

# Les Radars de mesure des courants marins de surface

## au MIO / CNRS & USTV & AMU &IRD

(nouvelle rédaction 08/03/2013, Y.Barbin)

### **A. Thématique**

Le système de radars HF-VHF de courantométrie côtière du MIO permet de dresser, en continu et sur de longues périodes, les cartes des courants marins de surface, jusqu'à des distances supérieures à 100km et avec une résolution spatiale de 300m à 3km selon la largeur de bande explorée. Les spectres Doppler sont aussi des indicateurs de l'état de mer, et permettent d'établir, indirectement, des cartes de direction de vent.

### **B. Contexte national et international**

Depuis le début des années 1970, la technique radar courantométrique a progressé aux Etats-Unis (avec le radar « codar » <http://www.codaros.com/> ) et en Europe. Elle est maintenant « sortie » des laboratoires de développement, et aussi du strict domaine de la recherche scientifique, pour participer à la surveillance environnementale, à la gestion des situations normales et de crise (pollution marine).

Des radars courantomètres sont même opérationnels et connectés sur des réseaux pérennisés: réseau multi-instruments <http://marine.rutgers.edu/cool/> de la Rutgers University (côte Est américaine), le réseau californien <http://www.cocmp.org/> , et l'intégration des radars au réseau IOOS à l'échelle globale de toutes les côtes des Etats-Unis (Integrated Ocean Observing System, <http://www.ocean.us/> ), voir aussi le magazine « Sea Technology », numéro de Septembre 2007 <http://www.sea-technology.com/> . Il en est de même en Australie avec le système intégré de données marines INMOS et le réseau de radar ACORN.

En Europe, plusieurs campagnes scientifiques coordonnées ont déjà été organisées (voir campagne Eurorose, par exemple). En France, en 2006, après une campagne d'évaluation, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) <http://www.shom.fr/> s'est équipé de deux radars HF à formation de voie électronique. En Grande Bretagne, des installations pérennes ont permis d'étudier sur de nombreuses années la circulation en Mer d'Irlande, mais aussi depuis deux ans sur la côte nord de la Cornouailles.

La compétence instrumentale en Europe est organisée autour de 3 pôles: l'Université de Sheffield (équipe du Professeur L.Wyatt, maintenant en charge du réseau Australien, voir ci dessus), l'Université de Hambourg (équipe du Dr Gurgel), et le MIO de Toulon.

Le LSEET, ancien laboratoire fondateur, maintenant intégré dans le MIO depuis 2012, (équipe fondatrice du Professeur Broche) avait installé, sous la Direction du Professeur Pierre Broche, un premier prototype HF à La Londe les Maures en 1976. A partir de 1979, le laboratoire avait utilisé son système radar lors de campagnes en France et en Allemagne. En 1984 était expérimentée la première version d'un radar VHF plus compact. Vers 1995, le radar VHF COSMER atteignait la maturité d'un système à deux mesures simultanées (à partir de 2 sites), avec des radars pilotés par ordinateur PC et équipés de la formation électronique de voies.

L'instrument COSMER avait ensuite fait l'objet dans la période 2003-2005 d'un contrat d'utilisation à temps partiel par une PME bretonne d'océanographie, AVELMOR, devenue ACTIMAR <http://www.actimar.fr/>. Cette société a pu ainsi opérer le radar pour le SHOM (campagne EPEL) et pour le laboratoire ELICO de l'Université du Littoral (PNEC) à Wimereux (62).

En 2004, le LSEET a fait l'acquisition de deux nouveaux radars HF WERA (Wellen Radar) allemands <http://ifmaxp1.ifm.uni-hamburg.de/WERA.shtml>, fabriqués par la société HELZEL Messtechnik <http://www.helzel.com/>, sous licence de l'Université de Hambourg. Le LSEET a pu participer à l'évolution de cet instrument. Il a développé des algorithmes nouveaux de cartographie à Haute Résolution azimutale, de réduction des Interférences Radio et de suppression d'artefacts, on pourra se référer aux « abstracts » de nos présentations à la conférence RADIO OCEANOGRAPHY WORKSHOP 2006 à Hambourg (ROW2006), voir plus loin les parties G et H de ce texte.

De Mai 2005 à février 2007, le LSEET a conduit une campagne d'observation du Golfe du Lion de longue durée (21 mois), voir notre présentation à l'AIE2006 (Brest) : [http://www.ifremer.fr/aei2006/presentations/T1S3/aei2006\\_12\\_28.pdf](http://www.ifremer.fr/aei2006/presentations/T1S3/aei2006_12_28.pdf). Cette campagne a permis, entre autre, d'évaluer et d'améliorer la fiabilité des équipements face à la mer. Cette campagne, qui a généré 2 Téra Octets de données, a conduit à développer des méthodes systématiques de traitement, en routine automatique, des signaux bruts. En plus des « sorties » à caractère scientifique (cartes de courants), d'autres programmes rapides ont permis d'évaluer la qualité de fonctionnement de l'appareil, et de détecter les pertes de performances, nécessitant ou non une intervention sur site.

En 2007, le LSEET a procédé à une campagne courte (de 4 semaines) en Italie dans la région de LA SPEZZIA, avec une résolution radiale aussi fine que 300m, ce qui était une « première » avec des WERA (article publié en 2010). Les cartes de courant étaient calculées en quasi temps réel.

### **C. Les mesures de courant sur la zone dite ANTARES au sud de Toulon et des « îles d'or »**

A partir de Mai 2010, le LSEET a entamé une campagne de longue durée pour l'observation des courants au sud de la région de Toulon. Ces mesures ont été soutenues par les programmes GIRAC, puis ECCOP, TOSCA et vont continuer avec le programme méditerranéen MOOSE. Une première station d'émission réception WERA a été installée vers les Cap Sicié avec l'aide de la Préfecture Maritime (Marine Nationale, CECMED) et de l'association GMC.

A cause des contraintes de topographie et de site particulières, cette nouvelle campagne a nécessité plusieurs innovations : réseau irrégulier d'antennes de réception, filtrage spatial adaptatif, synchronisation GPS des équipements, configuration bi- ou multi-statique avec d'abord l'installation d'une seconde station de réception au Cap Bénat, grâce à l'appui de l'association ASPCB, en Novembre 2011. Les deux stations de réception utilisaient d'abord les signaux rétro-diffusés par la mer à partir de la seule station d'émission du premier site de la Batterie de Peyras. Puis, grâce à l'appui du Parc National de Port Cros (PNPC), on a pu installer une seconde station d'émission entièrement autonome sur l'île de Porquerolles en Mai 2012. La portée et la superficie couverte ont ainsi été augmentées, et les cartes de courant ont gagné en qualité.

Depuis Mai 2012, les courants sont donc obtenus à partir d'un réseau hybride :

-une station d'émission réception près du cap Sicié qui fonctionne en mono-statique et donne des projections radiales,  
-un couple émission à Porquerolles, réception au cap Bénat, qui fonctionne donc en configuration bi-statique et fournit des projections des courants de surface normales aux ellipses.

Une mesure est effectuée toutes les vingt minutes sur chaque site. Trois mesures sont intégrées dans le traitement statistique qui donne donc une mesure horaire.

Les calculs des projections de vitesse sont effectués au fur et à mesure à bord des deux stations de réception. Les deux cartes de vitesses projetées sont transmises via réseau 3G directement à la DT de l'INSU ( La Seyne sur Mer) et au MIO-Toulon, où les projections sont rassemblées pour construire les cartes vectorielles de courant.

Une méthode de seuillage utilisant un filtrage temporel court terme permet d'éliminer la plupart des fausses solutions générées soit par des échos parasites soit par des interférences radio. La combinaison des deux projections comporte un algorithme éprouvé de remplissage de la carte (avec la méthode de traitement azimutale adoptée, certaines cellules dont les positions varient n'ont pas directement de vitesse attribuée lors du calcul brut de projection) .

La configuration actuelle est en service quasi continu depuis Mai 2012 (hors pannes, arrêt pour maintenance, ou essais spécifiques). Des travaux sont toujours en cours pour l'améliorer. Ainsi, une longue interruption de service a eu lieu en octobre 2012. L'installation actuelle est encore très susceptible aux situations de grand vent qui réduisent notablement la couverture spatiale du premier site. Une amélioration importante est en en préparation. Les cartes de courant sous forme graphique sont rendues disponibles à la communauté scientifique et sont également visibles sur le site web :

<http://hfradar.univ-tln.fr/>

Depuis Décembre 2012, afin de limiter l'occupation spectrale, les balayages de fréquence des stations d'émission sont entrelacées, et n'occupent ainsi qu'un seul canal de fréquence de 50 kHz placé entre 16.100 MHz et 16.200MHz. C'est une première en opérationnelle des radars WERA.

#### **D. Expertise et rayonnement du laboratoire**

Le MIO contribue auprès de l'ANFR en tant qu'utilisateur averti à la mise en place d'une bonne coordination d'occupation spectrale dans le cadre des attributions de fréquences accordées à la Conférence Mondiale des Radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications de 2012 (WRC2012, Groupe 5B).

La présence et l'expertise du MIO dans le groupe international des utilisateurs WERA (WUG, WERA user group <http://www.helzel.com/helzelmed/download/Newsletter-7323.pdf> ) nous a permis d'avoir accès à plusieurs reprises à des données provenant d'autres sites de radars, opérés à d'autres fréquences, et dans des contextes océanographiques différents. Nous avons participé à des études de cas particuliers, comme le traitement des données radar de zones soumises à la houle et à de fortes marées, et en présence d'îles (SURLITOP, en partenariat avec le SHOM et ACTIMAR). Nous avons ainsi paramétré nos programmes pour les rendre adaptables à plus de situations expérimentales.

En Avril 2012, l'équipe radar du MIO a organisé au sein des Journées Scientifiques Neptune de l'Université du Sud Toulon Var (USTV), l'édition 2012 du colloque international ROW , « Radio Oceanography Workshop » qui a réuni une cinquantaine de spécialistes de niveau mondial.

## **E. Perspectives 2013**

En 2013, avec le soutien financier et technique de l'Ifremer, le MIO et la Division Technique de l'INSU vont déployer deux nouvelles stations radar sur la méditerranée dans la région de Nice. Deux nouveaux radars compacts CODAR de fabrication américaine seront installés sur la côte pour dresser les cartes de courants de surface jusque vers la bouée instrumentée DYFAMED. Au delà de l'observation, ces cartes peuvent servir à contraindre ou régler les modèles (assimilation) ou à suivre des dérives.

## **F. DESCRIPTIF TECHNIQUE du radar de type WERA**

### **F.1 Principe**

Le WERA est un radar doppler à «*chirps*» (sondage de la bande utile par des rampes de fréquence, répétées), fonctionnant dans les bandes métriques ou déca-métriques <http://ifmaxpl.ifm.uni-hamburg.de/WERA.shtml>

Les ondes rétro-diffusées par la mer vers le radar sont essentiellement la contribution cohérente des vagues de Bragg dont la longueur d'onde est la moitié de la longueur des ondes électromagnétiques. On pourra lire la partie G de ce document.

Pour un radar à 15MHz, les vagues sélectionnées ont une longueur d'ondes de 10 mètres. Pour un radar à 50MHz, on sélectionne les vagues de 3 mètres. De telles vagues sont quasiment toujours présentes dans le spectre de vagues.

La vitesse de phase des vagues sélectionnées (celles qui s'approchent et celles qui s'éloignent) est bien connue. L'observation, pendant plusieurs minutes, des ondes rétro-diffusées par ces vagues permet d'évaluer, par méthode soustractive, la vitesse du courant radial de la surface qui entraîne les vagues. (eg. Pierre Broche, METMAR (météorologie marine), n°181, 1998) <http://www.meteofrance.com/FR/pedagogie/librairie/periodiques.jsp>

### **F.2 Description du radar WERA**

La cartographie vectorielle des courants nécessite deux radars séparés qui permettent d'observer la surface de la mer sous deux angles. A partir des deux vitesses radiales, on reconstitue la vitesse vectorielle du courant de surface.

La distance en ligne directe qui sépare les deux sites côtiers doit être de l'ordre de la moitié de la portée espérée. En HF, les deux sites sont à une quarantaine de kilomètres l'un de l'autre. En VHF, on aura une dizaine de kilomètres.

Chacun des radars est constitué d'une baie électronique et de deux champs d'antennes, l'un pour l'émission, et l'autre pour la réception.

La baie électronique (voir photo1) est installée en tiroir industriel « rack 19 pouces » dans un container spécifique (voir photo2), un bungalow, ou à l'intérieur d'une installation pérenne (bâtiment). La consommation de l'électronique est inférieure à 1kW. En été, et pour l'installation dans le container, une climatisation est nécessaire (puissance pic supplémentaire 2kW).



photo1 : vue de face du rack en configuration 12 canaux RX



Photo2 : Le container spécifique, aménagé avec climatisation intégrée



Photo3: Le réseau rectangulaire d'antennes d'émission HF (Salins de Giraud).



Photo4: Le réseau linéaire d'antennes de réception HF (Salins de Giraud).

Le réseau d'émission TX (voir photo3) est constitué de 4 antennes disposées en rectangle, avec un espacement en  $0.5 \lambda \times 0.15 \lambda$  ( $\lambda$  représente la longueur d'onde), soit  $10\text{m} \times 3\text{m}$  à  $15\text{MHz}$ . On a aussi utilisé une disposition « *end fire* » en ligne (« *déclenchement par l'arrière* »), à 4 ou 2 antennes. Au pied des antennes d'émission est disposé l'amplificateur de puissance haute fréquence ultra linéaire. L'amplificateur reçoit de la baie un signal d'excitation par un long câble coaxial et une alimentation  $220\text{Volts}$  ( $200\text{W}$ ).

Le réseau d'antennes de réception RX (voir photo 4) est, en général, un réseau linéaire « *broadside* » (des antennes verticales dipôles élémentaires en demi-onde raccourci, régulièrement espacées le long d'une ligne parallèle à la côte). L'espacement typique est en «  $\lambda/2$  » (demi-longueur d'onde). Un réseau RX comprend de 8 à 16 antennes. On a travaillé avec un réseau limité à 4 antennes sur un des sites méditerranéens (Ile du Frioul). Vers  $15\text{MHz}$ , un réseau de 12 antennes s'étire sur plus de  $100\text{m}$ . Vers  $45\text{MHz}$ , un réseau de 8 antennes n'a besoin que  $20\text{mètres}$ . Chaque antenne RX individuelle est reliée par un câble coaxial à un canal récepteur indépendant sur la baie

électronique. Tous les câbles RX ont la même longueur.

Le réseau RX, dans son ensemble, doit être très éloigné du réseau TX afin de réduire le couplage direct qui limite la sensibilité du système. L'espace nominal est supérieur à 250m. Le réseau de réception doit aussi être éloigné de l'électronique de pilotage et du pc, générateurs de rayonnements parasites.

Toutefois, en Italie, contraint par la disposition d'un des deux sites, on a opéré le radar en VHF avec un espacement entre réseau d'émission et réseau de réception de seulement 80 mètres, le fort couplage nous a conduit à réduire la puissance émise, et on a obtenu des performances de portée réduite (15km sur ce site #1 avec seulement 1W RF, contre 30km sur le site #2).

**L'implantation (trouver les sites et la bonne disposition des réseaux) et le câblage des réseaux d'antennes sont les points durs de cet instrument** (et ceci est d'autant plus vrai qu'on utilise le mode chirps avec l'émission en continu).

Un réseau de réception de 12 antennes vers 15 MHz nécessite la pose de 3 km de câble (2.5 km de coaxial vers les antennes RX, et deux câbles de 250m vers le réseau TX), et pour le réseau 8 antennes en VHF, un peu plus d'un kilomètre. Si le câble secteur doit être enfoui, l'investissement sera encore plus lourd. Ces câbles ne sont souvent pas réutilisables à la fin de la campagne.

## **G. Interaction des ondes HF avec la mer et principes des radars océanographiques**

### **G.1. La mer « signe »**

L'émission d'ondes radioélectriques décamétriques (de 10 m à 100m) dites « ondes HF » à partir de la côte vers la mer salée et en polarisation verticale excite à la surface de la mer une onde électromagnétique de surface qui glisse sur la mer jusqu'au delà de l'horizon en s'atténuant très progressivement. Avec seulement quelques dizaines de watt moyens à l'émission, on reçoit un fort signal de rétrodiffusion de la mer, revenant distinctement du large jusqu'à des dizaines de kilomètres. Ce « signal de mer » reçu sur les antennes de réception domine largement le bruit de fond, sauf en cas d'interférences par d'autres signaux radioélectriques puissants émis sur la même fréquence.

### **G.2. Les vagues de Bragg**

Le signal qui revient de la mer est principalement la signature cohérente de la rétrodiffusion sur les suites de vagues accordées dites « vagues de Bragg » ( quand la longueur d'onde des vagues vaut la moitié de la longueur d'onde électromagnétique).

En mono-statique ( émission et réception des signaux depuis le même endroit de la côte), les vagues sélectionnées sont celles qui se propagent le long de la direction de propagation des ondes radio (mouvement radial). Il y a les vagues accordées progressives qui viennent vers le radar et les vagues accordées récessives qui s'en éloignent.

La surface de la mer présente par tout temps un spectre continu de longueur d'ondes de vagues sur plusieurs décades, ce qui couvre bien tout le domaine des ondes radio décamétriques HF et aussi métriques VHF. Toutefois, par temps calme, la mer est « plate » et contient en effet peu de vagues longues. Ainsi, quand on utilise les ondes les plus longues (le bas du spectre HF), l'amplitude du signal rétro-diffusé variera beaucoup avec l'état de mer. Par « mer d'huile », il y a même extinction du phénomène (le niveau « du signal de mer » passe sous le bruit).

### G.3. La signature Doppler des raies de Bragg

Les deux vagues sélectionnées progressives et récessives présentent des vitesses de phase symétriques, typiques de leur longueur d'onde, et produisent par le décalage Doppler deux raies spectrales symétriques. Ce décalage vaut environ  $\pm 0,102 \cdot \text{racine de la fréquence porteuse } f_p$  (qui est ici exprimée en MHz dans cette formule). C'est à dire  $\pm 0,2$  Hz pour  $f_p=4$ MHz,  $\pm 0,3$  Hz pour 9MHz,  $\pm 0,4$ Hz pour 16MHz, ...

On remarque que le décalage relatif en fréquence est faible, de l'ordre de  $\pm 3E-8$  vers 16MHz. Il faut des oscillateurs stables pour séparer et bien mesurer ces raies spectrales.

### G.4. La singularité des raies de Bragg

Le fort contraste d'amplitudes des raies de Bragg provient de la sommation cohérente de la rétrodiffusion sur le nombre important de vagues accordées se trouvant dans la cellule de résolution du radar. Une résolution radiale trop fine tuerait ce phénomène d'amplification.

Typiquement, un radar opérant sur une bande large de 50 kHz ( par exemple de 15,000 MHz à 15,050 MHz) offre une résolution en distance radiale de 3km. Avec un radar fonctionnant avec une fréquence centrale à 15 MHz, on sélectionne les vagues de Bragg de 10m. Il y a donc 300 vagues dans la cellule de résolution profonde de 3km. L'amplification relative des raies est alors très forte, de l'ordre de 25 dB, et on les distingue facilement dans le signal reçue.

Si on travaille en fréquence plus basse, donc avec des vagues sélectionnées plus longues, alors, pour garder le même piqué, il faudra accepter de travailler avec une résolution plus grossière. On se rappellera que bien au large, la section efficace radar (s.e.r.) de la mer (c'est à dire ce qui donne du niveau au signal reçu) sur ses vagues de Bragg est très forte, par exemple beaucoup plus forte que celle d'un gros navire.

### G.5. Longueur d'onde et Portée

La mer conductrice assure la propagation à faible perte de l'onde de surface. Plus la mer est salée, meilleure est la conduction, et plus faible est l'atténuation par absorption. L'absorption augmente comme la racine carrée de la fréquence (effet de peau).

L'effet d'absorption ne domine qu'aux longues distances (dB/km), pour les premiers dizaines de kilomètres, c'est l'atténuation par expansion géométrique qui domine (dB/log(km)). Ainsi, on obtient une meilleure portée vers les basses fréquences, mais comme expliqué plus haut, on risque une plus grande variation de niveau du signal parce que la mer peut renvoyer moins de signal. Cette remarque est vraie surtout pour les petites mers fermées. Pour l'océan, l'effet des marées et des vents est générateur de houle et de systèmes de vagues à toutes longueurs d'onde et à longue portée.

Typiquement avec les puissances moyennes rayonnées de l'ordre de 30W, un radar « bien constitué », et en absence d'autres interférences, on obtient une portée typique de 30km vers 40MHz, de 60 km vers 20MHz, de 80km vers 15MHz, de 100km vers 12 MHz, de 150km vers 8MHz, ..... (on remarque en gros un produit constant  $f(\text{MHz}) \cdot d(\text{km})=1200$ )  
Il est bien connu que l'augmentation de puissance émise n'a pas d'effet spectaculaire sur la portée. Les puissances raisonnables émises permettent de satisfaire les normes de rayonnement jusqu'au plus près des antennes (quelques mètres).

## **G.6. Complication ionosphérique**

Jusqu'au delà de 100 km, il n'existe aucun rétro-diffuseur naturel de niveau comparable à celui de la mer. La présence d'un bateau sera facilement visible aux courtes distances sur le spectre Doppler, si il ne signe pas sur la fréquence des raies de Bragg. Pour les radars océanographiques, très au large, seules les raies de Bragg sortent du bruit, sauf..... si on atteint la distance correspondant aux premières couches de l'ionosphère. On sait que les couches de l'ionosphère sont variables, éphémères, saisonnières car dépendant du rayonnement solaire et des ces orages et que l'angle sous lequel elles signent est variable. On sait aussi qu'elles sont animées de mouvements internes complexes offrant un large spectre Doppler. On sait aussi qu'elles réfléchissent des signaux radio venant de plus loin.

Ainsi l'ionosphère a deux impacts importants et variables dans le temps pour les radars océanographiques. Elles propagent de puissantes interférences radio jusqu'au radar, elles réfléchissent fortement les signaux du radar aux distances longues.

On devine au passage que bien que ces radars soient conçus pour utiliser l'onde de surface, il y a toujours une contribution directe des ondes de ciel et une contribution par couplage onde de ciel-onde de surface, distribué le long de la surface rugueuse de la mer. La première contribution peut être réduite dans certaines installations, pas la seconde.

## **G.7. Signature du courant de surface**

Un courant de surface transporte les vagues et produit un léger décalage (une asymétrie) de ce système des deux raies de Bragg.

Un courant de 10 cm/s à 16MHz produit un fin décalage de 0.01 Hz. Il faut enregistrer le signal reçu pendant plusieurs minutes pour mesurer correctement ce fin décalage supplémentaire des raies de Bragg, et en déduire la vitesse radiale du courant (projection du courant de surface sur la direction radiale). On comprend aussi l'intérêt de garder un fort piqué des raies de Bragg, c'est à dire une bonne profondeur de résolution. On touche ici au problème de l'homogénéité ou non du courant sur la profondeur de résolution.

Deux projections radiales non colinéaires, produites par deux stations radar séparées le long de la côte, permettent de construire le vecteur courant de surface.

## **G.8. Spectre Doppler et état de mer**

Au delà de l'information sur le courant à partir de la position des deux raies dominantes de Bragg, leurs amplitudes différentes et les autres composantes plus faibles du spectre Doppler permettent de remonter à des informations d'état de la mer, sur le vent, sur la houle..... Utiliser le reste du spectre Doppler demande un bien meilleur rapport signal sur bruit, donc une distance plus faible, ou une puissance émise plus forte, ou un plus long temps d'intégration.

## **G.9. Echelle des phénomènes, échelles étudiées, et caractéristiques des radars**

En général, loin des côtes et en mer profonde, les phénomènes océanographiques comme les courants et leurs variations sont plutôt à plus grande échelle que près des côtes où se produisent de nombreuses interactions à plus petites échelles.

Les radars utilisés pour étudier la mer très au large se contentent d'une faible largeur de bande, ne permettant qu'une résolution grossière, qui est garante d'un bon gain (et d'un bon piqué)

de Bragg. Aussi, la faible largeur de bande améliore normalement le rapport signal sur bruit, comme la puissance du radar est concentrée sur une bande plus étroite.

Ainsi, la combinaison d'un objectif en résolution moins fine, de ces facteurs techniques, et aussi du choix d'une fréquence de travail basse, contribue à assurer la performance « très longue distance ». Mais il faut toujours se rappeler que ces calculs de bon sens sont vite ruinés par la présence des interférences radio et ou des échos ionosphériques si on les atteint.

### **G.10. Scénario temporel des mesures**

En général, de nos jours, la mer et les courants sont observés jour et nuit, et à longueur d'année. Mais il peut y avoir aussi de courtes campagnes de quelques semaines.

Les fluctuations à observer sont le plus souvent lentes, sauf pour les zones côtières des mers à marée et près des estuaires. Pour les zones au large, on se contente en général de une à quatre mesures à l'heure. Une mesure dure de dix à vingt minutes (et on estime que l'état est stationnaire durant la mesure). Récemment, on fait plutôt fonctionner les radars en permanence, et on adapte les paramètres temporels de traitement aux divers phénomènes étudiés.

La conférence WRC2012 a prévu l'émission régulière d'un signal d'identification (un « Call Sign ») au moins toutes les 20 minutes. Il faudra prendre en compte cette demande

### **G.11. Quelques chiffres clefs associées aux performances typiques**

Pour les radars HF les plus courants : fréquences porteuses de 10 à 20 MHz, portée de 60 à 120 km, résolution de 1.5 à 5km (largeur de bande B de 30 à 100kHz)  
Pour les radars HF très longues portées, et donc sujets aux échos ionosphériques : fréquences de 3 à 9MHz, portée de 120 à 250 km, résolution de 5 à 10km (Bande de 15 à 30 kHz).  
Pour les radars VHF littoraux: fréquences de 30 à 50 MHz, portée de 20 à 50 km, et résolution de 500m à 1500m (Bande de 300kHz à 1MHz)  
Pour les radars VHF dits portuaires ou d'estuaires : fréquence vers 150MHz, portée 3 km, résolution 50m (Bande de 3MHz)

En gros, on voit que le rapport Bande sur Fréquence Centrale est assez constant de l'ordre de 3 pour 1000 en HF, et plutôt 5 à 10 pour mille en VHF :  
B=15 kHz à 5MHz, 30 kHz à 10MHz, 50 kHz à 15 MHz, 100kHz à 30MHz,  
et plutôt B=250 à 500kHz vers 50MHz et B=2 à 3 MHz vers 150 MHz.

On notera que les portées réduites en VHF et l'absence de réflexion ionosphérique au delà de 30MHz isolent beaucoup mieux les zones géographiques et ainsi protègent les utilisateurs (en général), et ce qui compte devient alors de manière prépondérante la distinction classique entre zone urbaine et zone rurale.

### **H. Traitement des signaux reçus par les radars, extraction des informations et construction des cartes de courant.**

Les petits signaux reçus sur les antennes sont amplifiés et filtrés pour ne garder que les signaux qui sont dans la bande de fréquence des signaux émis. Ils sont ensuite numérisés avec une grande dynamique ( le niveau des signaux reçus varient beaucoup avec la distance d'où ils reviennent) et mémorisés.

Le traitement consiste à retrouver dans les signaux la zone où ils ont été rétro-diffusés : sa distance, sa direction. Il faut aussi suivre pendant plusieurs minutes la variation temporelle des signaux (traitement Doppler) pour en extraire une information sur le mouvement de la mer, retrouver le mouvement des vagues de Bragg, puis extraire subtilement l'effet de leur entraînement par le courant marin de surface.

Dans la plupart des systèmes, les signaux sont d'abord séparés et triés par distance. On utilise l'information, retrouvée selon le type de modulation, du temps de propagation. La résolution en distance définit des couronnes autour du radar. Les radars du MIO fonctionnent avec des couronnes large de 3km. C'est une valeur standard pour des équipements qui portent jusque vers 100km. Cette largeur dépend de la largeur de bande de fréquence utilisée par le radar.

## **H.1. Traitement Azimutal**

Pour distinguer la direction d'arrivée des ondes radio, il faut utiliser un système antennaire offrant une discrimination en direction.

Avec une antenne électrique individuelle, on n'a pas ici de capacité de discrimination azimutale. En effet l'onde de surface est une onde à polarisation verticale. L'antenne électrique qui la reçoit est aussi verticale. L'antenne électrique verticale est omnidirectionnelle pour les signaux arrivant dans le plan horizontal.

Avec une antenne à boucle magnétique la situation est différente. Elle capte la composante magnétique. La composante magnétique de nos signaux, orthogonale à la composante électrique, est donc horizontale. Elle est aussi orthogonale à la direction de propagation des ondes, et donc sa direction dans le plan horizontal varie avec l'azimut de l'onde incidente. L'effet magnétique, effet de flux, dépend de la projection du champ magnétique sur la surface de la boucle magnétique. Ainsi le flux varie comme le cosinus de l'angle entre le champ magnétique et la normale à la boucle. Cette variation en cosinus est douce, le passage par zéro est le plus significatif. Ailleurs la discrimination est grossière. Pour une variation de 90° autour du meilleur angle, la puissance ne varie que dans un rapport de 1 à 2. Il est difficile de séparer les signaux arrivant d'une direction par rapport aux autres. Par contre en combinant deux boucles et une antenne électrique il est possible, pour un front d'onde donné de dire de quelle direction il vient.

Avec un réseau de plusieurs antennes espacées, un front d'onde (par exemple une onde quasi plane qui revient de très loin) selon sa forme et sa direction d'arrivée n'atteint pas toutes les antennes du réseau en même temps. Il faut s'arranger pour que la suite des valeurs de retard pour chaque antenne soit bien typique d'une seule direction d'arrivée possible des ondes. Pratiquement, on n'utilise pas les retards entre antennes mais les déphasages (ce qui est équivalent à un facteur près, pour une bande étroite de fréquence).

Il existe en suite deux grandes familles de traitements pour extraire les informations utiles : la formation azimutale de voies (FV), la détection de direction d'arrivée (DA).

## **H.2. Formation de voie**

Dans la formation de voie, on dirige physiquement ou par calcul sans rien déplacer, le réseau vers la direction souhaitée. On espère alors capter au mieux les signaux venant de cette direction, et réduire au maximum ceux qui viennent des autres directions. On définit ainsi un lobe de sensibilité en azimut. Il faut un réseau large pour avoir une résolution fine en azimut. Cette méthode est donc applicable aux longs réseaux d'antennes électriques verticales.

La formation de voie par le calcul (déphasages symétriques des signaux acquis en compensation des déphasages originaux ) peut être faite lors de l'acquisition des signaux, mais elle peut être faite en temps différé. On peut faire simultanément le calcul dans plusieurs directions, ou répéter le calcul sur les signaux enregistrés pour toute suite de valeurs choisies de la direction de pointé. Bien sûr, des directions de visées proches, dont les lobes de sensibilité se chevauchent donneront des résultats peu différents. Un réseau petit ne sépare pas les directions proches.

Quand la direction est choisie, les bons déphasages appliqués, on forme un signal somme résultant dont on peut suivre l'évolution dans le temps et recueillir tout le spectre temporel. On pourra dans ce spectre distinguer entre autre les raies de Bragg et extraire du décalage de leur position une information sur la composante du courant de surface le long de la direction de propagation des ondes radio.

### **H.3. Détection de Direction d'Arrivée.**

On a dit que sur un front d'onde unique ou émergeant largement du bruit, il est possible d'atteindre le piqué suffisant pour déterminer la direction d'arrivée de cette onde dans le plan horizontal même avec une antenne à très mauvaise résolution azimutale (on détecte la direction de visée qui donne un max de signal , ou plus facilement celle qui donne une extinction totale : « un zéro de transmission »).

En fait cette méthode peut être étendue mathématiquement à quelques fronts d'onde au milieu de bruit par les distinctions des propriétés statistiques entre les signaux et entre les signaux et les bruits. On observe plusieurs échantillons de quelques minutes de signaux avec quelques antennes. On forme ainsi un espace des signaux. Dans cette espace, il est possible sur une bonne statistique de séparer sous espace de signal et sous espace de bruit. Il est aussi possible avec des hypothèses de séparer les directions d'arrivée des signaux. Ainsi, avec trois antennes, on peut détecter et séparer jusqu'à deux sources, deux fronts d'onde (et avec n antennes, on a la puissance de séparer n-1 sources). Mais la mer rétrodiffuse de toutes les directions, comment arriver à réduire la dimension de l'espace des signaux incidents à seulement quelques sources ?

Prenons,l'exemple d'un système à trois antennes : Une fois une distance choisie, donc une couronne sur la mer, l'idée consiste à pratiquer la transformation Doppler sur chacune des antennes. Ensuite on traite successivement, une par une, les raies Doppler porteuse d'énergie : une raie correspondant à une gamme étroite de vitesse radiale.

On essaie ainsi de séparer les contributions venant de la mer par leur vitesse radiale (vague + courant) et qu'ainsi, pour une vitesse donnée, il ne reste plus que zéro, une ou deux directions d'arrivée de fronts d'onde, que l'on va pouvoir extraire.

On voit tout de suite qu'en absence de courant, toutes les vagues de Bragg ont partout leur vitesse de phase nominale, tous les fronts d'onde ont les mêmes décalages Doppler (sur les deux vagues), il ne reste que deux raies à traiter sur le spectre, tout est superposé : la méthode ne marche pas. Cette situation est reconnaissable et donc la méthode marcherait tout de même. La difficulté persiste tout de même quand il y a peu de variation de courant dans le champ, ou quand il y a des situations de front complexe donnant plus que deux directions avec les mêmes vitesses de courant projeté.

Sur la zone ANTARES, le MIO utilise une méthode Direction d'Arrivée hybride, avec traitement de l'espace des signaux obtenu avec 8 antennes espacées.

Les méthodes DA ne permettent pas de reconstituer le spectre dans chaque direction et donc dans chaque cellule. Les méthodes DA donnent de quoi extraire la valeur du courant projeté dans une partie des cellules. Toutes les cellules de la carte ne sont pas généralement couvertes. Ce problème est accentué dans les zones où le courant projeté varie peu. Il faut donc appliquer à un stade ou l'autre du traitement un algorithme « raisonnable » de remplissage de la carte. Dans nos algorithmes, ce remplissage est fait lors de la construction des vecteurs courants de surface (courant complet).

#### **H.4. Construction des cartes de courants de surface**

Une station radar donne une information, une projection locale du courant de surface local. Pour construire le courant total, sa direction et son module de vitesse, il faut deux projections non colinéaires pour reconstruire le vecteur vitesse. Typiquement, on n'accepte les zones où les projections font entre elles un angle d'au moins 25 à 30°. Il faut donc deux lieux d'observations fournissant pour chaque cellule de mer deux directions de projection assez différentes.

Typiquement, on utilise deux stations radars, distantes d'une quarantaine de kilomètres. Chaque station donne une projection radiale, le long du rayon qui va et revient entre le radar et la cellule.

La zone de la mer où à la fois la portée est raisonnable et où les deux composantes font un angle suffisant est comprise entre deux arcs de cercle : les arcs capables. Le premier exclut ce qui est trop loin des radars, le second exclut une zone très près de la côte entre les deux radars.

On calcule les vitesses sur une grille rectangulaire régulière de points sur la mer. On utilise les solutions radiales présentes sur les grilles radiales au voisinage des points de la grille carrée pour calculer les vecteurs courants. La définition du voisinage est heuristique.

#### **H.5. Observation Mono-statique, Observation Bi- ou Multi-statique.**

Il n'est pas toujours possible d'installer une station radar complète où l'on préfère. On peut avoir avantage à placer en des endroits distincts l'émetteur et le ou les réseaux de réception. Il faut garantir la synchronisation parfaite de générateurs de forme d'ondes de l'émission et de la démodulation synchrone des récepteur. La société Helzel qui a développé nos radars a mis au point une telle synchronisation à partir d'horloges ultra-stables, synchronisées entre elles à partir des signaux des satellites GPS.

Dans le cas d'une observation bi-statique, les zones correspondant à un délai de propagation donné ne sont plus des couronnes circulaires avec le radar pour centre, mais des couronnes elliptiques avec émetteur et récepteur occupant chacun un des deux foyers communs à toutes les ellipses. Les vagues de Bragg sélectionnées sont de directions normales aux ellipses. Leurs longueurs d'onde varient partout dans l'espace. Très au large, on tend vers les paramètres monostatiques.

## **I. Les canaux radio attribués aux radars océanographiques lors de la conférence mondiale 2012 de l'Union Internationale des Télécommunications**

(la France fait partie de la région I)

### **Bandes attribuées (en kHz) lors de la WRC12**

<b>n°</b>	<b>ITU Region 1</b>	<b>ITU Region 2</b>	<b>ITU Region 3</b>	<b>Largeur de Bande absolue et relative</b>
1	4 438-4 488	4 438-4 488	4 438-4 488	50kHz (10/1000)
2	5 250-5 275	5 250-5 275	5 250-5 275	25kHz (5/1000)
3	9 305-9 355	No allocation	9 305-9 355	50kHz (5/1000)
4	13 450-13 550	13 450-13 550	13 450-13 550	100kHz (7/1000)
5	16 100-16 200	16 100-16 200	16 100-16 200	100kHz (6/1000)
6	24 450-24 600	24 450-24 650	24 450-24 600	150kHz (6/1000)
7	26 200-26 350	26 200-26 420	26 200-26 350	150kHz (6/1000)
8	39 000-39 500	No allocation	39 500-40 000	500k (10/1000)
9	42 000-42 500	No allocation	No allocation	500k (10/1000)

## **J. Sécurité des opérateurs, et du public, sensibilité des appareillages aux parasites**

La sensibilité des équipements radio et la performance des algorithmes de traitements permettent d'obtenir une portée supérieure à 100km avec seulement 30 Watt HF rayonnés. Ce niveau de radiation est compatible, à ces fréquences, avec la présence des opérateurs, même lors d'intervention auprès du champ d'antennes d'émission (fiche d'évaluation et de conformité disponible au laboratoire), et est conforme en tout point avec les normes d'exposition du public aux rayonnements non ionisants en vigueur, même à proximité des antennes ( $E < 28V/m$  pour  $d > 3m$ ).

On pourra lire le texte fondateur des normes applicables sur le site de l'ICNIRP <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlfr.pdf>.

Le balisage des installations est toutefois recommandé pour éviter la présence prolongée du public. Il faut finalement surtout éviter, au voisinage du réseau RX de réception, la présence d'équipements électroniques même de type grand public, éventuellement générateurs de parasites radio saturant.

Un Petit Clip Video (avi) non retraité : Courants de surface dans la partie est du Golfe du Lion du 16 au 17 juin 2005

