour le sonar doppler Thomson-CSF, avec un rapport signal sur bruit de 20 dB quelle que soit la nature du fond), et à vitesse maximale (16 noeuds).

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

- \* La perte d'une ligne de mouillage outre le prix de celle-ci représente pour le pétrolier une perte de temps importante.

Nous calculons l'erreur de position (à cap constant et supposé connu sans erreur). Elle se compose :

- d'une erreur longitudinale sur l'intégration des incréments de position.
- d'une erreur transversale due au seuil de mesure de vitesse transversale supposée nulle.

Le calcul de l'erreur longitudinale montre que le terme important provient des mouvements du porteur car cette erreur (à cause du terme en  $\cos \gamma$  de la formule 6), a toujours le même sens et tend à donner une vitesse trop faible.

Pour un mouvement de tangage limité à plus ou moins 6 degrés, cette erreur est de  $2 \cdot 10^{-3}$  de la distance parcourue.

L'erreur transversale provient du seuil de mesure qui dans le cas de navigation sur fond de 150 m a un écart type d'environ 0,1 noeud. En fait cette erreur a autant de chance d'être par excès que par défaut, ce qui signifie que pour un temps d'intégration long (100 mesures soit 150 secondes) elle a une valeur moyenne nulle et un écart type de 0,01 noeud, ce qui est négligeable.

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

En fait, l'erreur transversale de navigation, à grande vitesse provient plus de l'erreur d'orientation des transducteurs lors de la pose à bord. Heureusement celle-ci peut être mesurée lors des essais à la mer et il peut en être tenu compte dans le calcul du point.

En ce qui concerne les applications du sonar Doppler à la navigation soulignons pour terminer les avantages qu'il procure en étant associé :

- à un système de navigation inertiel.
- au calcul du point par système de navigation par satellite Transit.

Dans le cas du couplage avec un système inertiel, le sonar Doppler grâce aux informations précises de vitesse qu'il procure permet :

- de permettre l'amortissement des oscillations du système inertiel en un temps court en diminuant la période propre du système.
- de compenser la dérive des gyroscopes de verticale et d'azimut, et donc de réduire aux erreurs Doppler les erreurs de dérive à long terme de la centrale inertielle. (Celle-ci a l'avantage d'être précise à court terme quelles que soient les évolutions du porteur)

.../...



## SONAR DOPPLER DE NAVIGATION ET D'ACCOSTAGE

---

Dans le cas d'utilisation du sonar doppler avec un système de calcul du point par Transit l'avantage est double car il permet :

- de calculer de façon précise le point entre deux passages satellites.
- à ce système de faire une mesure plus précise grâce à la connaissance exacte de sa vitesse fond.

### VI - CONCLUSIONS

La sécurité des opérations d'accostage ou de mouillage des lignes d'ancrage des gros navires dépend de la vitesse par rapport au fond qu'ont ceux-ci lors de ces manoeuvres. Seul le sonar doppler permet de mesurer jusqu'à des valeurs aussi faibles que 0,01 noeud (5 mm/s) \* la vitesse par rapport au fond qu'elle soit longitudinale ou transversale.

L'utilisation d'un sonar doppler permet également d'améliorer la navigation en haute mer. Grâce à la précision de la mesure de la vitesse sur le fond, l'erreur sur le calcul du point n'est pas supérieure à quelques  $10^{-3}$  de la distance parcourue \*.

Enfin l'utilisation combinée du sonar doppler, soit avec un système de navigation inertiel, soit avec un système de calcul du point au passage d'un satellite permet une précision globale de navigation bien meilleure.

\* Résultats obtenus avec les sonars TSM 5710 et TSM 5700 de Thomson-CSF montés sur pétroliers de plus de 250 000 tonnes.