



COURANTOMETRIE EULERIENNE ET LAGRANGIENNE PAR RADAR VHF

N. BAGHDADI, P. BROCHE et J. GAGGELLI

Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre, (LSEET)
UA CNRS 705, Université de Toulon et du Var, BP 132, 83957 La Garde Cedex, France.

Abstract

A VHF radar has been used to locate a drifting transponder for measuring the lagrangian circulation in the coastal zones. It is expected that simultaneous use of several drifters will give an insight into small scale dispersion and diffusion phenomena. The paper describes the radar and transponder system, and outlines the methods used to recover the position of the transponder. The results of an experiment performed during a few days on the Mediterranean coast (La Londe-Les Maures, France) are presented. The power budget confirms that the operational range is within 20 km by moderate sea-states. The estimate of the position of the transponder has been compared to that supplied by GPS system. Both data agree within less than 100 m for 85% of the cases.

1. INTRODUCTION

Il y a maintenant une vingtaine d'année qu'a été mise en évidence la possibilité physique de mesurer les courants superficiels en utilisant des radars (Stewart et Joy, 1974). C'est l'équipe dirigée par D. Barrick, qui a la première réalisé l'instrument opérationnel pour ces mesures (Barrick *et al.*, 1977).

Le LSEET a développé progressivement des radars HF (1977), destinés principalement à l'étude des vagues, puis des radars VHF (1985) pour la mesure des courants superficiels en zone côtière. Les mesures réalisées sont de type eulérien, et elles portent sur le courant intégré sur une profondeur de 25 cm, sur une surface de quelques centaines de mètres de côté, et sur un temps de une à quelques minutes. La précision de la mesure est de quelques cm/s. Les radars sont installés sur la côte et la portée est de l'ordre de 30 km. Un des intérêts de ces instruments est leur couverture spatiale, qui leur permet de fournir des cartes de courant. Il faut noter que deux radars sont nécessaires sur un site donné pour obtenir un vecteur courant, chaque radar ne mesurant qu'une composante radiale dans sa direction de tir. La figure 1 présente à titre d'exemple des mesures effectuées sur le panache du Rhône au cours de l'expérience EROS 2000 au printemps 1991 (Dévenon *et al.*, 1991).

Nous avons cherché à utiliser le même instrument pour effectuer une trajectographie de flotteurs dérivants de surface, équipés de balises fournissant un écho radar calibré. Il s'agit donc de transformer le radar de "télé-détection" en un radar de "poursuite". Un tel système aura l'intérêt de fournir des mesures lagrangiennes, et l'utilisation simultanée de plusieurs flotteurs permettra d'estimer l'importance des phénomènes de dispersion et de diffusion. On pense ainsi obtenir un instrument particulièrement complet de diagnostic dynamique en zone côtière, présentant un grand intérêt pour l'étude d'un rejet ou le transport d'un contaminant.

La communication présente d'abord le système (le radar et la balise), les méthodes utilisées pour la localisation, puis les résultats d'une campagne expérimentale réalisée au printemps 1993 qui a permis de valider le système, en comparant les positions estimées avec celles fournies par le système de navigation GPS.

2. LE SYSTEME RADAR

2.1. Le radar

Il s'agit d'un radar VHF à la fréquence 47,8 MHz (longueur d'onde $\lambda_r = 6.37\text{m}$, nombre d'onde $k_r \approx 1\text{m}^{-1}$), émettant des ondes sous forme d'impulsions successives, de durée brève (de 1 à 4 μs , résolution en distance: de 150 à 600 m), avec une période de répétition T, de l'ordre de 200 μs (portée maximum de 30 km). Le taux d'occupation est faible (0,5 à 2 %, soit une puissance moyenne transmise de 8 W pour une puissance émise dans l'impulsion de 1,6 kW). La propagation se fait par onde de surface.

Le réseau d'émission est formé de quatre antennes fouets verticales, équidistantes, alignées sur 7,2 m et polarisées verticalement. Il doit couvrir avec le maximum d'énergie une zone large (l'ouverture à - 3 dB du lobe principal est égale à 90°).

La réception est assurée par un réseau de huit antennes espacées de l'ordre de $\lambda_r/2$, dont la longueur totale permet d'obtenir une ouverture angulaire du lobe principal (à - 3 dB) d'une dizaine de degrés (fig. 2). Un multiplexage séquentiel permet de traiter séparément les signaux reçus par chacune des antennes. Le radar peut alors être pointé dans une direction quelconque par une procédure numérique de formation de faisceau.

Les étapes principales du traitement du signal pour chaque antenne sont les suivantes :

- échantillonnage : à la sortie du récepteur, le signal est échantillonné par une série de portes équidistantes de positions ajustables.

- intégration cohérente, consistant à sommer pour chaque porte les échantillons correspondant à plusieurs impulsions successives. La fréquence d'échantillonnage est ainsi abaissée à la valeur nécessaire de quelques Hz.
- transformée de Fourier rapide (~ 1) sur N échantillons consécutifs.
- enregistrement des données.

Pour les mesures eulériennes, le faisceau est pointé dans des directions contiguës et, pour chaque "cellule" de mer définie par un azimuth et une distance, on calcule le spectre de puissance de l'écho, dont l'analyse fournit la composante radiale du courant dans cette cellule.

2.2. La balise

La balise réémet l'onde radar qu'elle reçoit, en la décalant légèrement en fréquence et en temps : le décalage

Fig. 1 : Exemple de résultats de mesures eulériennes de courant sur le panache du Rhône. Les valeurs représentées sont celles de la composante radiale du courant le long de l'axe de visée du radar. Elles sont comptées positivement pour une vitesse portant vers le radar

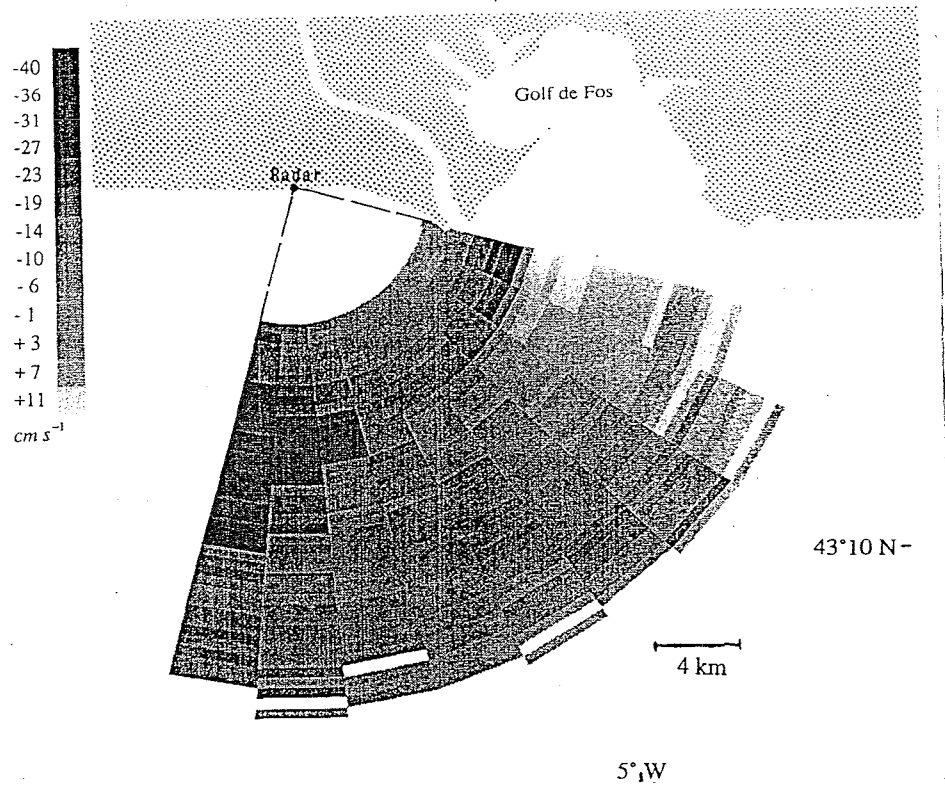
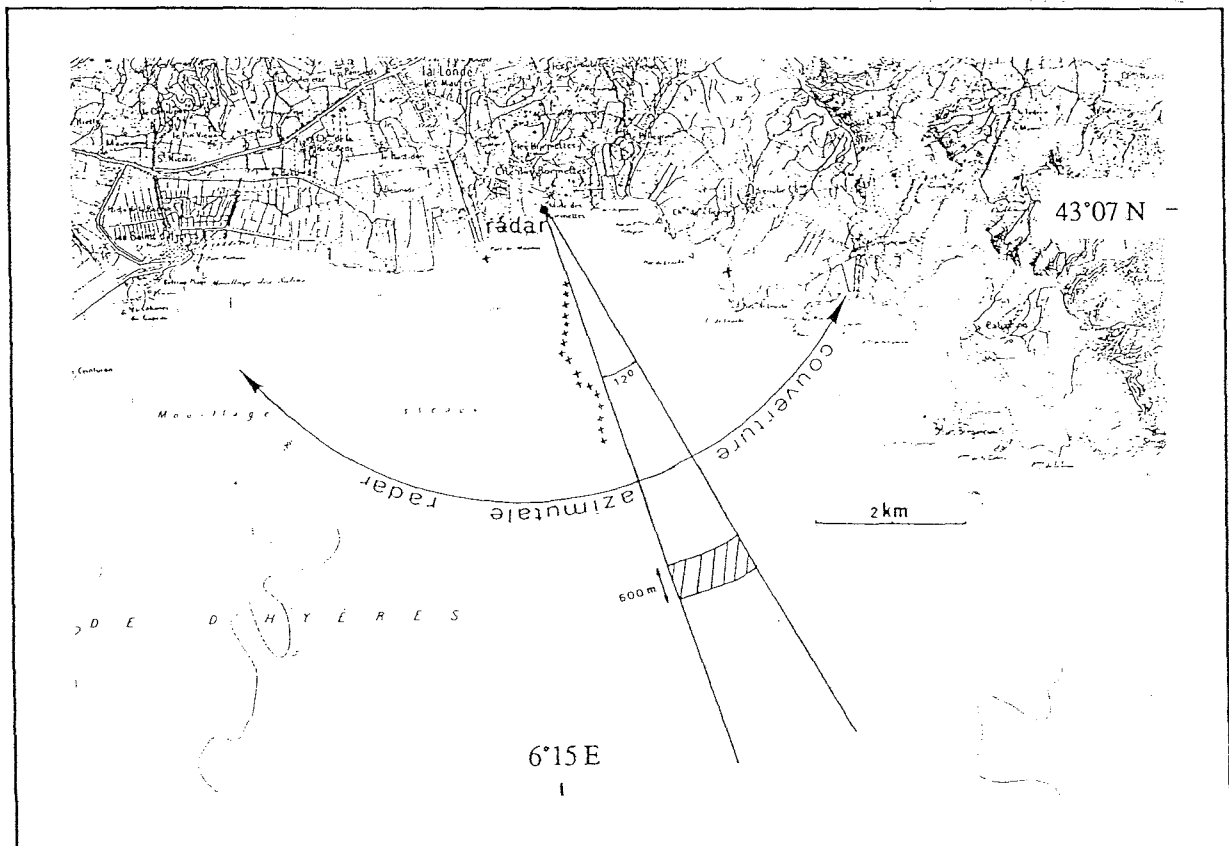


Fig. 2 : Site de l'expérience décrite dans le texte. Une "cellule" de mesure eulérienne correspondant à une durée d'impulsion de $4 \mu\text{s}$ est représentée (en grisé), ainsi qu'un exemple de trajectoire du bateau utilisée pour la validation des localisations (croix)



en fréquence sert à éviter le chevauchement de l'écho de la balise avec l'écho de mer, le décalage temporel est imposé par l'utilisation d'une même antenne à l'émission et à la réception. Ses principaux constituants sont :

- un commutateur électronique permettant d'aiguiller vers le récepteur l'impulsion reçue et vers l'antenne l'impulsion émise en isolant le plus parfaitement possible l'étage de détection.

- un étage de détection, filtrage et amplification,
- une ligne à retard décalant l'impulsion reçue d'un temps au moins égal à sa largeur,

- un étage générateur basse fréquence, programmable, modulant en amplitude l'émission et assurant le décalage en fréquence,

- une horloge programmable commandant (à la minute près) l'heure et la durée de fonctionnement de la balise, à la fois pour économiser l'énergie nécessaire au fonctionnement du système, donc augmenter son autonomie, et pour permettre un multiplexage temporel très simple autorisant le suivi quasi-simultané de plusieurs balises : la balise 1 répondant par exemple de H à H + 2 minutes, la balise 2 de H + 3 minutes à H + 5 minutes, etc...

L'ensemble, y compris la batterie d'alimentation, occupe un volume de l'ordre de 2 litres, pour un poids inférieur à 2 kg. Après une première étude théorique, le seuil de déclenchement de la balise avait été fixé à 10 nW et la puissance émise à 4 mW.

2.3. Méthode de localisation

Le problème consiste à détecter l'écho de la balise au milieu du bruit et en particulier de l'écho de mer et à en estimer les paramètres suivants : distance radiale par rapport au radar (\hat{a}), azimut par rapport à la direction normale à celle du réseau, ($\hat{\theta}$) et fréquence Doppler (\hat{f}^D) (somme des décalages introduits par la modulation d'amplitude par l'effet de la dérive de la balise).

Si une cible "localisée" (comme la balise, ou bien un bateau métallique, par opposition à la cible "répartie" que constitue la surface de la mer) est située à la distance \hat{a} , dans l'azimut $\hat{\theta}$ et provoque un décalage Doppler \hat{f}^D , les signaux qu'elle induit sur les différentes antennes ont, en l'absence de bruit, la même amplitude et des phases en progression arithmétique de raison $\hat{\phi} = k_r d \sin \hat{\theta}$. La quantité :

$$Q(\hat{\phi}, d, f_D) = \sum_{i=1}^7 \left| \bar{s}_{i+1}(d, f_D) - \bar{s}_i(d, f_D) e^{-j\hat{\phi}} \right|^2$$

où \bar{s}_i est la FFT du signal reçu par l'antenne (i) de la distance d et à la fréquence f_D , présente donc une valeur nulle pour $\hat{\phi} = \hat{\phi}$, $d = \hat{a}$, $f_D = \hat{f}^D$. En présence de bruit, on montre que Q présente, pour ce choix des paramètres, un minimum inversement proportionnel au rapport signal à bruit.

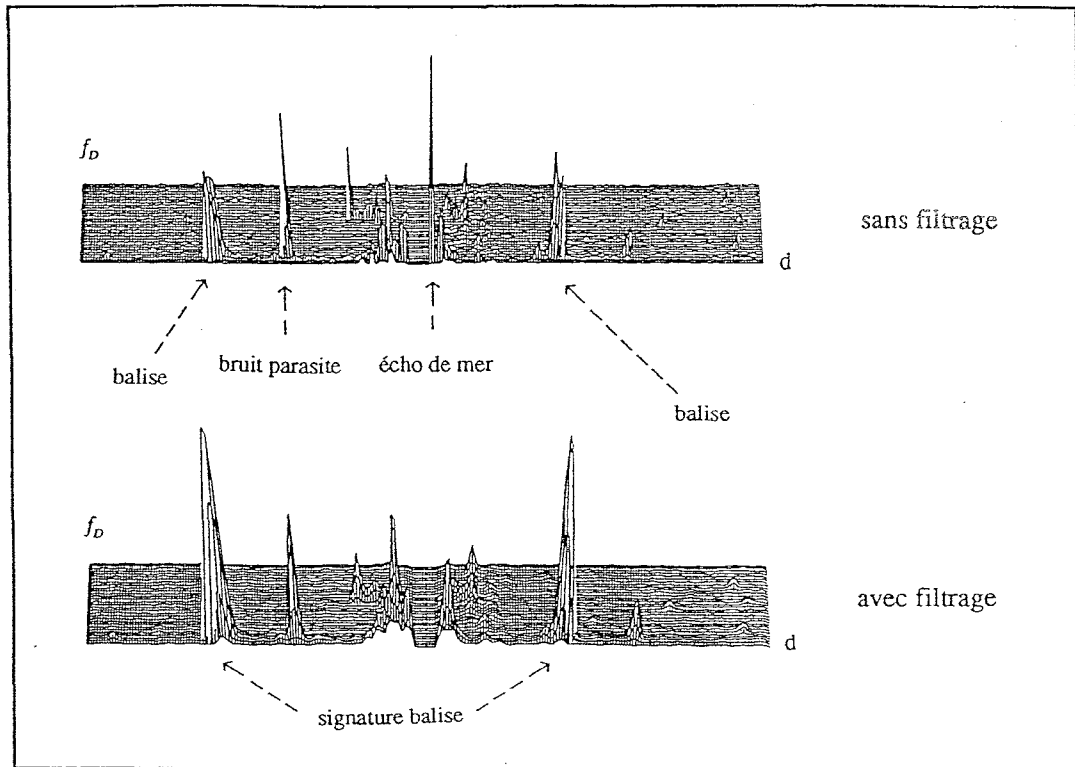


Fig. 3 : Représentation de la fonction T avec et sans filtrage. On remarquera que le filtrage réduit tous les échos parasites et fiabilise considérablement la détection de la balise

Fig. 4 : Bilan de puissance (1) : puissances reçues par la balise en fonction de la distance.
 Courbe théorique et valeurs expérimentales

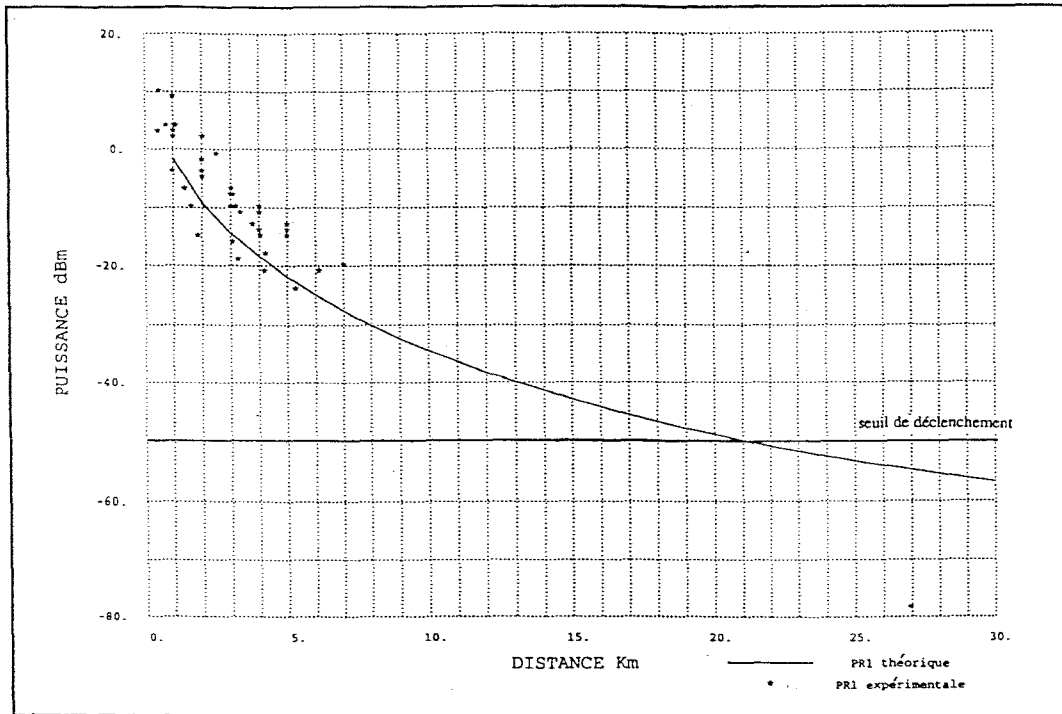
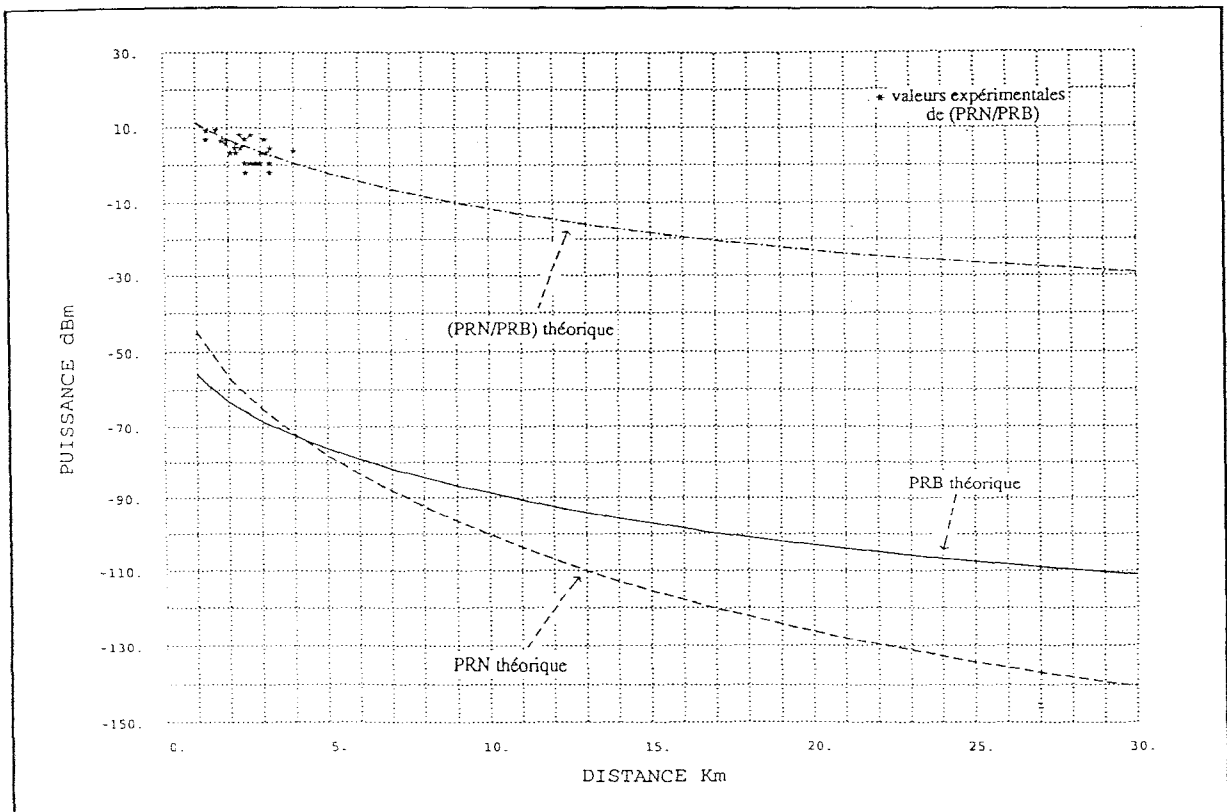


Fig. 5 : Bilan de puissance (2) : puissances reçues par le radar de la balise (PRB) et de l'écho de mer (PRN).
 Courbes théoriques et points expérimentaux



Cette propriété fournit à la fois la méthode pour détecter et pour localiser la balise : pour chaque couple disponible (d, f_D) on minimise par rapport à ϕ la quantité Q (pour des raisons pratiques, on calcule le minimum par rapport à $\cos \phi$ et $\sin \phi$ sous la contrainte $\cos^2 \phi + \sin^2 \phi - 1 = 0$ en utilisant un multiplicateur de Lagrange) et on étudie les variations en fonction de d et f_D de l'inverse du minimum obtenu, $T=1/Q_m$

- la présence d'un maximum pour T permet de détecter l'écho d'une cible localisée, et en fournit la distance et la fréquence Doppler.

- la valeur de ϕ associée à Q_m fournit la valeur de l'azimut.

L'influence du bruit peut contrarier la première étape de cette démarche. Pour l'éliminer au mieux, on procède à un filtrage de "l'image" $T(d, f_D)$, sous forme d'une corrélation de cette image avec une réplique de la réponse d'une cible ponctuelle. La position du pic de corrélation coïncide avec la position de la balise (fig. 3).

Notons enfin que la précision que l'on peut attendre de la mesure de la vitesse est meilleure que 10 cm/s. On peut alors utiliser les mesures de vitesse (radiale) pour améliorer l'estimation de la distance d par une méthode de moindres carrés ou un algorithme récursif de Kalman.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Le site

La campagne expérimentale s'est déroulée pendant quelques jours au printemps 1993 à la Londe (Var) (fig. 2). Pour une partie de ces essais, la balise était placée sur la côte, pour une autre partie, elle était placée à bord d'un bateau qui a évolué à faible vitesse près de la côte. La position de la balise était localisée par le système GPS, réseau de navigation par satellite à couverture mondiale. C'est un système militaire dont la précision publique peut être artificiellement dégradée. Au moment de l'expérience, la précision sur la position était de l'ordre de 50 m.

On a utilisé des impulsions de 1 μ s, avec un décalage Doppler de 3 Hz. Les FFT ont été calculées sur 256 points dans la gamme (-6 Hz, +6 Hz), avec un temps d'acquisition de l'ordre de 21 secondes. Les localisations ont été effectuées en temps différé. Il est prévu d'implanter ultérieurement les algorithmes pour un fonctionnement en temps réel.

3.2. Bilan de puissance du système

Un bilan de puissance a été effectué pour vérifier le dimensionnement de la balise. Il a porté sur deux éléments :

- la puissance reçue par la balise, PR1. La figure 4 donne les valeurs mesurées dans la gamme de distance explorée, ainsi qu'une courbe théorique basée sur les caractéristiques du radar et sur les propriétés d'atténuation de l'onde de surface sur la mer. Il existe un biais de 2.5 dB, explicable par les nombreuses imprécisions que l'on rencontre dans l'évaluation théorique de certains éléments du bilan, notamment les gains d'antenne pour un fonctionnement en onde de surface mais le comportement qualitatif des données est conforme aux prévisions. En extrapolant les données conformément à

la courbe théorique, on voit que le seuil de déclenchement (10 nW) est satisfait jusqu'à environ 20 km,

- la puissance reçue de la balise "PRB", comparée à la puissance de l'écho de mer "PRN" (fig. 5). Conformément aux prévisions théoriques, ce rapport varie pratiquement proportionnellement à la distance. La réception de l'écho de mer étant possible, avec les mêmes paramètres de fonctionnement, jusqu'à environ 15 km, il en résulte que l'écho de la balise devrait pouvoir être reçu jusqu'à une distance supérieure à 20 km.

On peut faire deux remarques complémentaires :

- d'une part, il est bien connu qu'aux fréquences utilisées, l'atténuation de l'onde de surface croît avec l'état de la mer (Barrick, 1971) : les performances citées ci-dessus se réfèrent à une mer de force 2 (vent de 10 m/s), et la portée serait inférieure pour des mers plus fortes,

- d'autre part, les caractéristiques (sensibilité en réception et puissance émise) pourraient être sensiblement améliorées au prix d'un accroissement de la complexité et du poids de la balise. Le choix a été délibérément fait en faveur d'un système de faible coût, de façon à pouvoir utiliser simultanément, et malgré les risques de pertes, un nombre de balises suffisant pour fournir des informations sur la diffusion.

3.3. Localisation de la balise

109 acquisitions portant la signature de la balise ont été effectuées. La méthode exposée ci-dessus a permis une exploitation de la totalité de ces 109 fichiers qui ont tous fourni une localisation convenable de la balise. Sans le filtrage, un quart des estimations sont erronées (détection d'un pic parasite, fig. 3).

Les localisations de la balise à terre, qui n'impliquent pas le système GPS, ont été utilisées pour corriger l'erreur sur l'alignement du réseau (effectué à la boussole). La correction trouvée, de 0,5°, n'a pas d'influence importante sur l'allure générale des résultats.

La figure 6 représente les écarts cartésiens E_x et E_y entre les positions estimées (avec filtrage) et celles fournies par GPS dans un repère d'axes est-ouest et nord-sud. Les résultats sont les suivants :

- 61% des positions estimées sont à moins de 50 m de leurs coordonnées réelles,

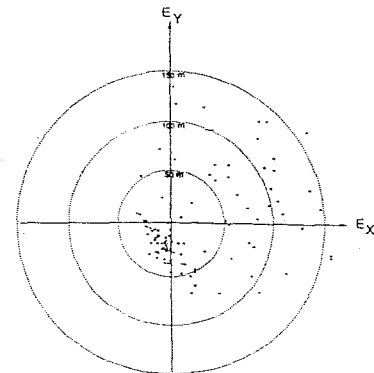


Fig. 6 : Ecart entre la position estimée de la balise et la position fournie par GPS

- 85% des positions estimées sont à moins de 100 m de leurs coordonnées réelles,
- 98% des positions estimées sont à moins de 150 m de leurs coordonnées réelles,
- le rayon d'incertitude maximum est de 156 m.

La précision intrinsèque de GPS étant de l'ordre de 50 m, on peut conclure des chiffres précédents que la précision de la localisation effectuée par le radar est du même ordre.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le radar VHF s'est révélé être un bon instrument de détection et de poursuite en plus de son fonctionnement traditionnel comme outil de télédétection.

La portée actuelle du système est d'environ 20 km par "petite" mer (force 2) et sa localisation par le radar est effectuée à mieux que 100 m dans 85 % des cas.

Simultanément à ces travaux, le LSEET achève la construction d'un deuxième radar permettant d'obtenir des cartes de vecteur-courants. L'utilisation couplée des données eulériennes et lagrangiennes de courant superficiel permettra d'estimer les phénomènes de dispersion et de diffusion turbulentes. Des études actuelles portent, en particulier, sur la définition du nombre minimal de flotteurs qu'il faut utiliser pour obtenir une précision acceptable sur ces mesures.

Cet instrument, englobant radars et bouées dérivantes, présente un grand intérêt pour l'étude d'un rejet ou du transport d'un contaminant en zone côtière.

Références

Barrick D.E. 1971. Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 2, Application to HF and VHF propagation above the sea.. Radio Science, 6, 527-533.

Stewart R.H., Joy J.W. 1974. HF-radio measurements of surface currents. Deep Sea Res. 21, 1039-1049.

Barrick D.E., Evans M.W., and Weber B.L. 1977. Ocean surface currents mapped by radar. Science, 198, 138-144.

Devenon J.L., Broche P., de Maistre J.C., Forget P., Gaggelli J. et Rougier G. 1991. VHF radar measurements in the Rhone river plume. 3rd workshop of the EROS 2000 Project, Texel, Netherlands.

Forget P. and Broche P. 1991. A study of VHF radio wave propagation over a water surface of variable conductivity. Radio Sci., 26, 1229-1237.