

Instrument

Contrôle de vitesse pour crêtes des vagues

Mesure du vent, des vagues et du courant par radars océanographiques en onde HF et VHF

Pierre Broche, professeur à l'Université de Toulon
Laboratoire de sondages électromagnétiques
de l'environnement terrestre (LSEET)¹

Dès la mise en service des premiers radars, pendant la Seconde Guerre mondiale, on a observé la diffusion des ondes électromagnétiques par la surface de la mer : c'est elle qui est responsable du *sea clutter* (« fouillis de mer ») qui contrarie la détection des cibles situées à la surface ou immédiatement au-dessus.

Les ondes diffusées sont porteuses d'information sur la surface diffusante. Aussi, ce phénomène a-t-il servi de base physique au développement de méthodes « **actives** » (c'est-à-dire dans lesquelles le milieu à étudier est « illuminé » par un émetteur, par opposition aux méthodes « **passives** » qui consistent à observer son rayonnement naturel) de télédétection de la surface marine. Les altimètres, diffusiomètres, radars imageurs couramment embarqués sur des satellites (Topex-Poseidon, ERS...) procèdent de cette technique. Ils fonctionnent dans les gammes micro-ondes (ondes décimétriques et centimétriques), l'utilisation de fréquences plus basses étant rendue impossible par le rôle de filtre que joue à leur égard l'ionosphère.

1. Le LSEET est une Unité propre de recherche de l'Enseignement supérieur associée au CNRS (UPRESA 6017).
Tel : 04 94 14 24 16, Fax : 04 94 14 24 17,
email : broche@lseet.univ-tln.fr.

Lorsqu'un radar en onde HF ou VHF illumine la surface de la mer, les vagues retournent un écho dont l'étude permet d'accéder à des informations concernant la direction du vent de surface, la vitesse du courant superficiel et le spectre des vagues. Depuis une vingtaine d'années, le LSEET travaille sur l'utilisation de ces radars océanographiques. Explication du principe, description du système Cosmer mis en œuvre près de Toulon et présentation de quelques résultats.

Les radars océanographiques terrestres

Mais, à côté des radars embarqués sur les satellites, il existe aussi une gamme d'instruments « de sol » fonctionnant en HF et en VHF (typiquement, entre 5 et 50 MHz). Capables d'estimer le spectre des vagues, la vitesse des courants et la direction du vent, ces instruments ont pour principale originalité de pouvoir fournir des cartes de paramètres de la surface marine sur une étendue de plusieurs centaines à plusieurs milliers de km² au voisinage de la côte. Plusieurs versions en existent aux USA, en Grande-Bretagne, en Allemagne, en Australie, au Canada et en France. Deux systèmes sont industrialisés et commercialisés : le Codar (Coastal Ocean Dynamics Application Radar) aux

USA, issu des travaux de pionnier de D. Barrick [1], et le radar OSCR (Ocean Surface Current Radar) en Grande-Bretagne.

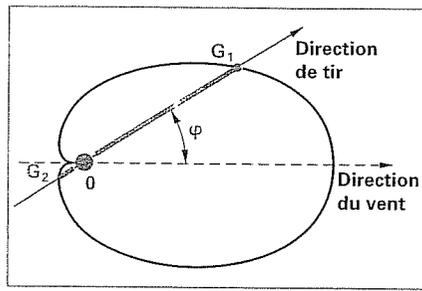
Les radars HF/VHF sont des radars monostatiques (émetteur et récepteur sont au même point), fonctionnant en onde de surface (les ondes émises et reçues se propagent horizontalement à la surface de la mer). Ils sont donc installés sur la côte, exceptionnellement sur des plates-formes fixes ou même des bateaux. Il existe aussi quelques radars « transhorizon » fonctionnant sur le même principe. Utilisant une propagation par réflexion sur l'ionosphère, ils bénéficient d'une portée (plusieurs milliers de kilomètres) et d'une couverture spatiale beaucoup plus étendues. Malheureusement, la réflexion perturbe la liaison, et l'interprétation des données en est sensiblement compliquée. En fait, ces instruments sont

plutôt des radars de surveillance du trafic maritime ou aérien qui peuvent être éventuellement utilisés à des fins océanographiques plutôt que des instruments de mesure spécifiques.

La physique de la mesure

D. Crombie [2] a été le premier, en 1955, à expliquer de façon convaincante l'origine et les propriétés spectrales particulières des échos obtenus dans la gamme HF, en introduisant la notion d'interaction résonnante entre les ondes électromagnétiques et la surface de la mer : pour une longueur d'onde radar λ_r , l'écho est essentiellement dû aux composantes de cette surface qui se propagent dans la direction du radar (« composantes radiales », s'approchant ou s'éloignant du radar) et qui ont comme longueur d'onde λ_v la moitié de λ_r . Qualitativement, cette condition assure la cohérence des ondes qui sont rétro-diffusées par les crêtes successives des composantes en question : ces ondes sont en phase et leurs amplitudes s'ajoutent, contribuant à fournir un écho d'énergie significative. C'est une condition analogue à celle définie au début du siècle par Bragg pour la diffraction des rayons X par les cristaux, aussi est-elle désignée sous le nom de « condition de Bragg » et les composantes concernées sont les « vagues de Bragg ». Dans le cas d'un radar de 50 MHz (6 m de longueur d'onde), les vagues de Bragg ont une longueur d'onde de 3 m, soit une période de 1,4 seconde. Les crêtes de ces vagues de Bragg se déplacent avec une vitesse (la vitesse de phase) qui engendre un décalage Doppler de de l'écho, de valeur approchée : $f_B \approx 0,102 \sqrt{f_r}$, où la fréquence radar (f_r) est exprimée en MHz et la fréquence Doppler (f_B) en Hz. Pour une fréquence radar de 50 MHz, on trouve 0,72 Hz.

Lorsqu'un vent souffle sur la mer, il génère des vagues qui se propagent dans toutes les directions, avec toutefois une préférence pour celle du vent. Quelle que soit la direction de tir du radar, il existe donc des vagues qui s'éloignent du radar et des vagues qui s'en rapprochent, avec plus ou moins d'énergie. C'est ce que montre la figure 1 : la répartition angulaire du spectre des vagues fait que, pour une

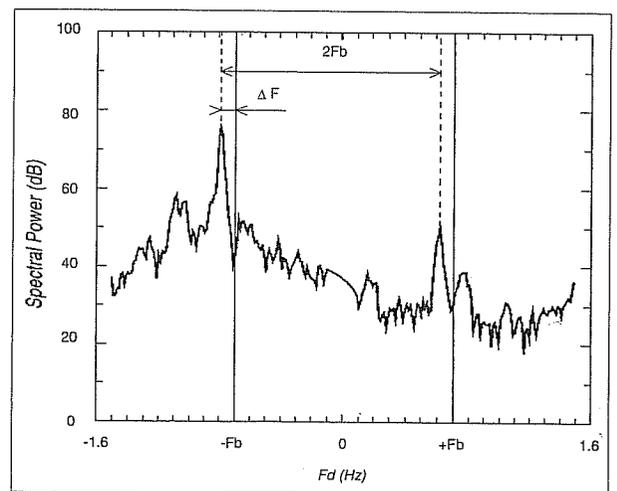


1 - Spectre angulaire de la surface de la mer.

La courbe G représente la répartition de l'énergie des vagues en fonction de leur direction φ (l'axe de symétrie étant la direction du vent). Pour une direction de tir radar quelconque, l'allure de G montre qu'il y a deux composantes d'état de la mer concernées, l'une, d'énergie G2, qui s'approche du radar, et l'autre, d'énergie G1, qui s'en éloigne. Chaque composante induit un décalage Doppler de l'onde radar, de signe opposé, qui se traduit par la présence de deux « raies » sur le spectre radar.

direction de tir donnée, il existe à la fois des vagues de Bragg qui se dirigent vers le radar (correspondant à un décalage Doppler positif égal à $+f_B$) et des vagues de Bragg qui s'éloignent du radar (et qui correspondent à un décalage Doppler négatif égal à $-f_B$). Effectivement, le caractère le plus immédiatement visible du spectre de fréquence d'un écho radar d'une portion de la surface de la mer est la présence de deux raies spectrales quasi monochromatiques, dont les positions sont symétriques par rapport à la fréquence émise, et qui sont séparées par un intervalle égal, aux incertitudes d'évaluation près, à $2f_B$ (figure 2).

2 - Spectre radar à la fréquence de 47,8 MHz. À l'émission, toute l'énergie de l'onde radar est contenue dans une raie étroite à la fréquence 47,8 MHz. À la réception, le signal ayant été modifié par les vagues, l'énergie s'étale de part et d'autre de cette fréquence. On distingue nettement les deux « raies de Bragg », dues aux « vagues de Bragg » se propageant vers le radar et à l'opposé. Leur position (repérée par les traits pointillés) est décalée par rapport à la position théorique sans courant (traits pleins) de Δf . Ici ce décalage est négatif, ce qui correspond à une vitesse radiale du courant qui s'éloigne du radar. D'autre part, la raie négative étant nettement plus importante que la raie positive, on en déduit que la vitesse du vent est quasi radiale, orientée dans la direction qui s'éloigne du radar.



Le courant modifie les raies de Bragg

En fait, les positions des deux raies (les « raies de Bragg ») ne sont pas toujours exactement symétriques. Ceci est dû à la présence des courants. Si, dans la zone étudiée, il existe un courant, celui-ci modifie de quantités opposées la vitesse des vagues de Bragg qui se propagent dans les deux sens. Si la vitesse des vagues qui se rapprochent du radar est $v_B + \Delta v$, celle des vagues qui s'éloignent est $v_B - \Delta v$. Les fréquences Doppler associées sont respectivement $f_B + \Delta f$ et $-(f_B - \Delta f) = -f_B + \Delta f$: l'ensemble du spectre est décalé de la quantité Δf , liée à la vitesse d'entraînement des vagues de Bragg par le courant, Δv , par la relation : $\Delta f = 2\Delta v / \lambda_r$. On voit donc que la mesure du décalage de l'ensemble des deux raies de Bragg par rapport à leur position théorique, ou, plus simplement, la mesure du décalage de leur position moyenne par rapport à zéro, permet de calculer la vitesse Δv . Rappelons que celle-ci est la vitesse d'entraînement des vagues de Bragg par le courant. Elle est donc liée à la composante radiale du courant (c'est-à-dire la composante dans la direction radarcible), et elle dépend du profil vertical du courant : si sa vitesse était constante avec la profondeur, Δv serait égale à cette vitesse. Pour un profil qui présente un cisaillement près de la surface, comme c'est le cas pour les

courants de vent, R. Stewart et J.W. Joy ont montré [3] que Δv est égale à la composante radiale de la vitesse à une profondeur d'environ 25 cm à 50 MHz, ou 50 cm à 25 MHz ($\lambda_r / 8\pi$).

D'autre part, les amplitudes des raies de Bragg sont proportionnelles aux énergies des vagues de Bragg dans les deux directions radiales opposées. Par exemple, si les deux raies sont d'amplitudes égales, les vagues se propageant vers le radar et à l'opposé sont de même énergie. Cela signifie que le vent souffle dans une direction perpendiculaire au faisceau du radar (mais il subsiste une ambiguïté sur le sens) ; en revanche, si le rapport des amplitudes des raies est très important, le vent souffle dans la direction radiale et le sens est celui qui correspond à la raie la plus intense (voir figure 3). D'une façon générale, si l'on connaît la répartition angulaire du spectre des vagues, il est possible d'estimer la direction du vent (à une symétrie près par rapport au faisceau radar).

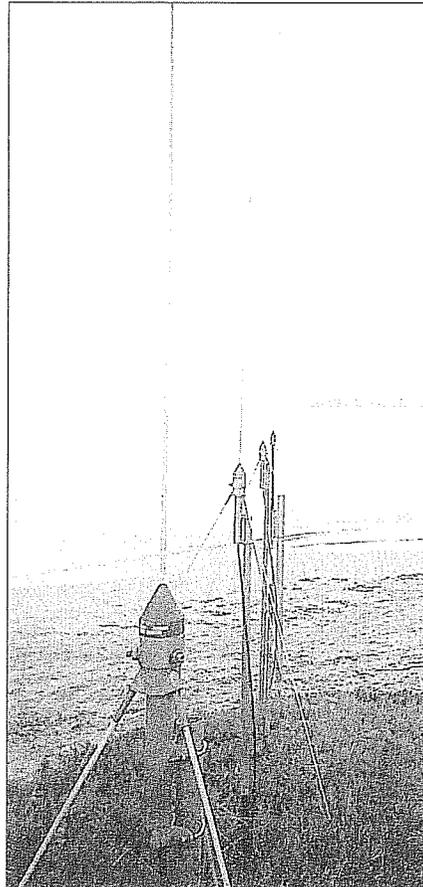
Enfin, on remarque sur le spectre (figure 2) que celui-ci ne se limite pas aux deux raies de Bragg : il existe de l'énergie aux autres fréquences. Cette énergie, dite « spectre du second ordre », est liée aux non-linéarités dans les interactions entre les vagues d'une part, et entre vagues et ondes électromagnétiques d'autre part. Plusieurs méthodes ont été développées pour en déduire des informations sur l'ensemble du spectre des vagues (et pas seulement sur les vagues de Bragg) : hauteur significative, période dominante, spectre directionnel complet.

Portée et résolution radiale

Dans la gamme de fréquences concernées (de quelques MHz à 50 MHz), la propagation des ondes électromagnétiques au voisinage de la surface de la mer s'effectue non pas par onde directe et onde réfléchiée comme aux fréquences plus élevées, mais par ondes de surface : il s'agit d'ondes qui sont guidées par la discontinuité de conductivité qui existe entre l'air et la mer. La décroissance de l'amplitude de ces ondes avec la distance est plus

rapide que pour une liaison directe, et la portée maximale en est d'autant réduite. Bien sûr, elle dépend de la puissance émise mais, en pratique, elle est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres pour les fréquences les plus élevées de la gamme, et peut atteindre une, voire plusieurs, centaines de kilomètres aux fréquences les plus basses.

L'état de la mer influe également sur la portée, mais de façon complexe : si l'atténuation augmente avec l'agitation de



la surface, il en est généralement de même pour la section efficace. En fait, l'absence totale de vent est la condition la plus préjudiciable au bon fonctionnement : en l'absence de vagues de Bragg, pas d'écho.

La localisation en distance est assurée par un fonctionnement en impulsions. Plus les impulsions sont longues, plus elles contiennent d'énergie et plus grande est leur portée. En revanche, la résolution est moindre. C'est pourquoi on utilise parfois des techniques de compression (balayage de fréquence, codage de phase...) permettant d'avoir, avec des impulsions longues, la résolution spatiale que fourniraient des impulsions courtes. Une durée d'impulsion (réelle

ou équivalente) égale à τ correspond à une résolution radiale (étendue radiale de la « cellule de mer » constituant la « cible ») $\Delta r = \frac{1}{2} c \tau$ (c , vitesse de propagation des ondes électromagnétiques).

Localisation en azimuth et résolution angulaire

La localisation en azimuth relève de deux types de techniques :

- La formation de faisceau. En combinant, avec des pondérations adaptées, les signaux reçus par les différentes antennes d'un réseau linéaire, il est possible de sélectionner l'écho provenant d'une direction donnée (ou plutôt d'un ensemble de directions contenues dans un cône dont l'étendue caractérise la directivité du réseau). La résolution angulaire $\Delta\theta$ (la largeur du cône) dépend de la longueur D du réseau et de la fréquence utilisée. Elle est de l'ordre de λ / D . Par exemple, à 30 MHz (longueur d'onde 10 m), un réseau de 50 m (qui idéalement devrait comporter 11 antennes) donnerait une résolution de $1/5^\circ$ de radian, soit environ 10° . Malgré l'intérêt évident à disposer d'un réseau le plus long possible (donc comportant beaucoup d'antennes), les contraintes de logistique et de coût en limitent souvent la longueur.

- La mesure de direction. Elle fournit la direction, ou le plus souvent les directions, qui correspondent à un décalage Doppler, donc à une vitesse radiale donnée. Cette technique, qui met en œuvre des méthodes complexes de traitement des signaux, autorise des antennes beaucoup plus compactes et simplifie considérablement les problèmes logistiques d'implantation sur le terrain. Elle est à la base du développement du Codar.

Spectres Doppler et précision des mesures

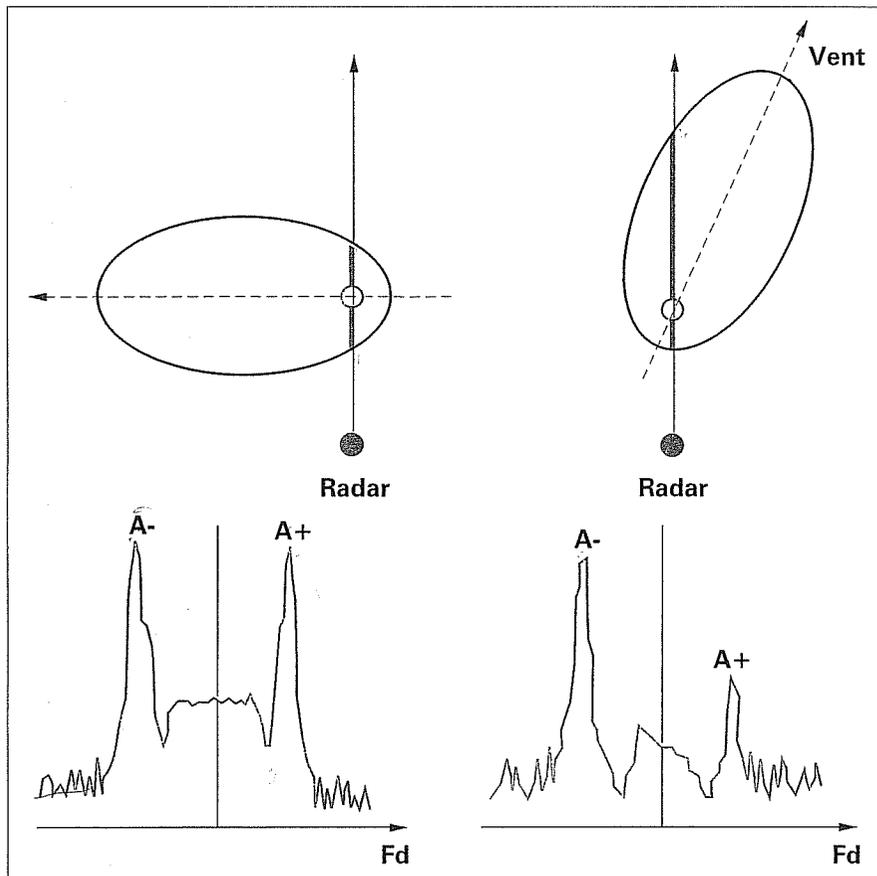
Les spectres Doppler doivent être estimés avec à la fois une bonne résolution en fréquence, pour permettre une détermination précise du décalage Doppler, donc de la vitesse du courant, et une bonne précision statistique sur les amplitudes, aussi bien pour la détermination de la direction du vent que pour celle de l'état de la mer. Pour

ces deux raisons, les spectres doivent être calculés en utilisant un signal de durée maximum et en procédant soit à un lissage, soit à une intégration incohérente de spectres consécutifs, de façon à augmenter le nombre des degrés de liberté. Néanmoins, ce temps d'intégration des mesures est limité par la durée de stationnarité des phénomènes observés et, pratiquement, il ne peut guère dépasser quelques dizaines de minutes. En combinant toutes les contraintes du

problème, on arrive à des précisions sur la mesure du courant de l'ordre de quelques cm/s. La précision sur les autres paramètres de surface de la mer dépend bien sûr de celle des estimations spectrales, mais aussi de la valeur des modèles mis en œuvre. Il faut savoir que, malgré la bonne connaissance que l'on a aujourd'hui des phénomènes impliqués, c'est toujours un sujet de recherche ouvert que d'estimer le spectre des vagues à partir de données radar.

de problèmes : variabilité spatiale des courants de marée, variabilité spatio-temporelle et profil vertical (par utilisation simultanée de plusieurs fréquences radar) des courants de vent, étude des upwellings, des jets côtiers, transport larvaire... (On trouvera de nombreux exemples dans la référence bibliographique [4])

Longtemps considérés par les océanographes comme des instruments « compliqués » et réservés à une communauté restreinte de spécialistes, ces outils sont de plus en plus acceptés pour ce qu'ils sont en réalité : des instruments aptes à fournir aux mesures de dynamique océanique côtière une diversité spatiale inégalée, et qui constituent, en complément des capteurs *in situ* (courantomètres, bouées houlographes, CTD...) ou satellitaires (visible, infra rouge, SAR) habituels, un outil indispensable pour les études côtières ■



3 - Illustration du principe de la mesure de la direction du vent. Dans la situation (a), pour un vent perpendiculaire à la direction de tir du radar, les deux raies de Bragg sont d'égales amplitudes. Pour la situation (b), où le vent est presque radial, le rapport des amplitudes est très grand.

Deux radars pour lever toute ambiguïté

Quelles que soient les techniques utilisées, un radar océanographique permet d'obtenir des informations sur la surface marine à l'intérieur d'une zone de couverture définie par la portée maximum du radar, et sur une grille dont la maille est liée aux résolutions Δr et $\Delta \theta$. Mais pour pouvoir

calculer un champ de courant, il est indispensable d'utiliser deux radars observant le même site sous des angles différents pour pouvoir reconstruire un vecteur courant à partir de ses deux composantes radiales. Les grilles associées aux deux radars ne coïncidant pas, les cartes de vecteur courant sont calculées par des méthodes classiques d'interpolation. Seuls ou à deux, les radars océanographiques HF et VHF, à onde de sol, permettent de traiter une grande variété

Références bibliographiques

On n'a fait référence ici qu'aux principaux « fondateurs » des radars HF océaniques, à savoir :

[1] D. Barrick, M.W. Evans, B.L. Weber, 1977 : *Ocean surface currents mapped by radar*. *Science*, 198, 138-144.

[2] D.D. Crombie, 1955 : *Doppler spectrum of sea echo at 13,56 Mc/s*. *Nature*, 175, 681-682.

[3] R.H. Stewart, J.W. Joy, 1974 : *HF radar measurement of surface current*. *Deep-Sea Res.*, 21, 1039-1049.

De nombreuses autres références et applications sont présentées dans le numéro spécial ci-dessous :

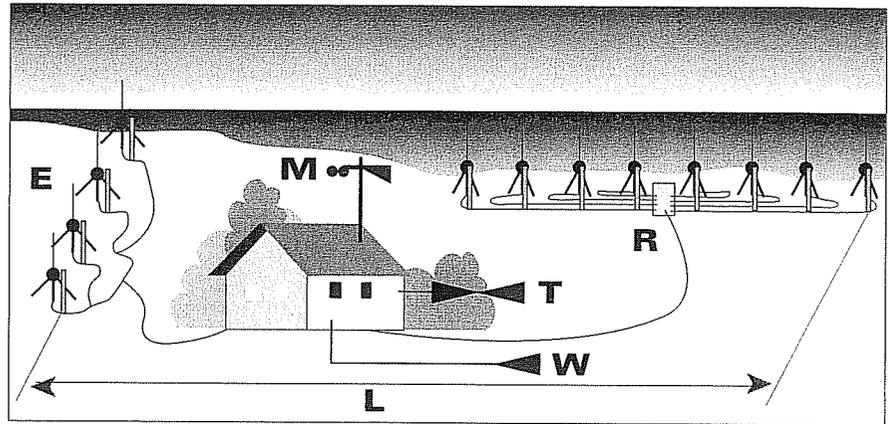
[4] OCEANOGRAPHY : *special issue on High Frequency Radars for Coastal Oceanography*, 1997. Vol 10, N° 2

Le système Cosmer du LSEET

Le système Cosmer (Courants océaniques de surface mesurés par radar) du LSEET a été construit avec le soutien du ministère de l'Enseignement supérieur et de l'Institut national des sciences de l'univers du CNRS (INSU). Un schéma général de chacune des deux stations qui le composent est donné figure 4. Les deux radars fonctionnent à des fréquences voisines, 45 et 47,8 MHz, et chaque station comprend :

- un système d'antennes d'émission (E) constitué de 4 foyers quart d'onde (environ 1,5 m) alignés dans l'axe du secteur que l'on veut explorer et alimentés de façon à couvrir avec un gain à peu près constant tout ce secteur (environ 90°).

- un système d'antennes de réception (R) constitué de foyers quart d'onde alignés perpendiculairement à la direction moyenne du secteur, et séparés d'environ une demi-longueur d'onde (en fait, un peu plus de 3 m). Pour 8 antennes, la longueur des réseaux est environ de 25 m et, pour éviter des couplages importuns, il faut disposer d'une étendue L d'environ 50 m sur le rivage pour implanter une station. L'utilisation d'un nombre supérieur d'antennes (jusqu'à 16) est possible et présente l'avantage de fournir une meilleure résolution transversale, mais l'inconvénient d'occuper plus de place.



4 - Représentation schématique d'une des deux stations du système Cosmer. L'encombrement total L est de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. E et R sont respectivement les antennes d'émission et de réception, W et T les raccords de puissance et de communications, M est une station météorologique.

- le radar lui-même est placé dans un abri alimenté en énergie. Compte tenu de la climatisation nécessaire au bon fonctionnement de l'informatique, la puissance installée à chaque station est de l'ordre de 4 kVA.

Chaque radar est constitué d'un récepteur qui pilote en même temps l'émission (de façon à assurer la cohérence de phase entre émission et réception exigée par la mesure d'un effet Doppler), d'un émetteur amplificateur de puissance (en sortie de l'ordre de 4 kW crête dans les impulsions), d'un bloc infonumérique qui assure la commande du pilote et le traitement des données. Pour la formation de faisceau de l'antenne de réception, une technique de multiplexage temporel est utilisée : chaque antenne est successivement reliée au récepteur par des commutateurs commandés par le système infonumérique et les signaux ainsi obtenus (avec une fréquence d'échantillonnage égale à la fréquence de répétition des impulsions divisée par le nombre d'antennes) sont ultérieurement combinés pour « pointer » l'antenne simultanément dans toutes les directions souhaitées.

Paramètres de fonctionnement courants

- Durée des impulsions : 4 μ s (résolution radiale 600 m)
- Fréquence de répétition des impulsions : 5 kHz, correspondant à une distance maximum d'exploration non ambiguë de 30 km. Le « taux d'occupation », pourcentage du temps consacré à l'émission, est alors de 2 %, et donc la puissance moyenne émise n'est en fait que de 80 W.
- Calcul des spectres Doppler par FFT sur 256 points avec une cadence d'échantillonnage de 3 Hz (couvrant la gamme -1,5 à +1,5 Hz), donc sur une durée de 85 secondes.
- Somme incohérente de 5 spectres consécutifs pour obtenir 10 degrés de liberté pour une durée totale d'intégration de 7 minutes.

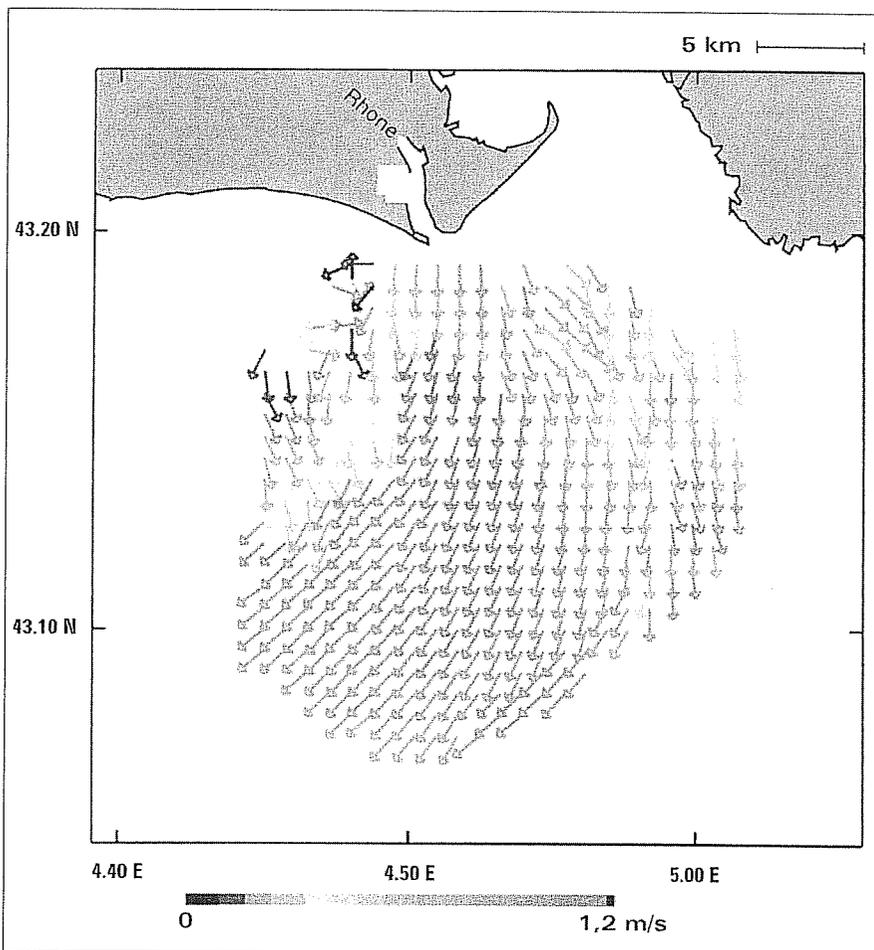
Ce système est exclusivement destiné à la mesure des courants. Un algorithme de détection des raies de Bragg et de mesure de leur position est donc mis en œuvre en temps réel, et la vitesse radiale des courants est estimée aux nœuds d'une grille rectangulaire de 1 km de maille par interpolation. Si on dispose d'une liaison numérique entre les deux stations, on peut construire la carte des courants en temps quasi réel (c'est-à-dire à la fin de chaque acquisition). Chaque vitesse est estimée avec une précision de l'ordre de 5 cm/s sur chacune de ses composantes cartésiennes. Un enregistrement des données brutes est néanmoins effectué pour permettre des retraitements ultérieurs.

Avec de telles caractéristiques, le système Cosmer peut produire de façon quasi continue (typiquement, toutes les demi-heures) des cartes de courant dans une zone côtière de 25x25 km² avec une résolution spatiale de 1 km. Les mesures effectuées portent sur le courant à la profondeur de 25 cm, intégré en temps sur 7 minutes et en surface sur environ 1 km².

Ce système est mis en œuvre à l'occasion de campagnes de durée limitée, en général en conjonction avec d'autres moyens d'observation (navires, satellites) et de modélisation. Les figures 5 et 6 présentent deux exemples de cartes de courants que l'on a pu obtenir, respectivement au cours des campagnes Modepar (Modélisation du panache du Rhône, novembre 1994) et Malro (Mesures analogiques des lobes d'antennes des radars océanographiques, novembre 1997). Ces campagnes ont été réalisées dans le cadre du programme national d'océanographie côtière (PNOC) de l'Insu et de l'Ifrémer.

5 - Courant à l'embouchure du Rhône (6 novembre 1994, 12 h 00), un jour de forte crue.

La direction des vecteurs est celle du courant superficiel, la vitesse est donnée par l'échelle colorée. La diversité spatiale fournie par le radar permet de mettre en évidence de façon particulièrement nette l'extension et le mouvement de l'eau d'origine fluviale, avec des vitesses à l'embouchure supérieures à 1 m/s, et un fort contraste jusqu'aux limites de portée entre la vitesse de cette eau et celle de l'eau ambiante. Il faut noter que l'épaisseur de l'eau d'origine fluviale (le « panache ») est comprise entre 1 et 2 m, et qu'il n'existe aucun instrument conventionnel (courantomètre) capable d'effectuer des mesures à une si faible profondeur, même en un seul point.



6 - Courant sur la baie de Hyères (21 novembre 1997, 17 h 00), par vent d'est faible (environ 3 m/s).

Les secteurs grisés clairs sont respectivement les deux secteurs angulaires couverts par les deux radars. La zone de recouvrement, dans laquelle la reconstruction du vecteur courant est possible, est représentée en gris foncé. On observe un tourbillon anticyclonique dans la baie et des vitesses plus importantes dans les deux passes qui la font communiquer avec la mer ouverte. La cohérence des champs de courant obtenus, de vitesse pourtant très faible, montre que dans ce cas la précision est sans doute meilleure que 5 cm/s.

