

Chapitre 0

Introduction

Les vingt dernières années ont connu une prise de conscience de problèmes liés à l'environnement. Celui-ci change à cause de l'impact des activités humaines sur les processus naturels qui contrôlent notre planète en tant que système. Pour la sauvegarde de la viabilité de la Terre, un effort de compréhension et de connaissance des phénomènes provoquant des variations dans le système Terre est nécessaire. Ces variations doivent être observées sur de grandes parties de la surface du globe. De par sa couverture globale et la répétabilité spatio-temporelle, la télédétection est la méthode la plus appropriée pour une mesure des indicateurs des états de l'environnement. L'un des changements importants de l'environnement est la modification des climats comme en témoigne l'évolution de la couverture des glaces, de l'étendue des déserts, de la fréquence des pluies, ... En particulier, l'observation globale de la surface des océans que, seule la télédétection est capable d'assurer, permet d'obtenir aux hyperfréquences des informations sur l'état de la mer, la vitesse du vent, le contenu en eau dans l'atmosphère, les caractéristiques de la pluie, ainsi que sur l'évolution à moyen terme de ces différents paramètres physiques.

C'est dans ce contexte que se situe cette thèse de doctorat. Elle s'inscrit dans le cadre d'une recherche visant à améliorer l'interprétation des mesures, effectuées à distance, de l'état de la

surface de la mer et des paramètres qui le déterminent (vitesse du vent, hauteur des vagues, ...) à l'aide d'une combinaison d'instruments hyperfréquences embarqués à bord de satellites. Cette recherche a été menée au Laboratoire de Télécommunications et Télédétection (TELE) de l'UCL dans le cadre de plusieurs études pour le compte de l'ESA (European Space Agency), du Service de la Politique Scientifique belge et de projets COST.

Par ailleurs, cette recherche met en relation deux disciplines différentes : la description physique de la surface de la mer et ses propriétés électromagnétiques aux hyperfréquences. En effet, la surface de la mer est une surface rugueuse qui émet, réfléchit et diffuse les ondes électromagnétiques en fonction de ses caractéristiques. Les objectifs à atteindre sont, d'une part, dégager les paramètres géophysiques qui décrivent l'état de la mer et, d'autre part, à l'aide de ceux-ci, obtenir les caractéristiques statistiques nécessaires à l'utilisation de la théorie électromagnétique de la diffusion et de l'émission par une surface rugueuse.

L'objet de cette thèse est de déterminer les propriétés statistiques spatiales et temporelles de la surface de la mer qui servent d'« entrées » au modèle électromagnétique, c'est-à-dire les données nécessaires pour l'application de la théorie de diffusion des ondes électromagnétiques aux hyperfréquences.

Avant d'introduire ce travail et de présenter les différents thèmes abordés, il nous semble important d'attirer l'attention du lecteur sur une de ses caractéristiques importantes. En effet, nous suivons une approche multidisciplinaire dans laquelle nous combinons les méthodes et les avancées de deux disciplines, la physique et les sciences de l'ingénieur. Qui plus est, nous abordons les deux volets du problème, la modélisation et le traitement des données, sous les angles de ces deux disciplines. Nous avons développé un modèle de la surface de la mer (approche physique) qui la décrit de manière

statistique, où elle est considérée comme une surface réfléchissante pour les ondes électromagnétiques émises par les instruments embarqués par un satellite (approche télédétection). De plus, l'originalité de ce modèle est qu'il comprend d'autres paramètres que le vent, comme la pente significative, qui intègre l'histoire des vagues. Nous appliquons ce modèle à des données de campagne de mesures par satellite et montrons qu'il permet d'améliorer l'estimation des paramètres de la mer : le vent est bien retrouvé, de même que les paramètres décrivant l'histoire des vagues. Ensuite, nous appliquons ce modèle physique à des mesures réalisées en mer par des bouées, ce qui nous permet de le valider. Finalement, nous confrontons des mesures effectuées en des moments et des endroits proches par un satellite et par des bouées. Cette comparaison de résultats obtenus « in situ » (bouées) et à distance (radars) constitue un des aspects originaux de ce travail.

Le modèle de la mer est utilisé lors de simulations réalisées pour répondre aux questions posées par l'ESA dans le cadre de ses contrats avec le Laboratoire TELE, à savoir l'intérêt d'utiliser la combinaison d'instruments hyperfréquences embarqués à bord de satellites. En outre, ce travail débouche sur une méthode concrète, traduite en programmes informatiques de traitement de données, implémentés et utilisés notamment au Laboratory for Hydrospheric Processes du NASA Goddard Space Flight Center à Wallops Island (USA). Les résultats obtenus dans ce laboratoire ont été publiés par Bliven et al. (1995) et Bliven et al. (1997).

En rédigeant ce document, nous voulons que celui-ci puisse servir aux praticiens des deux disciplines ; nous prenons donc le parti de décrire en détail les deux approches (physique et télédétection), même si certains lecteurs trouveront l'une ou l'autre partie trop détaillée. Par exemple, nous décrivons le modèle de diffusion électromagnétique par la surface de la mer au chapitre 1 et le profil de vitesse du vent au chapitre 2.

A l'aide de ce fil conducteur, présentons les développements de cette thèse. La surface de la mer est vue par un instrument hyperfréquence embarqué à bord d'un satellite, comme une surface plus ou moins rugueuse qui diffuse les ondes électromagnétiques, différemment selon ses caractéristiques de surface. Dès lors, dans le premier chapitre, nous mettons en évidence les données statistiques de la surface nécessaires à l'application du modèle électromagnétique de diffusion :

- le spectre radial des déplacements, $S(K)$,
- le spectre spatial des déplacements des vagues, $\gamma(\vec{K})$,
- la valeur r.m.s. des déplacements des petites vagues, σ_R ,
- le choix du nombre d'onde limite, K_b ,
- la fonction de densité de probabilité des pentes des grandes vagues, T ,
- la valeur r.m.s. des pentes des grandes vagues, σ_{LS} .

Ces propriétés statistiques décrivent des vagues de surface allant des houles aux vagues de capillarité. En effet, nous ne pouvons oublier d'intégrer les petites vagues dans les descriptions statistiques, car les hyperfréquences ont des longueurs d'onde telles qu'elles interagissent avec ces vagues de très petites longueurs d'onde comme sont les vagues de capillarité. En outre, ces petites vagues n'intéressent quasiment que la détection aux hyperfréquences, ce qui ouvre de nouvelles applications aux recherches géophysiques dans cette bande de fréquence. Par ailleurs, les calculs électromagnétiques de diffusion par une surface rugueuse composite se font selon une méthode à deux échelles, basée sur la décomposition de la surface de la mer en deux échelles de grandeur : les grandes ondulations et les petites. Le qualificatif « grande » ou « petite » se rapporte à la longueur d'onde de l'onde électromagnétique, c'est-à-dire que la coupure est fonction de la fréquence électromagnétique. Cette théorie est utilisée pour inverser les mesures de la mer obtenues par les satellites.

Au chapitre 2, nous décrivons les grandeurs observables utiles pour caractériser l'état de la mer et nous en présentons une synthèse structurée. Le vent qui souffle sur la mer est le paramètre communément utilisé à cette fin. En considérant la limite entre l'océan et l'atmosphère comme un flux turbulent, le vent peut être mesuré par deux vitesses : la vitesse de friction qui est une mesure du transfert vertical de quantité de mouvement entre l'air et l'eau et la vitesse du vent à une hauteur « z » au-dessus de la surface. Les auteurs relient ces deux vitesses en modélisant le profil de variation de la vitesse du vent avec la hauteur au-dessus de la surface, en utilisant soit le coefficient de traînée, soit la longueur de rugosité. Dans ce travail, nous proposons une nouvelle expression du coefficient de traînée, qui fait la synthèse des modèles antérieurs et qui, de plus, s'ajuste mieux aux données expérimentales. Nous proposons aussi une relation entre le coefficient de traînée et la longueur de rugosité.

Le vent ne peut être le seul paramètre d'état de la mer, car cet état change continuellement. L'état de la mer dépend de l'endroit d'observation, des forces agissant à cet instant (vitesse et direction du vent, ...) et des forces appliquées précédemment (nature, durée d'action, point d'application, intensité et direction). Dès lors, le vent, qui est une donnée instantanée, ne peut mesurer l'« histoire » de la surface de la mer. Pour cela, d'autres paramètres sont introduits et étudiés, comme la pente significative des vagues et l'inverse de l'âge de la vague. Une définition précise de ce paramètre est donnée et nous démontrons que, pour une mer pleinement développée, il est égal à 0,83, valeur utilisée de manière empirique dans la littérature. Toutes ces relations sont utilisées lors des traitements de données, présentés au chapitre 7.

Par ailleurs, il faut souligner que, pour l'altimètre et le diffusiomètre, aux hyperfréquences, la tache au sol est grande (de l'ordre de quelques kilomètres, voire quelques dizaines de kilomètres, de côté) et seul un traitement statistique de la surface peut être envisagé.

C'est ce point de vue statistique qui est abordé dans les chapitres 3 à 6.

La surface de la mer a été étudiée au chapitre 2, comme une surface déterministe. Mais son comportement spatio-temporel est aléatoire et une approche statistique est requise. Au chapitre 3, nous décrivons les variations aléatoires de la surface, par les fonctions de densité de probabilité des déplacements et des pentes et par le spectre des déplacements. Nous centrons ce chapitre sur la clarification des définitions des fonctions de densité de probabilité, des corrélations et des spectres. Ceci est nécessaire parce qu'il existe, dans la littérature, plusieurs définitions et plusieurs approches différentes et, dès lors, les spectres qui en résultent sont, eux aussi, différents (spectre en nombre d'onde, en fréquence, directionnel en nombre d'onde, en module de nombre d'onde, en fréquence, directionnel en fréquence, ... : tableau 3.1). Après avoir opéré cette clarification, nous mettons en évidence les relations entre ces différents spectres (figure 3.2 et tableau 3.2).

Ensuite, au chapitre 4, nous proposons un spectre des déplacements de la surface de la mer, qui couvre tous les domaines de fréquence des vagues, depuis les vagues de gravité jusqu'aux vagues de capillarité. Il est appelé UCL-3. L'originalité de ce modèle réside dans l'utilisation d'un spectre, pour les grandes vagues, qui est fonction de l'histoire de la mer - par les paramètres : pente significative, S , fréquence au pic du spectre, K_0 , et distance d'action du vent, x , - et, pour les petites vagues, qui est fonction du vent - par le paramètre vitesse de friction du vent, u^* . Cette description de l'état de la mer se veut aussi réaliste que possible : la structure à grande échelle est décrite à l'aide de paramètres qui caractérisent la forme de la surface de la mer et la structure à petite échelle, qui résulte de la réaction instantanée de la surface au vent local, est décrite à l'aide de ce seul paramètre.

Ce spectre comprend trois parties : une pour les vagues de gravité, une pour les vagues capillo-gravifiques et une pour les vagues capillaires. Pour la première, nous nous basons sur le spectre de Wallops; nous montrons que les mesures de Mac Clain et al. s'accordent bien avec celui-ci pour une mer en développement. Toutefois, nous introduisons une fonction d'accroissement du pic, γ^q , qui permet au pic d'avoir une forme plus pointue pour une mer en développement et une forme plus étale pour une mer développée. Nous montrons également que cette fonction ne peut être négligée, contrairement à ce qui est fait par d'autres auteurs. En effet, nous prouvons qu'elle influence l'amplitude du spectre, et donc la valeur r.m.s. des déplacements, et la variance des pentes, et donc le développement en série de la partie angulaire du spectre. La deuxième partie se base sur le spectre de Toba. Nous proposons de modifier l'amplitude de ce spectre, pour être plus proche de la réalité des mesures. La troisième se base sur le spectre de Cox. Nous démontrons que ces deux spectres (Toba et Cox) ont un impact négligeable sur la variance des déplacements de la surface de la mer.

La fonction d'accroissement du pic et la modification de l'amplitude du spectre de Toba, que nous proposons ici, contribuent à l'amélioration du traitement des données (chapitre 7) : toutes les vitesses du vent peuvent dorénavant être estimées, alors que, précédemment, 5,4 % ne pouvaient l'être.

La dernière caractéristique des spectres, qui n'a pas été encore analysée dans ce travail, est leur fonction angulaire. Dans la première partie du chapitre 5, le spectre directionnel pour les radars est défini et un modèle UCL-3 est proposé, après comparaison avec le modèle Elfo.

Ensuite, la partie la plus originale compare le spectre directionnel de la bouée BEATRICE avec le spectre directionnel qu'un satellite aurait mesuré en passant au-dessus de cette bouée. L'ambiguïté à 180° qui existait dans les mesures radars et les mesures en mer est levée. Nous

émettons des hypothèses qui expliquent les différences entre eux. En particulier, celles-ci proviennent des bandes de fréquence différentes dans lesquelles le radar et la bouée effectuent leurs mesures.

Les données enregistrées par la bouée BEATRICE ont été obtenues auprès de la subdivision des Etudes Générales (B1) du Service Technique des Phares et Balises (STPB, France), où nous avons réalisé plusieurs stages. Ceux-ci ont consisté en une initiation aux mesures des états de mer, à leur interprétation et à l'application de ces mesures au spectre directionnel par l'utilisation d'un algorithme de traitement, développé en collaboration avec le centre IFREMER de Brest.

Nous avons, par ailleurs, appliqué cet algorithme aux données expérimentales de la bouée-phare BEATRICE, ce qui n'avait pas encore été effectué, et nous en avons analysé les caractéristiques, particulièrement l'importance des contraintes de minimisation. L'apport original, dans cette partie, est constitué :

- de l'introduction de deux nouveaux modèles « a priori », comme modèles initiaux de l'algorithme ;
- de l'analyse de l'impact du modèle « a priori » sur le spectre directionnel ajusté ;
- de la définition des critères de rejet de certains modèles « a priori » ;
- de la sélection des critères pour le choix du spectre le plus satisfaisant, c'est-à-dire le plus proche du spectre mesuré, sur base d'une analyse systématique des spectres directionnels obtenus par l'application de l'algorithme aux données de la bouée-phare.

A ce stade, il manque encore l'information sur la densité de probabilité (p.d.f.) des pentes de la surface pour que le modèle électromagnétique de la diffusion par la surface de la mer aux hyperfréquences puisse être utilisé, ce qui fait l'objet du chapitre 6.

La fonction de densité de probabilité des pentes ne peut être bien approximée par une courbe de Gauss et les écarts par rapport à la gaussienne sont modélisés selon l'approche de Cox & Munk qui utilise les développements en série de Gram-Charlier. En se basant sur leurs mesures, Cox & Munk proposent une variation linéaire des variances des pentes des grandes vagues en fonction de la vitesse du vent. Par ailleurs, celles-ci sont aussi définies par intégration du spectre des pentes et une comparaison montre que la variation linéaire n'est valable que sur un petit domaine de vitesse du vent, domaine couvert par les mesures de Cox & Munk. De plus, ce modèle n'évolue qu'en fonction de la vitesse du vent. C'est pourquoi nous introduisons une approche qui utilise la pente significative des vagues comme paramètre de la p.d.f. des pentes.

Il est scientifiquement intéressant d'élaborer de nouveaux modèles mais ceux-ci ne peuvent être satisfaisants que s'ils fournissent de meilleurs résultats. Au chapitre 7, le modèle UCL-3, développé dans cette thèse, est utilisé dans le calcul des valeurs mesurées par les instruments embarqués et leur comparaison avec des mesures réelles. Nous traitons successivement les points suivants :

- la description des données (bouées, ECMWF, satellites) ;
- la base commune de données ;
- l'inversion des données de la mission TANDEM ;
- la comparaison des mesures radars et bouées.

Il faut souligner qu'il est exceptionnel de disposer de données concomitantes de satellites et de bouées. C'est le cas de la mission TANDEM (satellites ERS-1 et ERS-2) dont les mesures sont conjointes avec celles des bouées NOAA.

En ce qui concerne la base commune de données, nous avons mis au point une technique de groupement des données radars, qui permet la comparaison avec les données bouées. Ensuite, nous présentons les améliorations, apportées par cette thèse, au traitement des données de la mission TANDEM. Nous montrons que notre modèle permet, d'une part, de retrouver toutes les vitesses de vent et, d'autre

part, que le domaine des pentes significatives retrouvées est plus étendu. Enfin, et c'est aussi une partie originale de ce travail, nous comparons la vitesse du vent, l'inverse de l'âge de la vague et la pente significative retrouvés par les satellites et ceux mesurés par les bouées.

Un des aspects originaux de la thèse est donc constitué par la combinaison des apports de deux disciplines différentes (la physique et la télédétection). Son objet est essentiellement pratique ; ce n'est pas le caractère complet (au sens de l'océanographie) du modèle statistique de la mer qui est visé mais son impact sur une meilleure utilisation dans la télédétection aux hyperfréquences. D'une part, l'introduction de paramètres supplémentaires offre la possibilité de mesurer l'« histoire » des vagues. D'autre part, le modèle statistique proposé couvre une gamme de vagues plus large, domaine peu étudié en télédétection jusqu'à l'embarquement d'appareils aux hyperfréquences dans les satellites. Un autre aspect original, qui, en outre, a été peu développé dans la littérature jusqu'à présent, est la comparaison des valeurs mesurées par les instruments embarqués avec des mesures réelles en mer tant pour la vitesse du vent, la pente significative ou l'inverse de l'âge de la vague que pour la partie angulaire du spectre des déplacements de la surface. Enfin, le modèle UCL-3 est un modèle opérationnel, i.e. utilisable en pratique, puisqu'il a été confronté à des données globales tirées de campagnes de mesures.