

Chapitre 7

Comparaisons des traitements de données radars et de données radars - bouées

7.1 Introduction

Il est scientifiquement intéressant d'élaborer de nouveaux modèles mais ceux-ci ne peuvent être satisfaisants que s'ils fournissent de meilleurs résultats. Dans ce chapitre, 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. 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.

Nous traitons successivement les points suivants :

- la description des données (bouées NOAA, ECMWF, satellites ERS-1 et ERS-2) ;
- la base de données commune aux satellites (ERS-1 et ERS-2) et aux bouées (NOAA) ;
- l'inversion des données de la mission TANDEM ;
- la comparaison originale des mesures à distance et « in situ ».

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 d'une campagne particulière de mesures par satellites ERS-1 et ERS-2, qui est conjointe avec des mesures par bouées NOAA. 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, nous comparons la vitesse du vent, la pente significative et l'inverse de l'âge de la vague retrouvés par les satellites et ceux mesurés par les bouées. Ceci constitue une comparaison originale de mesures à distance et « in situ ».

7.2 Description des données

Nous avons à notre disposition un certain nombre de données provenant de différents instruments de mesure. Dans un premier temps, nous décrivons chacune d'elles avec leurs particularités.

7.2.1 Données des bouées

Les bouées NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont situées dans l'Océan Atlantique, l'Océan Pacifique Nord et le Golfe d'Alaska. Une situation détaillée est présentée en annexe 7.1 et les bouées sont localisées sur la carte ci-dessous (figure 7.1). Elles fournissent à la fois des données météorologiques standard, des profils de courant dans la mer, des données sur le vent, des données de spectres de vagues, des niveaux d'eau et des mesures de courants. Les données fournies par les bouées NOAA avant l'an 2000 ne contiennent pas d'information sur le spectre directionnel.

Nous en avons extrait les données qui nous intéressent dans la perspective d'une comparaison avec les mesures de satellites, à

savoir :

WD : direction du vent moyen¹ sur une période de huit minutes, mesurée toutes les heures (en degrés, comptés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord), notée aussi $\phi(U)$;

WSPD : vitesse du vent moyen² sur une période de huit minutes, mesurée toutes les heures (en mètres par seconde), notée aussi $U_{\text{bouée}}$;

WVHT : hauteur significative des vagues, calculée comme la moyenne du tiers des vagues les plus hautes pendant une période d'échantillonnage de vingt minutes (en mètres), notée aussi $H_{1/3}$;

DPD : période de la vague dominante qui est la période des vagues avec le maximum d'énergie (en secondes), notée aussi T_0 .

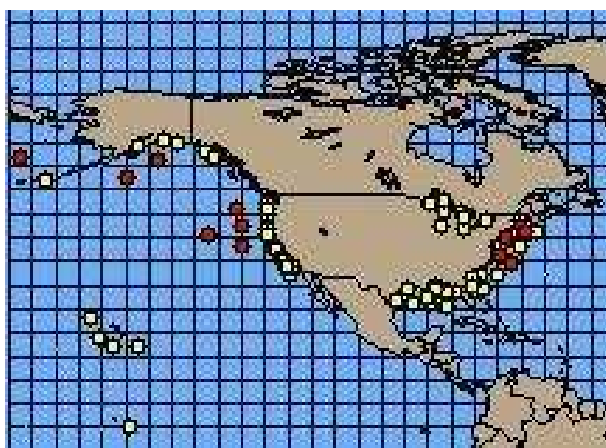


Figure 7.1 : Carte de localisation des bouées NOAA

Les caractéristiques des mesures effectuées par les instruments embarqués sur ces bouées sont décrites à la table 7.1.

¹ On détermine pour chaque observation un vecteur de longueur unitaire pointant dans la direction du vent ; les moyennes des coordonnées sont calculées ; la direction du vent moyen est alors obtenue de $\arctan(x/y)$.

² La vitesse du vent moyen est la moyenne arithmétique des observations de vitesse du vent.

PARAMETER	CODE	RANGE	FREQ.	AVG. PERIOD	RESOLUTION	ACCURACY
WIND DIR.	WD	0 to 360	1,0 Hz	2/8 min	1,0 deg	+/- 10,0 deg
WIND SPEED	WSPD	0 to 62 m/s	1,0 Hz	2/8 min	0,1 m/s	+/- 1,0 m/s
WIND GUST		0 to 82 m/s	1,0 Hz	5 sec	0,1 m/s	+/- 1,0 m/s
AIR TEMP.		-40 to 50 C	1,0 Hz	2/8 min	0,1 C	+/- 1,0 C
PRESSURE		800 to 1100 hpa	1,0 Hz	2/8 min	0,1 hPa	+/- 1,0 hPa
WATER TEMP.		-6 to 40 C	1,0 Hz	2/8 min	0,1 C	+/- 1,0 C
WAVE HEIGHT	WVHT	0 to 35 m	2,56 Hz	20 min	0,1m	+/- 0,2 m
WAVE PERIOD	DPD	0 to 30 sec	2,56 Hz	20 min	1,0 sec	+/- 1 second
WAVE SPECTRA		0 to 999 m*m/Hz	2,56 Hz	20 min	0,01 Hz	+/- 0,01 Hz
WAVE DIR.		0 to 360	2,56 Hz	20 min	0,1 deg	NA
REL. HUMIDITY		0 to 100 %	Special	3-5 samples	0,10%	+/- 6 %
SOLAR RADIATION		0 to 2150 w/m*m	1,0 Hz	2/8 min	0,5 w/m*m	+/- 5 %
PRECIPITATION		0 to 999 mm	Cont.	6 hr#	1,0 mm	+/- 5 mm

Table 7.1 : Caractéristiques des mesures des bouées NOAA (d'après <http://seabord.ndbc.noaa.gov>, 2003)

Il s'agit d'un ensemble de mesures répertoriées par le NOAA sous le nom « DACT Payload ».

7.2.2 Données ECMWF

Ce sont des données « in situ » composées à partir des mesures des profils atmosphériques ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecast). Les produits ECMWF couvrent une grille de 1,125° latitude X 1,125° longitude, c'est-à-dire environ 100 X 100 km à l'équateur. Elles couvrent l'Atlantique Nord. Elles sont réanalysées toutes les six heures, et, par interpolation, on peut obtenir une valeur pour un temps déterminé. Les données ECMWF relatives au vent, à savoir sa vitesse (en mètres par seconde) et sa direction (en degrés) nous ont été fournies par l'ESA. Les vents ECMWF servent de valeurs de comparaison mais ne sont pas utilisés dans la procédure d'inversion (annexe 7.2).

7.2.3 Données de satellites

Les données de satellites sont celles de la mission TANDEM (ESA). Il s'agit des satellites ERS-1 et ERS-2, chacun ayant un altimètre en bande Ku et un diffusiomètre en bande C. Les deux altimètres et les deux diffusiomètres sont identiques. Leurs caractéristiques sont présentées à la table 7.2.

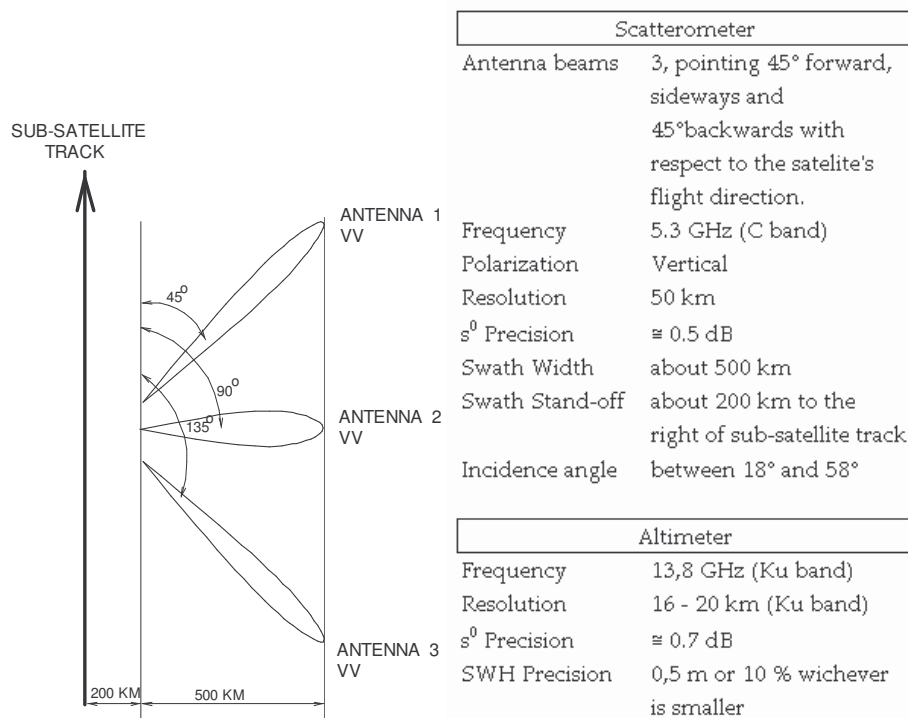


Table 7.2 : Caractéristiques des instruments de ERS-1 et ERS-2 (Lemaire, 1998)

Des ensembles de données ont été établis en combinant les données du diffusiomètre d'ERS-1 avec celles de l'altimètre d'ERS-2. Le décalage temporel maximal d'acquisition des données est de 32 minutes. Le décalage spatial maximal est tel que

$$\sqrt{(\Delta \text{latitude})^2 + (\Delta \text{longitude})^2} = 0,45$$

soit environ 50 km de l'Equateur. Des données ainsi colocalisées pour le diffusiomètre d'ERS-1 et l'altimètre d'ERS-2 existent et ont été enregistrées les 05/09/1995, 07/01/1996 et 29/04/1996, sur deux traces entre 30° et 60° de latitude Nord et Sud dans l'Océan Atlantique.

Nous allons commencer par analyser les données des satellites pour identifier la contribution du modèle de la mer, développé dans cette thèse. Nous comparerons les résultats obtenus par l'inversion des données de satellites avec les mesures des bouées.

7.3 Base de données commune

7.3.1 Construction de la base des données

Une base de données commune aux informations données par les bouées, par le ECMWF et par la mission TANDEM a été constituée. Elle englobe les trois sources pour un même instant et un même lieu : du 02/09/1995 au 24/05/1996 et à l'endroit des bouées.

Une bouée fournit la vitesse et la direction du vent et la hauteur significative à l'endroit où elle se situe pour un temps moyen de 8 ou 20 minutes : ce sont des moyennes temporelles en un endroit. Ces mesures sont considérées en parallèle avec les mesures de satellite. Dans la banque de données de la mission TANDEM, nous sélectionnons les passages de ERS-1 et ERS-2 qui sont concomitants avec les mesures d'une bouée. Les satellites, en passant au-dessus de la zone où se situe la bouée, réalisent une mesure instantanée d'une tache au sol. La vitesse et la direction du vent et la pente significative qui en résultent sont donc des valeurs instantanées selon une moyenne spatiale. Mais l'altimètre et le diffusiomètre ne prennent pas leurs mesures de la même manière : pour une seule tache au sol du diffusiomètre de ERS-1, correspondent plusieurs taches au sol de l'altimètre d'ERS-2. Finalement, le quadrillage météo fournit aussi un vent pour chaque tache au sol du diffusiomètre d'ERS-1. La figure 7.2 illustre cette situation. Que peut-on espérer tirer de cette configuration, comment utiliser ces différentes sources en vue d'une comparaison de ce que chaque instrument a mesuré ?

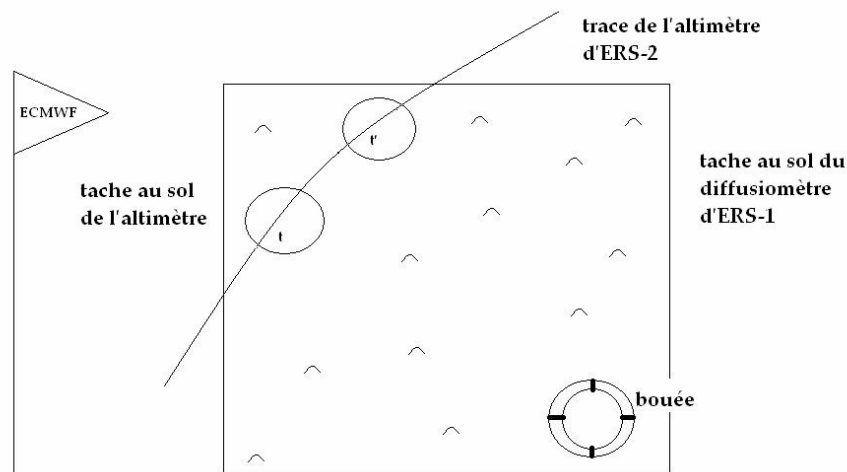


Figure 7.2 : Situation physique de la base de données « in situ » - à distance

7.3.2 Comparaison des données

Nous disposons de 44 mesures des bouées, soit de 44 valeurs de la vitesse du vent, U , de la direction du vent, $\phi(U)$, de la hauteur significative des vagues, $H_{1/3}$ et de la période de la vague contenant le maximum d'énergie, T_0 . A chaque mesure d'une bouée correspondent de 1 à 12 taches au sol du diffusiomètre d'ERS-1, soit de 1 à 12 valeurs moyennes de la vitesse de friction du vent, u^* , $\phi(U)$ et de la pente significative, ξ . Pour chaque tache au sol du diffusiomètre correspondent une valeur de U et $\phi(U)$ de l'ECMWF.

Pour chaque tache au sol du diffusiomètre d'ERS-1 correspondent de 1 à 16 taches au sol de l'altimètre d'ERS-2, soit de 1 à 16 valeurs de u^* et ξ retrouvées par l'inversion. Mais, on dispose aussi de 1 à 16 valeurs du $H_{1/3}$ fournies par l'instrument. C'est pourquoi, pour permettre une comparaison entre bouées et radars, nous retenons, pour chaque tache au sol du diffusiomètre, une seule valeur de l'altimètre, qui est la moyenne des valeurs retrouvées pour chaque tache au sol de l'altimètre. De cette façon, les valeurs de l'altimètre - permettant une inversion plus performante grâce à la synergie des

instruments - sont prises en compte. En effet, pour le vent, la valeur moyenne obtenue est différente de la valeur unique du diffusionmètre. De plus, pour la pente significative, l'altimètre est absolument nécessaire.

Cette démarche s'intègre très bien dans une comparaison « à distance » et « in situ » : les bouées fournissent des valeurs moyennes temporelles que l'on va comparer aux satellites qui fournissent des valeurs moyennes spatiales.

7.3.3 Erreurs relatives des paramètres géophysiques radars et bouées

Ce paragraphe présente une synthèse des erreurs relatives sur les paramètres géophysiques (table 7.3), dans des conditions moyennes de mer et de vent. A partir de la table 7.1, ces erreurs relatives sur les paramètres géophysiques mesurés par les bouées sont obtenues. Pour U , $H_{1/3}$ et T_0 , le rapport entre la précision de la mesure et la valeur moyenne fournit l'erreur relative en %. L'erreur relative sur la pente significative est la somme de celle sur $H_{1/3}$ et de deux fois celle sur T_0 ($\S$ est proportionnel à $H_{1/3}$ et inversement proportionnel à T_0^2 ; équation (7.7), section 7.5.3). L'erreur relative sur l'inverse de l'âge de la vague est la somme de celles sur U et sur T_0 (Ω est proportionnel à U et inversement proportionnel à T_0 ; équation (7.4), section 7.5.2).

Selon Lemaire (1998), les erreurs relatives pour les radars ont les valeurs suivantes :

(1) l'erreur relative sur $H_{1/3}$ est de 10 % :

$$\varepsilon(H_{1/3}) = 10 \% \quad (7.1)$$

(2) celle sur K_0 est la somme de celles sur $H_{1/3}$ et $\S$ et vaut 15 % :

$$\varepsilon(K_0) = \varepsilon(H_{1/3}) + \varepsilon(\S) = 15 \% \quad (7.2)$$

(3) celle sur Ω est la somme de celle sur U et la moitié de celle sur K_0 et vaut de 15 à 20 % :

$$\varepsilon(\Omega) = \varepsilon(U) + \frac{1}{2} \varepsilon(K_0) = 15 \text{ à } 20 \% \quad (7.3)$$

En combinant (7.1) et (7.2), on obtient l'erreur relative sur ξ :

$$\varepsilon(\xi) = 5 \%$$

En combinant (7.2) et (7.3), on obtient celle sur U :

$$\varepsilon(U) = 7,5 \% \text{ à } 12,5 \%$$

Nous synthétisons les différentes erreurs relatives pour les radars et les bouées à la table 7.3.

	Radars	Bouées	Code
U	7,5% à 12,5%	8%	WSPD
$H_{1/3}$	10%	5%	WVHT
T_0		10%	DPD
K_0	15%		
ξ	5%	25%	
Ω	15% à 20%	16%	

Table 7.3 : Erreurs relatives sur les paramètres géophysiques dans des conditions moyennes

7.4 Inversion des mesures de satellites

7.4.1 Méthode d'inversion

A partir des modèles électromagnétiques et de surface de l'océan développés aux chapitres précédents, une procédure d'inversion en synergie a été élaborée : elle traite des mesures hyperfréquences provenant de divers instruments. Cette méthode est expliquée en annexe 7.2.

7.4.2 La mission TANDEM

Lemaire (1998) a analysé les paramètres géophysiques retrouvés par inversion à partir de toutes les données de la mission TANDEM. Nous donnons un résumé de ses résultats dans cette section. Lemaire utilise, pour la description de la surface de la mer, le modèle UCL-2, basé sur les travaux de Baufays (1988a, 1988b et 1990) dont il amélioré

certain aspects. Cette section présente les résultats obtenus avec UCL-2. Ainsi, la sensibilité de la méthode d'inversion aux données radars est connue.

a) Les entrées et les sorties

L'ensemble des données requises consiste en les caractéristiques géométriques et instrumentales des senseurs et le NRCS (Normalized Radar Cross Section) fourni par chaque antenne des altimètres et diffusiomètres. La forme de l'impulsion de retour de l'altimètre est aussi nécessaire pour retrouver la hauteur significative des vagues ($H_{1/3}$). L'ensemble des paramètres géophysiques retrouvés consiste en la vitesse de friction du vent, u^* , la direction du vent, $\phi(U)$ et la pente significative, β .

b) Configuration optimale des instruments

Lemaire (1998) a montré que l'altimètre est très sensible à la pente significative, β , et que le diffusiomètre est sensible à la vitesse du vent, u^* , et à β . En mêlant les mesures d'un diffusiomètre et d'un altimètre, on augmente le contenu des informations dans l'ensemble des données d'entrée. En effet, le diffusiomètre est principalement sensible à la petite échelle de la surface, dont la structure est dominée par les effets du vent, tandis que l'altimètre est principalement déterminé par la surface à grande échelle qui est affectée par l'état de la mer. Lemaire (1998) a montré que les résultats pour le vent sont meilleurs quand on utilise les données de l'altimètre d'ERS-2 combinées avec celles du diffusiomètre d'ERS-1 que quand on les traite séparément. C'est donc la configuration optimale et elle se retrouve dans la mission TANDEM.

c) Vitesse du vent retrouvée dans la mission TANDEM

Pour estimer la validité de la méthode d'inversion, le paramètre géophysique retrouvé, u^* , est comparé aux prévisions

météorologiques. Leur indépendance vis-à-vis des données de satellites permet la comparaison avec les paramètres géophysiques retrouvés à partir des mesures des satellites. Les données ECMWF sont donc considérées comme une référence dans les comparaisons et pas comme une vérité de terrain.

La figure 7.3 présente le vent retrouvé à partir des données de la mission TANDEM en fonction du vent ECMWF. La pente des valeurs de vitesse de vent retrouvées en fonction des valeurs ECMWF est proche de l'unité.

Les résultats de Lemaire (1998) montrent que, pour les vitesses de vent modérées, l'erreur sur la vitesse du vent en utilisant le modèle physique est du même ordre de grandeur qu'avec les modèles empiriques. Par contre, pour les vents forts, cette approche constitue une amélioration très intéressante par rapport aux modèles empiriques. En effet, l'utilisation des modèles empiriques pour les grands vents correspond à une extrapolation des expressions pour des valeurs de vitesse de vent où peu de mesures étaient disponibles.

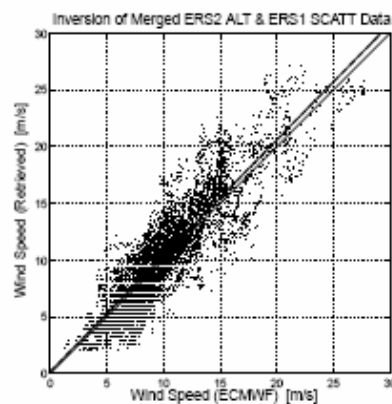


Figure 7.3 : Vent retrouvé en fonction du vent ECMWF pour la mission TANDEM (Lemaire, 1998)

d) Direction du vent retrouvée dans la mission TANDEM

Pour la direction du vent, les grandeurs ECMWF ont aussi été prises comme référence. Lemaire (1998) constate que l'utilisation de la fonction de Yueh, décrivant la modulation des petites vagues par les

grandes, diminue le pourcentage de vecteurs vent retrouvés avec une direction opposée à la direction correcte. Cependant, cela augmente aussi la déviation standard des erreurs sur la direction et la vitesse du vent. Nous n'avons pas analysé plus avant ce paramètre, parce que nous avons concentré notre travail sur la vitesse du vent, la pente significative et l'inverse de l'âge de la vague.

e) Pente significative retrouvée dans la mission TANDEM

Avec la configuration de la mission TANDEM, la pente significative est retrouvée avec le vecteur vent. Nous présentons deux exemples de résultats extraits de Lemaire (1998). La figure 7.4 donne l'histogramme de la pente significative retrouvée. On peut constater que la moyenne se situe aux alentours de 0,65 %, une valeur correspondant à des mers complètement développées ($\S = 0,63$ % à plein développement, selon la formule de Pierson). La figure 7.5 donne la pente significative retrouvée en fonction de la vitesse du vent, ainsi que plusieurs relations empiriques proposées dans la littérature. Les relations empiriques utilisées aux figures 7.5, 7.6 et 7.7 sont présentées à l'annexe 7.3. Le domaine de valeurs de $\S$, trouvées après inversion, se situe entre les différentes relations empiriques proposées dans la littérature.

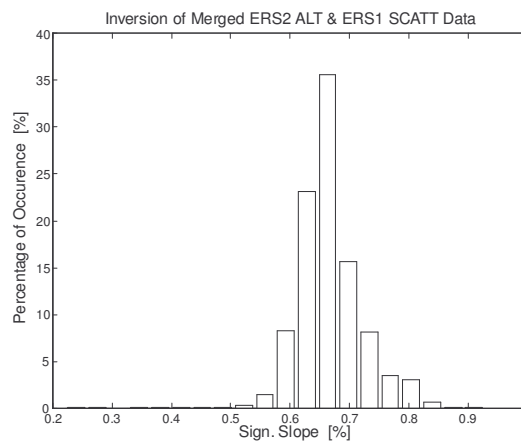


Figure 7.4 : Distribution de la pente significative pour la mission TANDEM (Lemaire, 1998)

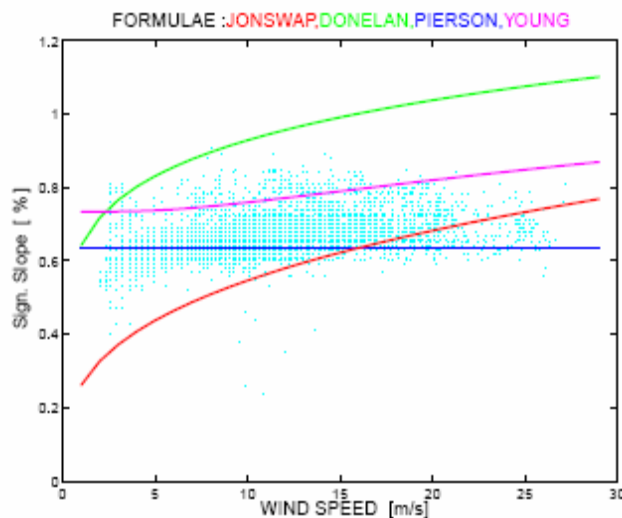


Figure 7.5 : Pente significative en fonction de la vitesse du vent, comparée à différentes relations empiriques, mission TANDEM (Lemaire, 1998)

f) Inverse de l'âge de la vague retrouvée dans la mission TANDEM

Avec la valeur de la pente significative, $\mathcal{S}$, retrouvée et la valeur de $H_{1/3}$ mesurée par l'écho de l'altimètre, il est possible d'étudier un autre paramètre d'état de mer, l'inverse de l'âge de la vague, Ω (équation (7.5)). L'erreur relative sur Ω est de l'ordre de 15 à 20 % pour des conditions moyennes (table 7.3).

La figure 7.5 présente l'évolution de la pente significative, $\mathcal{S}$, en fonction de la vitesse du vent. La figure 7.6 présente les valeurs de $H_{1/3}$ obtenues à partir des échos de ERS-2, utilisées pour l'inversion des données de la mission TANDEM, en fonction du vent. En traits pleins, se trouvent aussi les relations empiriques de $H_{1/3}$ en fonction de la vitesse du vent.

Il faut noter que, à faible vitesse du vent, $H_{1/3}$ est plus grand que la valeur prédite à plein développement par Pierson. Ceci indique que, pour les vents faibles, des vagues plus grandes créées par des vents plus forts (soit à cet endroit, soit à un autre endroit) sont présentes.

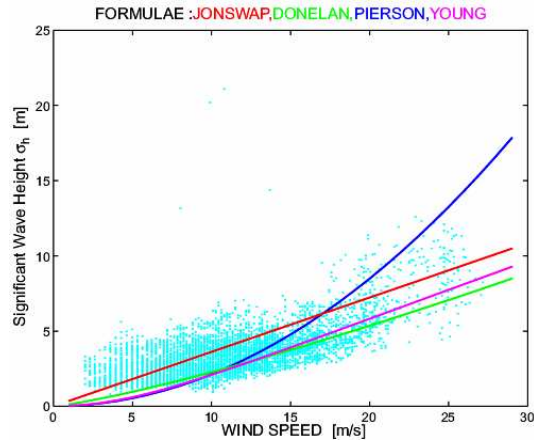


Figure 7.6 : $H_{1/3}$ en fonction de la vitesse du vent pour la mission TANDEM (Lemaire, 1998)

En combinant les valeurs de ξ de l'inversion et celles de $H_{1/3}$ de l'altimètre, on obtient l'inverse de l'âge de la vague, Ω . La figure 7.7 présente l'évolution de ce paramètre en fonction de la vitesse du vent. Les courbes en traits pleins représentent les relations empiriques de Ω en fonction de la vitesse du vent. A nouveau, il y a une bonne correspondance entre le domaine de valeurs de Ω et les relations empiriques.

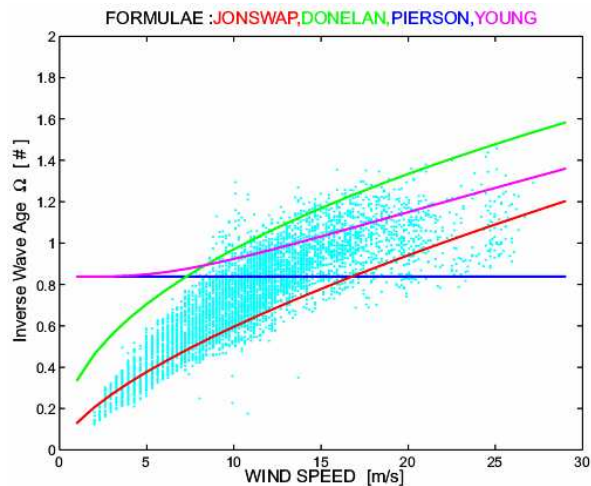


Figure 7.7 : L'inverse de l'âge de la vague en fonction du vent, pour la mission TANDEM (Lemaire, 1998)

Une valeur inférieure à 0,84 se trouve pour des grandes vagues créées précédemment par des conditions de vent plus fortes. C'est le cas pour les vents faibles, les vagues sont « sur-développées », Ω approche la valeur de 0,84 à plein développement. Pour des mers développantes, où la vitesse de phase des vagues s'approche progressivement de la vitesse du vent, Ω diminue pour approcher la valeur de 0,84. De grandes valeurs de Ω se trouvent principalement pour des grands vents, montrant que celui-ci ne peut se maintenir suffisamment longtemps pour atteindre le plein développement. La figure 7.8 donne l'histogramme des valeurs retrouvées pour Ω . La valeur moyenne est 0,74, soit un peu inférieure à la valeur de 0,84.

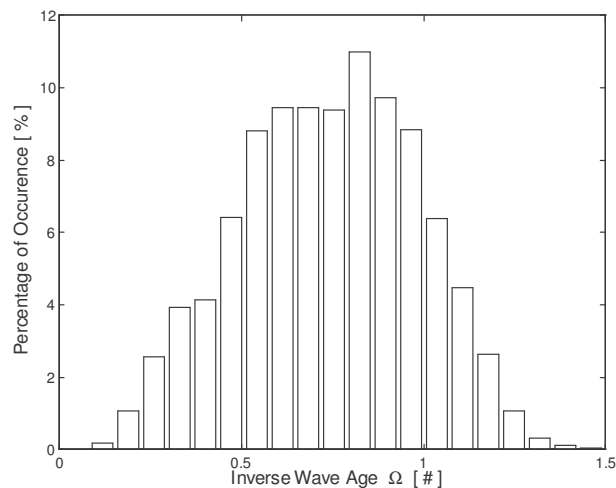


Figure 7.8 : Distribution de l'inverse de l'âge de la vague, pour la mission TANDEM (Lemaire, 1998)

7.4.3 Améliorations apportées par cette thèse

L'ensemble des données qui nous a intéressé est constitué d'une partie de l'ensemble des données de la mission TANDEM (section 7.3). Une première inversion a été réalisée avec le modèle UCL-2, qui ne contient pas les améliorations apportées par cette thèse. L'inversion réalisée avec le modèle UCL-2 présente cependant un inconvénient : environ 5,4 % des inversions ne convergent pas ou échouent sans qu'une valeur de vitesse du vent ne puisse être

retrouvée. Ce problème est résolu quand nous apportons les modifications suivantes au modèle UCL-2 pour obtenir le modèle UCL-3 :

- la valeur de z_0 est modifiée pour tenir compte de ce qui est proposé au chapitre 2 afin de lier vitesse de friction et vitesse du vent,
- la fonction d'accroissement du pic avec son impact sur l'amplitude du spectre est introduite comme expliqué au chapitre 4,
- le paramètre α_g du spectre de Toba (utilisé dans le spectre complet) est modélisé différemment, comme introduit au chapitre 4.

Une vitesse du vent sur vingt n'est pas retrouvée si les modifications proposées par cette thèse ne sont pas introduites dans le calcul de l'inversion des mesures radars. Mais les situations où c'est le cas ne sont pas réparties uniformément à travers l'ensemble des données. Les vitesses non retrouvées avec UCL-2 ont tendance à être groupées dans les mêmes fichiers (11 fichiers sur 44) et à concerner des mesures consécutives. Seulement 8 % des vitesses non retrouvées sont isolés. Par ailleurs, deux fichiers n'ont aucun vent retrouvé (le set 7 et le set 24) et un fichier ne contient que 20 % de vents retrouvés (set 42). Finalement, si le vent n'est pas retrouvé, le programme propose une valeur pour la pente significative, qui est erronée : en moyenne, elle vaut 1,2 % contre 0,65 % pour les autres données.

La figure 7.9 présente les valeurs de pente significative retrouvées par l'inversion avec UCL-3³ en fonction de celles retrouvées avec UCL-2⁴. Le nouveau modèle, UCL-3, présente une sensibilité plus grande à ce paramètre : à un § retrouvé avec UCL-2 correspondent plusieurs § retrouvés avec UCL-3. Le domaine couvert avec UCL-2 est de 0,55 %

³ Il s'agit d'une valeur moyenne sur toutes les données satellites qui correspondent à une seule donnée de bouée.

⁴ Les valeurs obtenues pour des vents non retrouvés par UCL-2 ont été éliminées.

à 0,78 % contre 0,48 %⁵ à 0,96 % pour le modèle modifié, UCL-3. Ce domaine de variation se rapproche plus du domaine de variation de la pente significative mesurée par les bouées.

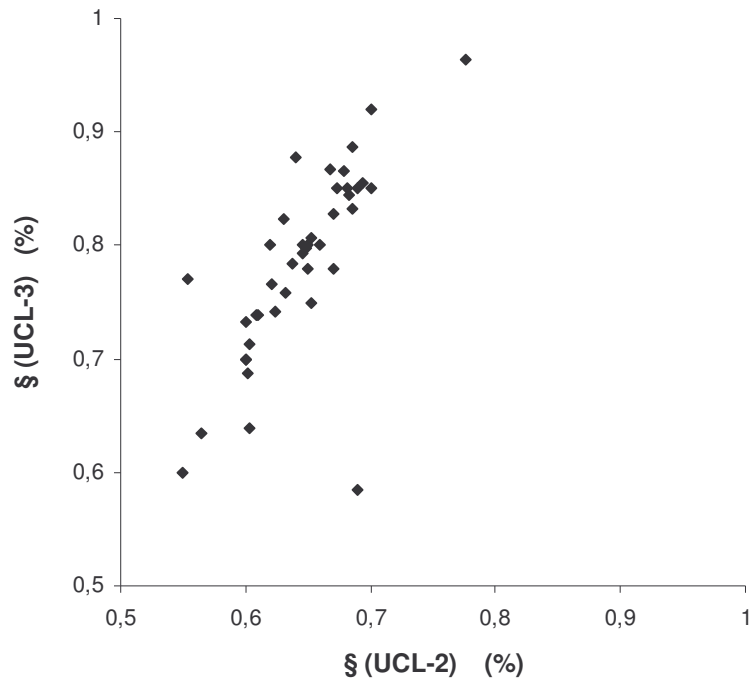


Figure 7.9 : Pente significative retrouvée avec UCL-3 en fonction de celles retrouvées avec UCL-2

Il en résulte que :

1. toutes les vitesses du vent sont à présent retrouvées ;
2. le domaine des valeurs de la pente significative est plus élevé sans que les valeurs des grandeurs et directions du vent n'aient sensiblement changés.

⁵ Cette valeur n'apparaît pas sur la figure car elle a été calculée pour le set 42, pour lequel le vent n'était pas retrouvé par UCL-2 et pour lequel la valeur de § n'a donc pas été retenue.

7.5 Comparaisons des mesures bouées et radars

7.5.1 Vitesse du vent

La table 7.4 présente l'ensemble des vitesses de vent retrouvées par l'inversion, U_{inv} et $U_{inv}(moy)$, et par les bouées, $U_{bouée}$. Pour chaque valeur du vent de la bouée, $U_{bouée}$, correspondent de 1 à 12 valeurs du vent radars, U_{inv} . S'il y en a plusieurs, nous calculons une valeur moyenne, $U_{inv}(moy)$.

	$U_{bouée}$	$U_{bouée}$ à 10 m	U_{inv} (moy)	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}	U_{inv}
Set 1	0,4	0,4	4,4	4,4											
Set 2	11,2	12,0	12,3	11,8	10,8	12,1	11,6	13,5	12,4	14,1					
Set 3	7,1	7,6	7,9	7,8	8,0										
Set 4	11,5	12,3	19,0	18,4	19,2	19,3									
Set 5	8,2	8,7	7,6	8,2	7,8	8,2	7,8	7,5	7,8	7,5	7,3	7,1	7,1	7,3	
Set 6	2,4	2,5	3,6	3,8	3,3	3,5	3,8								
Set 7	2,7	2,8	3,8	3,8											
Set 8	10,3	11,0	15,2	14,0	15,2	15,0	15,4	15,4	15,7	15,7					
Set 9	5,5	5,8	4,2	3,8	4,1	4,6									
Set 10	7,1	7,6	7,2	7,5	7,1	7,1									
Set 11	4,7	5,0	4,8	4,9	5,4	5,9	4,4	4,9	5,8	3,8	4,6	5,4	3,8	4,4	5,0
Set 12	4,5	4,8	6,7	7,6	6,9	5,5	7,6	5,5	8,1	5,6					
Set 13	1,1	1,2	5,0	4,6	3,8	4,4	3,8	6,4	5,1	4,8	6,4	5,9			
Set 14	4,8	4,9	5,8	6,1	6,4	5,7	6,1	5,3	5,8	5,1					
Set 15	6,7	7,1	10,0	9,8	10,0	9,4	10,1	10,0	10,4						
Set 16	8,2	8,7	8,7	8,8	8,2	9,1	8,7	9,3	8,0	9,1					
Set 17	10,8	11,6	14,3	14,3											
Set 18	3,6	3,8	5,0	4,6	4,9	5,4									
Set 19	9,1	9,7	9,0	8,9	9,1										
Set 20	10,6	11,4	15,6	14,0	15,7	17,2									
Set 21	5,0	5,3	5,1	5,8	5,1	4,6	5,1	4,7	5,2						
Set 22	9,9	10,6	13,3	13,3											
Set 23	12,2	13,1	20,3	20,7	19,9	20,8	19,9	20,5	20,1						
Set 24	3,5	3,7	4,9	5,1	4,6										
Set 25	6,2	6,6	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	4,9	5,1	4,9	4,9	4,9	4,5	4,4	
Set 26	10,4	11,1	11,9	12,2	11,6	12,2	11,6	12,0							
Set 27	9,2	9,8	9,3	9,1	9,1	9,3	9,3	9,3	9,5	9,4	9,5	9,3	9,3	9,3	
Set 28	7,8	8,3	9,1	8,9	9,3	8,9	9,3	9,3	8,9	9,1	8,9	9,3			
Set 29	14,9	16,1	19,1	19,3	18,9										
Set 30	8,3	8,9	7,9	8,9	7,5	7,3									
Set 31	2,7	2,8	3,0	2,6	3,3										
Set 32	9,0	9,6	8,4	8,7	8,2	8,7	8,2	8,4	8,2	8,4					
Set 33	3,4	3,6	3,7	3,8	3,8	3,5	3,5								
Set 34	8,5	9,1	13,2	13,3	13,3	12,8	13,1	13,6							
Set 35	12,3	13,2	15,0	14,2	14,8	14,6	15,2	15,3	15,5	15,4					
Set 36	11,4	12,2	14,0	12,8	13,6	13,2	14,0	13,6	14,6	15,4	14,0	14,8			
Set 37	14,5	15,6	16,6	17,2	16,9	15,7									
Set 38	10,8	11,6	15,0	14,2	15,0	14,3	15,4	15,1	15,4	15,4	15,2				
Set 39	3,4	3,6	3,9	3,5	3,8	3,5	4,4	3,8	4,4						
Set 40	13,0	14,0	16,0	16,1	16,2	16,1	16,3	15,6	15,9	16,1					
Set 41	13,8	14,9	18,0	18,3	17,9	18,1	18,0	17,7							
Set 42	3,7	3,9	4,7	4,7											
Set 43	10,8	11,6	13,6	16,3	15,4	15,1	13,4	13,8	11,3	13,5	11,1	12,8			
Set 44	11,1	11,9	14,3	15,1	14,3	13,8	14,1								

Table 7.4 : Vitesses du vent des bouées ($U_{bouée}$ et $U_{bouée}$ à 10 m), des mesures à distance moyennées pour une mesure de bouées ($U_{inv}(moy)$) et des mesures à distance pour chaque tache au sol du diffusiomètre d'ERS-1 (U_{inv}). Ces grandeurs sont en ms^{-1} .

Les bouées NOAA mesurent le vent à 5 m de hauteur. Or, le vent radars est calculé à 10 m de hauteur. C'est pourquoi nous avons converti le vent des bouées en un vent bouées à 10 m de hauteur grâce aux équations (2.16). C'est donc le vent à 10 m qui sera pris comme $U_{\text{bouée}}$ dans les équations et figures qui suivent. Le résultat des calculs de ce U_{10} est présenté à la table 7.4.

Le vent ECMWF est considéré comme une référence et nous allons, d'abord, montrer la comparaison entre le vent obtenu par inversion des mesures radars et le vent ECMWF. Ceci est illustré à la figure 7.10. Elle correspond à un sous-ensemble de points de la figure 7.3, puisque seuls les points de la mission TANDEM, qui coïncident avec les bouées, sont retenus. Il faut cependant noter que cet extrait de la figure 7.3 est légèrement modifié, puisque nous avons apporté des améliorations au programme d'inversion, comme expliqué en 7.4.3. Mais ces améliorations modifient peu le domaine des valeurs de la vitesse du vent. La ligne oblique indique la diagonale $U_{\text{inv}} = U_{\text{ECMWF}}$. L'autre ligne oblique en trait épais représente une régression linéaire à partir de l'ensemble des points : elle a un coefficient angulaire légèrement supérieur à 1, comme constaté avec la mission TANDEM complète; pour les grands vents, le vent radars est légèrement surestimé par rapport au vent ECMWF.

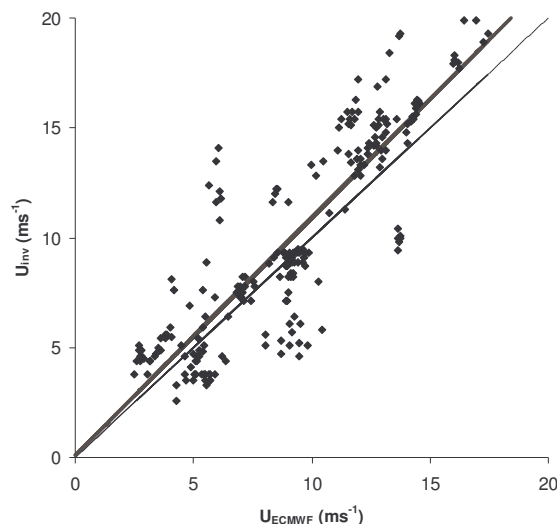


Figure 7.10 : Vent radars (U_{inv}) en fonction du vent ECMWF pour la mission TANDEM/bouées

Comparons ensuite le vent radars et le vent bouées. La table 7.3 indique que les erreurs relatives sur ces deux types de mesures du vent sont sensiblement du même ordre de grandeur et donc, les comparaisons sont pertinentes. Les valeurs sont données à la table 7.4 et illustrées aux figures 7.11 et 7.12.

La figure 7.11 compare toutes les vitesses de vent radars aux vitesses de vent bouées. La droite représente l'égalité entre vent radars et vent bouées.

A la figure 7.12, le vent radars moyen est comparé au vent bouées. La droite de la figure 7.12 représente $U_{inv}(\text{moy}) = U_{bouée}$. Dans les deux cas, le vent radars est surestimé, en moyenne, par rapport au vent bouées, surtout pour les vents forts.

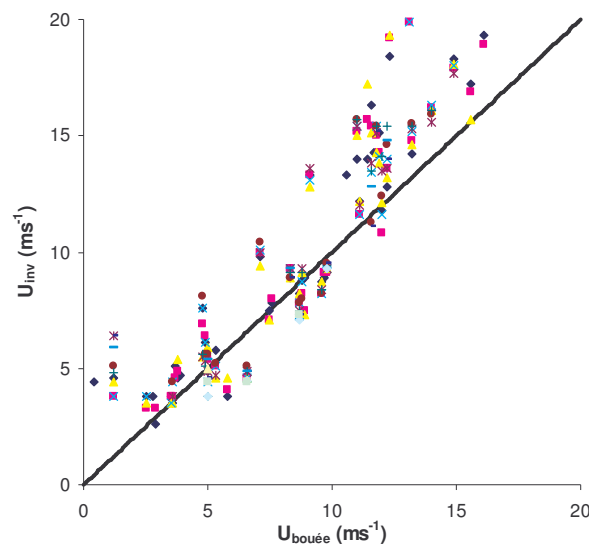


Figure 7.11 : Vent radars (U_{inv}) en fonction du vent bouées ($U_{bouée}$) pour la mission TANDEM/bouées

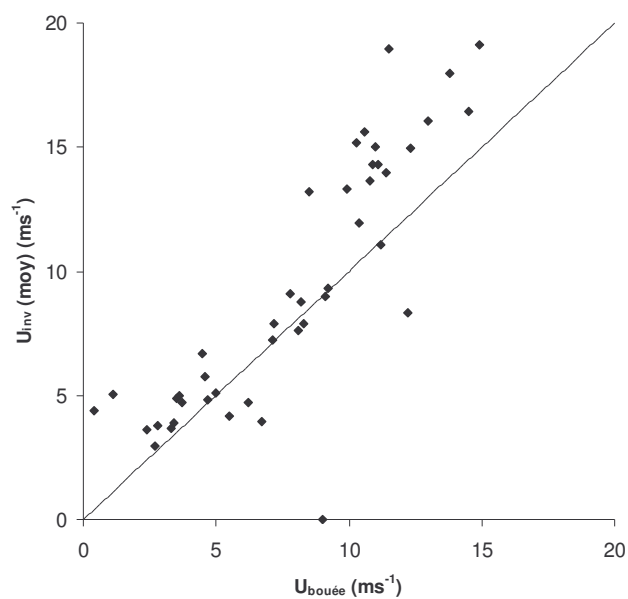


Figure 7.12 : Vent radars moyen ($U_{inv} \text{ (moy)}$) en fonction du vent bouées ($U_{bouée}$) pour la mission TANDEM/bouées

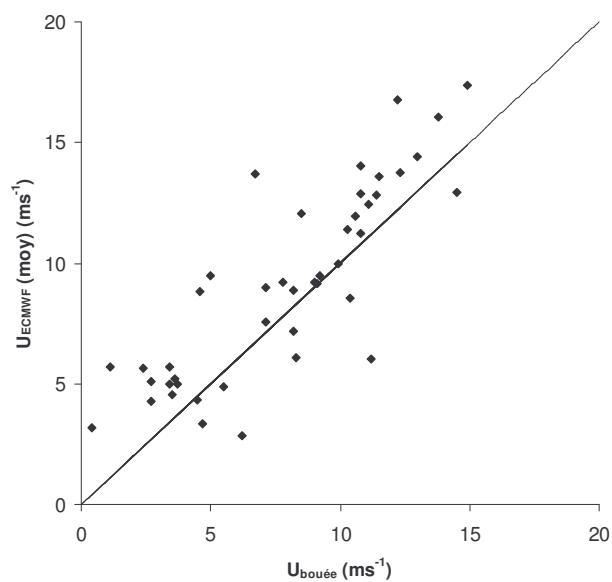


Figure 7.13 : Vent ECMWF moyen en fonction du vent bouées pour la mission TANDEM/bouées

Comparons aussi le vent ECMWF au vent bouées, à la figure 7.13. Ici, pour chaque vent bouées correspond un vent moyen ECMWF. Moyen signifie moyenné sur les valeurs fournies par le ECMWF pour chaque tache au sol du diffusiomètre d'ERS-1. La ligne oblique indique la diagonale $U_{\text{ECMWF}}(\text{moyen}) = U_{\text{bouée}}$. Le vent ECMWF est, en moyenne, légèrement plus élevé que le vent bouées, ce qui explique la différence entre les figures 7.10 et 7.12 : pour les grands vents, le vent radars surestime à la fois le vent ECMWF et le vent bouées, mais il surestime plus le vent bouées que le vent ECMWF. Si le vent ECMWF est pris comme référence, aux grands vents, le vent radars est surestimé et le vent bouées est sous-estimé.

7.5.2 Inverse de l'âge de la vague / vitesse du vent

Un paramètre d'état de mer introduit par Donelan est l'inverse de l'âge de la vague, Ω , défini par l'équation (2.29), i.e. $\Omega = U_{10}/c_0$.

Pour la bouée, cette définition est combinée avec les équations (2.34) et (2.43) qui mènent à $c_0 = g/\omega_0$. Compte tenu de $\omega_0 = 2\pi/T_0$, nous obtenons :

$$\Omega_{\text{bouée}} = 2\pi/g \ U_{\text{bouée}}/T_0(\text{bouée}) \quad (7.4)$$

Pour les satellites, cette définition est combinée avec (2.43), i.e. $c = \sqrt{g/K}$, insérée dans la définition (2.29) et, d'autre part, l'équation (2.28), i.e. $\S = \sigma_{\text{LD}}/\Lambda_0$, avec $H_{1/3} = 4\sigma$ qui fournit :

$$\Omega_{\text{inv}} = \sqrt{\frac{8\pi\S(\text{inv})}{gH_{1/3}(\text{alt})}} U_{\text{inv}} \quad (7.5)$$

De l'équation (7.4), il découle que Ω/U est une mesure de T_0 , la période de la vague dominante. Dès lors, il est intéressant de comparer ce facteur Ω/U dans le cas des bouées et des satellites. Ceci est illustré à la figure 7.14.

Un élément remarquable est l'effet de « raies » verticales, qui illustre le fait que chaque bouée est limitée dans les valeurs de T_0 qu'elle peut mesurer. C'est un résultat dû au traitement des mesures de bouées.

T_0 est la période de la vague dominante, c'est-à-dire celle de la vague avec le maximum d'énergie. Celle-ci est fournie par le spectre qui est évalué par raies spectrales de largeur 10^{-2} Hz (annexe 5.1). L'intervalle des raies à la figure 7.14 est de $6 \cdot 10^{-3} \text{ sm}^{-1}$ en Ω/U . Ceci correspond également à une variation en fréquence de 10^{-2} Hz, obtenue à partir de l'équation suivante, qui provient de (7.4) :

$$\Delta f = (1/2\pi) g \Delta\Omega/U$$

Il en découle inévitablement une discrétisation des valeurs de T_0 et, par là, des valeurs de Ω/U bouées. Pour ce paramètre illustré à la figure 7.14, la discrétisation et les erreurs de mesure rendent la comparaison « in situ » et « à distance » hasardeuse.

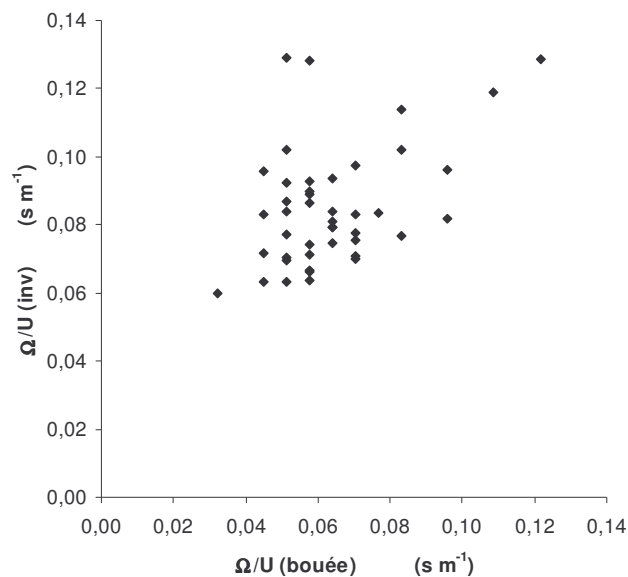


Figure 7.14 : Ω/U radar en fonction de Ω/U bouée pour la mission TANDEM/bouées

7.5.3 Pente significative

Le paramètre d'état de mer est $H_{1/3}$ pour les bouées et ξ pour les satellites. Une façon de comparer l'état de la mer mesuré par les satellites et par les bouées est de comparer la pente significative

donnée par l'inversion et celle calculée par les bouées. Son expression est obtenue comme suit :

- l'équation (7.5), issue des relations fondamentales, est aussi valable pour les bouées :

$$\Omega_{\text{bouée}} = \sqrt{\frac{8\pi\mathcal{S}(\text{bouée})}{gH_{1/3}(\text{bouée})}} U_{\text{bouée}} \quad (7.6)$$

- les expressions de l'inverse de l'âge de la vague données par (7.4) et (7.6) sont égalées, ce qui conduit à :

$$\mathcal{S}_{\text{bouée}} = \pi/2g H_{1/3}(\text{bouée})/T_0^2(\text{bouée}) \quad (7.7)$$

Ceci est illustré à la figure 7.15. La table 7.3 indique que les erreurs relatives sur $\mathcal{S}_{\text{bouée}}$ et $\mathcal{S}_{\text{inv}}$ ne sont pas du même ordre de grandeur (respectivement 25 % et 5 %) et donc, les comparaisons doivent être interprétées avec précaution. On constate que l'inversion ne reproduit pas le domaine de variation observé pour les bouées : à la figure 7.15, nous avons $0,48 \% < \mathcal{S}_{\text{inv}} < 0,96 \%$ et $0,10 \% < \mathcal{S}_{\text{bouée}} < 1,19 \%$.

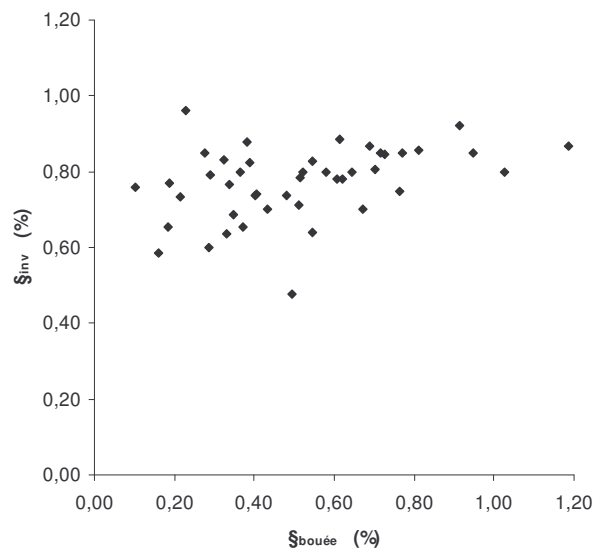


Figure 7.15 : $\mathcal{S}_{\text{inv}}$ en fonction de $\mathcal{S}_{\text{bouée}}$ pour la mission TANDEM/bouées

7.5.4 Inverse de l'âge de la vague

Comparons à présent l'état de la mer à l'aide du paramètre inverse de l'âge de la vague, Ω . La figure 7.16 compare ce paramètre obtenu à l'aide des radars avec celui obtenu à l'aide des bouées. La table 7.3 indique que les erreurs relatives sur ces deux types de mesures de Ω sont du même ordre de grandeur (de 15 à 20%) et donc, les comparaisons sont pertinentes.

Compte tenu de cet élément, la tendance est relativement bonne, vu le niveau de précision sur ce paramètre. Il faut cependant remarquer que pour les bouées, seulement 4 cas sur les 44 sont tels que $\Omega > 0,84$, c'est-à-dire que la mer est développante. Pour le satellite, nous dénombrons 19 cas sur 44 cas. Le reste (40 sur 44 pour les bouées et 25 sur 44 pour les satellites) correspond à une mer pleinement développée ou à une mer où des vagues créées précédemment ou ailleurs sont présentes. On peut constater que les satellites, aux erreurs près, ont donc tendance à surestimer l'inverse de l'âge de la vague par rapport aux bouées (figure 7.16). Mais si l'on trace la droite de régression, on constate que la tendance est assez bonne, mais qu'il y a un biais sur les valeurs radars.

Par ailleurs, puisque le vent bouées semble sous-estimé (figure 7.13), l'inverse de l'âge de la vague pour les bouées est recalculé selon la formule (7.4) où $U_{\text{bouée}}$ est remplacé par le vent moyen ECMWF. Ceci est présenté à la figure 7.17 : le nuage de points s'est rapproché de la droite $\Omega_{\text{inv}} = \Omega_{\text{bouée}}$, la concordance est donc améliorée.

Les figures 7.16 et 7.17 montrent que Ω_{inv} est surestimé par rapport à $\Omega_{\text{bouée}}$. Comme, dans les deux cas, Ω est obtenu à partir de U (équations (7.4) et (7.5)) et que U_{inv} est également surestimé par rapport à $U_{\text{bouée}}$, ce résultat est logique.

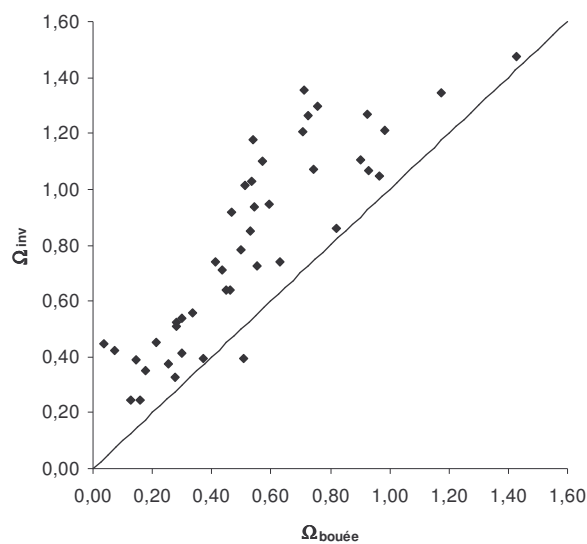


Figure 7.16 : Ω_{inv} en fonction de $\Omega_{\text{bouée}}$ pour la mission TANDEM/bouées

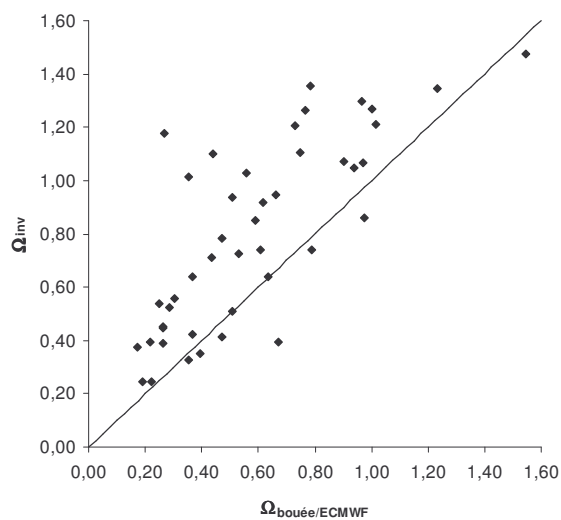


Figure 7.17 : Ω_{inv} en fonction de $\Omega_{\text{bouée}}$ avec le vent ECMWF pour la mission TANDEM/bouées

Au contraire du paramètre pente significative, les domaines de variation du paramètre inverse de l'âge de la vague sont plus

semblables : à la figure 7.16, nous avons $0,24 < \Omega_{inv} < 1,47$ et $0,03 < \Omega_{bouée} < 1,33$. En conclusion, la procédure d'inversion présente une sensibilité plus grande à l'inverse de l'âge de la vague qu'à la pente significative.

7.5.5 Impact des conditions non-neutres sur les résultats

Le vent calculé à partir des mesures des radars est un vent obtenu sous des conditions neutres. Mais l'hypothèse simplificatrice de conditions neutres induit une erreur. Dans cette section, nous allons analyser la sensibilité des résultats à cette hypothèse. L'erreur induite est un des éléments qui entrent en ligne de compte pour expliquer les différences entre les vents radars et les vents bouées.

Pour estimer l'effet de la stabilité ($T_{air} > T_{mer}$) ou de l'instabilité ($T_{air} < T_{mer}$) sur la vitesse du vent à 10 m de hauteur, U_{10} , nous nous sommes basés sur la figure 2.4. Elle présente la variation de U_{10} pour une variation de température entre l'air et l'eau de 12°C. Pour chaque U_{inv} (moy) de la table 7.4, nous avons calculé, à vitesse de friction u^* constante, la vitesse du vent sous conditions instables ($T_{air} = T_{mer} + 12^\circ\text{C}$) et sous conditions stables ($T_{air} = T_{mer} - 12^\circ\text{C}$).

Les erreurs introduites par les conditions non-neutres sont des erreurs absolues relativement constantes, ce qui conduit à des erreurs relatives plus grandes pour les vitesses de vent faibles. A partir des valeurs de la table 7.5, on a, pour les conditions instables, une erreur relative comprise entre 15 % (vitesse du vent de 3 ms^{-1}) et 3 % (vitesse du vent de 20 ms^{-1}) et, pour les conditions stables, une erreur relative comprise entre 39 % (vitesse du vent de 3 ms^{-1}) et 6 % (vitesse du vent de 20 ms^{-1}).

Les résultats obtenus sont présentés à la figure 7.18 sous forme de barres d'erreur autour de la valeur U_{inv} (moy). L'introduction de conditions non-neutres confirme les conclusions précédentes, à savoir que le vent radars surestime le vent bouées, et ce d'autant plus que le vent est fort. De plus, l'écart est plus important pour les conditions stables que pour les conditions instables, parce que, dans ce dernier cas, la vitesse du vent radars est plus petite et se rapproche plus de la diagonale ($U_{inv}(\text{moy}) = U_{bouée}$).

	$U_{\text{bouée}}$ à 10 m	U_{inv} (moy)	U_{inv} (moy- instable)	U_{inv} (moy- stable)
Set 1	0,4	4,4	3,9	5,6
Set 2	12,0	12,3	11,6	13,8
Set 3	7,6	7,9	7,3	9,3
Set 4	12,3	19,0	18,1	20,2
Set 5	8,7	7,6	7,0	8,9
Set 6	2,5	3,6	3,1	4,8
Set 7	2,8	3,8	3,3	5,0
Set 8	11,0	15,2	14,4	16,6
Set 9	5,8	4,2	3,7	5,4
Set 10	7,6	7,2	6,6	8,6
Set 11	5,0	4,8	4,3	6,1
Set 12	4,8	6,7	6,1	8,0
Set 13	1,2	5,0	4,5	6,3
Set 14	4,9	5,8	5,2	7,0
Set 15	7,1	10,0	9,2	11,3
Set 16	8,7	8,7	8,1	10,1
Set 17	11,6	14,3	13,5	15,7
Set 18	3,8	5,0	4,4	6,2
Set 19	9,7	9,0	8,3	10,4
Set 20	11,4	15,6	14,8	17,0
Set 21	5,3	5,1	4,6	6,3
Set 22	10,6	13,3	12,5	14,7
Set 23	13,1	20,3	19,4	21,5
Set 24	3,7	4,9	4,3	6,1
Set 25	6,6	4,7	4,2	6,0
Set 26	11,1	11,9	11,2	13,4
Set 27	9,8	9,3	8,6	10,7
Set 28	8,3	9,1	8,4	10,5
Set 29	16,1	19,1	18,2	20,3
Set 30	8,9	7,9	7,3	9,3
Set 31	2,8	3,0	2,5	4,1
Set 32	9,6	8,4	7,7	9,8
Set 33	3,6	3,7	3,2	4,8
Set 34	9,1	13,2	12,4	14,6
Set 35	13,2	15,0	14,2	16,4
Set 36	12,2	14,0	13,2	15,4
Set 37	15,6	16,6	15,7	17,9
Set 38	11,6	15,0	14,2	16,4
Set 39	3,6	3,9	3,4	5,1
Set 40	14,0	16,0	15,2	17,4
Set 41	14,9	18,0	17,1	19,3
Set 42	3,9	4,7	4,2	5,9
Set 43	11,6	13,6	12,8	15,0
Set 44	11,9	14,3	13,5	15,7

Table 7.5 : Vitesse du vent des bouées ($U_{\text{bouée}}$ à 10 m), vitesse du vent des mesures à distance moyennées pour une mesure de bouées sous conditions neutres (U_{inv} (moy)) et sous conditions instables (U_{inv} (moy -instable)) et stables (U_{inv} (moy -stable)). Ces grandeurs sont en ms^{-1} .

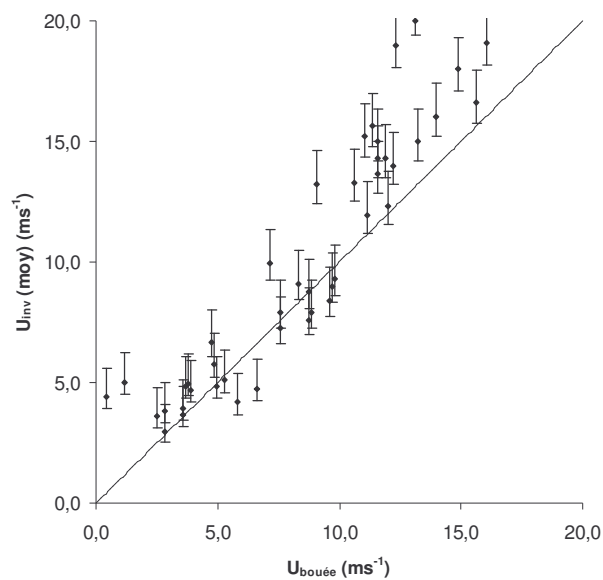


Figure 7.18 : Vent radars moyen ($U_{inv} (moy)$) sous des conditions non-neutres en fonction du vent bouées ($U_{bouée}$) pour la mission TANDEM/bouées

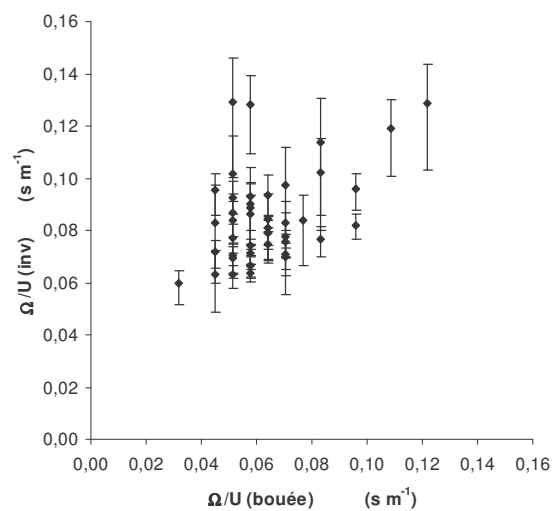


Figure 7.19 : Ω/U radar sous des conditions non-neutres en fonction de Ω/U bouée pour la mission TANDEM/bouées

Nous avons ensuite analysé la sensibilité du paramètre Ω/U à l'introduction de conditions non-neutres (figure 7.19). On retrouve à nouveau l'effet de raies verticales comme à la figure 7.14.

Enfin, l'inverse de l'âge de la vague pour les mesures à distance, Ω_{inv} , étant fonction de la vitesse du vent (équation (7.5)), nous avons introduit des conditions non-neutres dans la figure 7.15. Ceci est présenté à la figure 7.20. Le domaine de variation de Ω_{inv} est plus étendu : à la figure 7.16, nous avons $0,24 < \Omega_{inv} < 1,47$ et à la figure 7.20, nous avons $0,21 < \Omega_{inv} < 1,58$. Son étendue (1,37) dépasse légèrement celui des bouées (1,30). Par ailleurs, les valeurs de Ω_{inv} sont surestimées, il existe un biais de 0,29, comme représenté par la ligne en trait épais à la figure 7.20. L'introduction des conditions non-neutres augmente la valeur du biais (0,29 au lieu de 0,26 sous les conditions neutres).

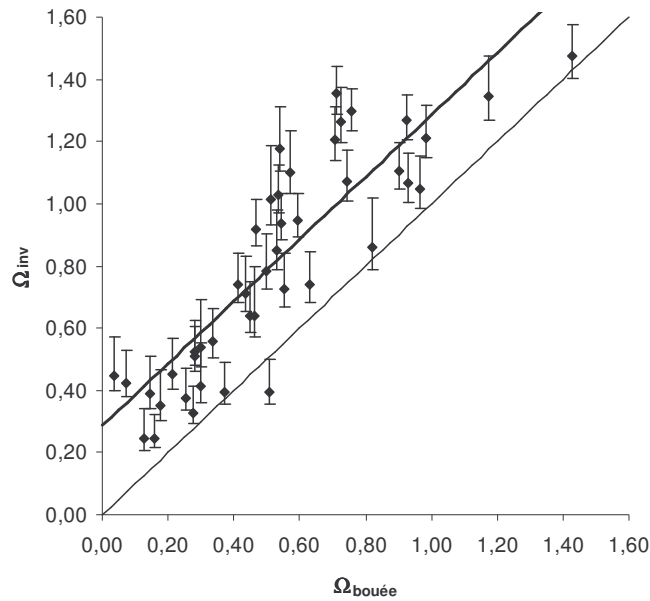


Figure 7.20 : Ω_{inv} sous des conditions non-neutres en fonction de $\Omega_{bouée}$ pour la mission TANDEM/bouées

7.6 Conclusion

Ce chapitre présente trois aspects essentiels de cette thèse. En premier lieu, nous avons construit une base de données commune aux satellites et aux bouées. Ensuite, le modèle expliqué dans les chapitres 2 à 6, appelé UCL-3, est comparé au modèle UCL-2, précédemment utilisé et finalisé par Lemaire (1998), sur base des travaux antérieurs de Baufays (1988a, 1988b et 1990). Enfin, une comparaison originale des mesures à distance et « in situ » est exposée.

Nous disposons de 44 ensembles de mesures des bouées. A chaque mesure d'une bouée correspondent de 1 à 12 taches au sol du diffusiomètre d'ERS-1. Pour chacune de celles-ci, correspondent de 1 à 16 taches au sol de l'altimètre d'ERS-2. Pour permettre une comparaison entre ces données, nous avons structuré les données comme suit. Nous avons retenu pour chaque tache au sol du diffusiomètre, une seule valeur pour l'altimètre, à savoir la moyenne des valeurs retrouvées pour chaque tache au sol de l'altimètre. De même, pour un ensemble de mesures d'une bouée, nous avons retenu une seule valeur du diffusiomètre, à savoir la moyenne des valeurs retrouvées pour chaque tache au sol du diffusiomètre. Ainsi, les bouées fournissent des valeurs moyennes temporelles qui sont comparées aux satellites qui fournissent des valeurs moyennes spatiales.

Nous montrons que notre modèle UCL-3 améliore les résultats de l'inversion des mesures radars : il retrouve toutes les vitesses du vent (y compris les 5,4 % de vents non retrouvés par UCL-2) et de plus, le domaine de variation de la pente significative est plus large (de 0,48 % à 0,96 % pour UCL-3 alors qu'il n'était que 0,55 % à 0,78 % pour UCL-2) et se rapproche ainsi du domaine de variation mesuré pour les bouées.

Nous comparons la vitesse du vent, U , la pente significative, ξ et l'inverse de l'âge de la vague, Ω , retrouvés par les satellites à ceux mesurés par les bouées. Pour les grands vents, le vent radars surestime à la fois le vent ECMWF et le vent bouées, mais il surestime plus le vent bouées que le vent ECMWF. Pour la pente significative -

dont les erreurs relatives ne sont pas du même ordre de grandeur pour les radars et les bouées - le domaine couvert par les radars (0,48 % à 0,96 %) est plus petit que le domaine couvert par les bouées (0,10 % à 1,19 %). Par contre, l'inverse de l'âge de la vague est aussi légèrement surestimé par rapport à celui des bouées. Mais le domaine de variation est semblable : 0,24 à 1,47 pour les radars contre 0,03 à 1,33 pour les bouées. Notre modèle UCL-3, via l'inversion, est donc plus sensible à Ω qu'à ξ . Notons, toutefois, que ces deux paramètres se dérivent l'un de l'autre par les équations (7.5), (7.6) ou (7.7).

L'introduction de conditions non-neutres ne modifie pas significativement ces conclusions.

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.

Enfin, depuis 2000, les bouées NOAA fournissent le spectre directionnel de la mer. Il serait intéressant de refaire le même type de comparaison pour l'aspect directionnel. Cela permettrait de faire le lien entre le spectre directionnel (chapitre 5) et la confrontation de l'entière du modèle aux mesures (chapitre 7). Nous recommandons dès lors une nouvelle mission de mesures par satellites, conjointe avec les bouées NOAA.

Annexe 7.1

Caractéristiques des bouées NOAA

Cette annexe présente les coordonnées géographiques des bouées NOAA, retenues dans notre analyse, et le positionnement des instruments de mesure embarqués sur ces bouées.

A7.1.0 Caractéristiques communes

Site elevation: sea level

Barometer elevation: sea level

A7.1.1 Station 41001 - 150 NM East of Cape HATTERAS

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

34.54 N 69.28 W (34°32'24"N 69°16'48"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 4,389.1 m

Watch circle radius: 3,474 yards

A7.1.2 Station 44004 - HOTEL 200NM East of Cape May,NJ

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

38.50 N 70.47 W (38°30'12"N 70°28'18"W)

Air temp height: 4 m above site elevation
Anemometer height: 5 m above site elevation
Sea temp depth: 1m below site elevation
Water depth: 3,163.8 m
Watch circle radius: 2,899 yards

A7.1.3 Station 44005 - GULF OF MAINE 78 NM EAST OF PORTSMOUTH,NH

Owned and maintained by National Data Buoy Center
6-meter NOMAD buoy
DACT payload
43.17 N 69.22 W (43°10'24"N 69°13'07"W)

Air temp height: 4 m above site elevation
Anemometer height: 5 m above site elevation
Sea temp depth: 1m below site elevation
Water depth: 21.9 m
Watch circle radius: 69 yards

A7.1.4 Station 44008 - NANTUCKET 54NM Southeast of Nantucket

Owned and maintained by National Data Buoy Center
3-meter discus buoy
VEEP payload⁶
40.50 N 69.43 W (40°30'00"N 69°25'53"W)

Air temp height: 4 m above site elevation
Anemometer height: 5 m above site elevation
Sea temp depth: 0.6 m below site elevation
Water depth: 62.5 m
Watch circle radius: 158 yards

⁶ DACT payload en 1995-1996

A7.1.5 Station 44011 - GEORGES BANK 170 NM East of Hyannis, MA

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

41.06 N 66.58 W (41°03'47"N 66°34'53"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 88.4 m

Watch circle radius: 230 yards

A7.1.6 Station 46001 - GULF OF AK 88NM South of Kodiak, AK

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

56.30 N 148.17 W (56°17'44"N 148°10'19"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 4,206.0 m

Watch circle radius: 3,600 yards

A7.1.7 Station 46002 - OREGON - 275NM West of Coos Bay OR.

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

42.57 N 130.32 W (42°31'37"N 130°34'12"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 3,420.0 m

Watch circle radius: 3,209 yards

A7.1.8 Station 46003 - S ALEUTIANS

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

51.83 N 155.85 W(51°49'53"N 155°51'01"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

A7.1.9 Station 46005 - WASHINGTON 315NM West of Aberdeen, WA

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

46.05 N 131.02 W(46°03'00"N 131°01'12"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 2,779.8 m

Watch circle radius: 2,272 yards

A7.1.10 Station 46006 - SE PAPA - 600NM West of Eureka, CA.

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

VEEP payload⁷

40.84 N 137.49 W (40°50'33"N 137°29'10"W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 4,023.4 m

Watch circle radius: 3,057 yards

A7.1.11 Station 46035 - BERING SEA 310 NM North of Adak, AL

Owned and maintained by National Data Buoy Center

12-meter discus buoy

MARS payload⁸

57.05 N 177.58 W (57°03'02"N 177°34'35" W)

Air temp height: 10 m above site elevation

Anemometer height: 10 m above site elevation

Sea temp depth: 1 m below site elevation

Water depth: 3,662.3 m

Watch circle radius: 2,706 yards

A7.1.12 Station 46059 - CALIFORNIA - 357NM West of San Francisco, CA.

Owned and maintained by National Data Buoy Center

6-meter NOMAD buoy

DACT payload

37.98 N 130.00 W (37°59' 00"N 129°59'49" W)

Air temp height: 4 m above site elevation

Anemometer height: 5 m above site elevation

⁷ DACT payload en 1995-1996

⁸ DACT payload en 1995-1996

Sea temp depth: 1m below site elevation

Water depth: 4,599.4 m

Watch circle radius: 3,658 yards

Annexe 7.2

Méthode d'inversion

Nous décrivons la méthode développée pour l'inversion des données radars de la mission TANDEM.

A7.2.1 Procédure générale

Une procédure générale est utilisée pour retrouver l'état de la mer et le vent : les données radars sont inversées en considérant la vitesse du vent, la pente significative, S , et la longueur d'onde au pic du spectre, K_0 , comme des variables. On introduit, dans le schéma d'inversion, la hauteur significative des vagues, $H_{1/3}$, provenant de l'altimètre, telle que fournie par l'ESA. Le spectre de surface utilisé dans le modèle physique direct est normalisé de telle façon que la variance des hauteurs soit égale à $H_{1/3}^2/16$, sur base de la relation $H_{1/3} = 4\sigma$. Cette procédure nécessite des données d'altimètre et de diffusiomètre concomitantes, pour fournir des ensembles de paramètres d'entrée avec suffisamment d'informations, comme c'est le cas pour la mission TANDEM.

A7.2.2 Fonction objectif

Plusieurs méthodes d'inversion existent, chacune présentant un compromis spécifique entre complexité et efficacité. La plupart des méthodes recherchent le minimum global d'une fonction objectif. Celle-ci, notée Y , est simplement une fonction croissante des différences pondérées entre les données mesurées et simulées avec le modèle physique développé. Ceci signifie que le minimum global de la fonction correspond à un ensemble de données d'entrée, qui produisent un ensemble de valeurs simulées, obtenues par le modèle, aussi proche que possible des valeurs mesurées.

Une fonction objectif souvent utilisée est celle au sens des moindres

carrés, qui s'écrit comme :

$$Y(X) = \sum_{i=1}^N w_i (S_i(X) - M_i)^2 \quad (A7.2.1)$$

où S_i est la valeur simulée de la mesure M_i , utilisant l'ensemble des paramètres géophysiques d'entrée à retrouver, X , w_i est le facteur pondérateur et N , le nombre de canaux utilisés dans la procédure d'inversion.

Nous utilisons dans cette étude cette fonction objectif avec M_i , les mesures réalisées par les satellites. Tous les facteurs pondérateurs w_i sont supposés égaux à l'unité car les bruits des différentes données utilisées sont du même ordre de grandeur.

A7.2.3 Modèle direct

Les valeurs simulées dans l'équation (A7.2.1), S_i , doivent être évaluées. Ici, à nouveau, plusieurs méthodes existent :

- une première calcule S_i en utilisant directement le modèle physique complet à partir de l'ensemble des paramètres d'entrée X ; si elle est simple, cette méthode présente le désavantage de nécessiter des temps de calculs inacceptables, dès que le modèle direct est un peu complexe ;
- une deuxième approxime le modèle direct par une équation d'interpolation (multivariable, linéaire ou non) ; la limite d'utilisation de cette méthode est donnée par la qualité de l'interpolation ; l'évaluation complète, qui nécessite beaucoup de temps de calcul, est remplacée par une plus simple mais approximative ;
- enfin, la dernière – celle que nous utilisons – se base sur une approche discrète du modèle direct ; celui-ci est calculé pour un ensemble de valeurs discrètes des paramètres d'entrée et les résultats correspondants sont stockés dans une banque de données et lus et utilisés chaque fois que cela est nécessaire durant la procédure d'inversion. Une base de données différente doit être créée pour chaque configuration des instruments. Cette

procédure d'inversion présente l'avantage d'être rapide, parce que les S_i sont calculés une seule fois avant la procédure. Par contre, elle nécessite de recréer les banques de données chaque fois que le modèle complet est mis à jour.

La dimension de l'ensemble des données géophysiques à retrouver est de 4 : les paramètres d'état de mer, ξ et K_0 , et le vecteur vent, u^* et $\varphi(U)$.

Le calcul des valeurs successives de $S_i(X)$ est effectué en utilisant directement le modèle physique. Pour optimiser la procédure de minimisation détaillée ci-dessous, on utilise les bases de données créées⁹ afin de produire une première estimation de la solution finale, et, par là, de limiter le nombre de calculs directs nécessaires.

A7.2.4 Méthode de minimisation

Finalement, pour compléter l'inversion, nous devons trouver l'ensemble des paramètres d'entrée, $X_{\min}$, qui minimise la fonction objectif (A7.2.1):

$$Y(X_{\min}) = \min_X (Y(X)) \quad (\text{A7.2.2})$$

Ici aussi, il existe une large variété d'algorithmes de minimisation. Pour des systèmes non linéaires, comme celui considéré ici, la plupart n'assurent pas la convergence vers le minimum global de la fonction objectif. Citons, entre autres, la méthode de Newton-Raphson : elle converge très vite vers un minimum, mais celui-ci est souvent un minimum local et, parfois, elle boucle entre des valeurs très éloignées les unes des autres.

⁹ Les bases données sont créées pour les différentes configurations instrumentales. Le pas de discrétisation choisi est de 5 cms^{-1} pour u^* et 10° pour $\varphi(U)$. Les bases de données sont interpolées linéairement pour les valeurs de u^* et $\varphi(U)$ qui ne sont pas sur la grille de discrétisation, avec une résolution maximale de 1 cms^{-1} en u^* et 1° en $\varphi(U)$.

La procédure de minimisation se fait par étapes :

- premièrement, on utilise les bases de données créées pour calculer la fonction objectif. La valeur de la pente significative, β , est fixée à sa valeur moyenne, 0,65 % ;
- une première estimation de tous les minima locaux de la fonction objectif est trouvée en calculant avec le modèle direct la valeur de cette fonction pour tous les points de la grille de discrétisation ;
- le calcul de minimisation est alors affiné autour des minima locaux, de cette manière :
 - o successivement pour chaque variable inversée, la valeur obtenue est augmentée ou diminuée d'une petite quantité, aussi longtemps que ceci permet de réduire la valeur de la fonction objectif ;
 - o quand ceci ne permet plus de diminuer la valeur de la fonction objectif par modification de chacune des variables, cette procédure est répétée avec un pas d'incrément plus petit ;
 - o les incréments ultimes de la procédure sont 1cm s^{-1} pour la vitesse du vent, 1° pour la direction du vent et 0,01 % pour la pente significative ;
- le minimum global retenu est celui qui donne, parmi les minima locaux, la plus petite valeur de la fonction objectif.

Cette méthode devient très lente quand la dimension de l'ensemble des paramètres d'entrée, X , augmente. C'est pourquoi, quand la dimension de X devient grande, l'ensemble des entrées est partitionné en sous-ensembles, sur lesquels l'algorithme de minimisation est appliqué.

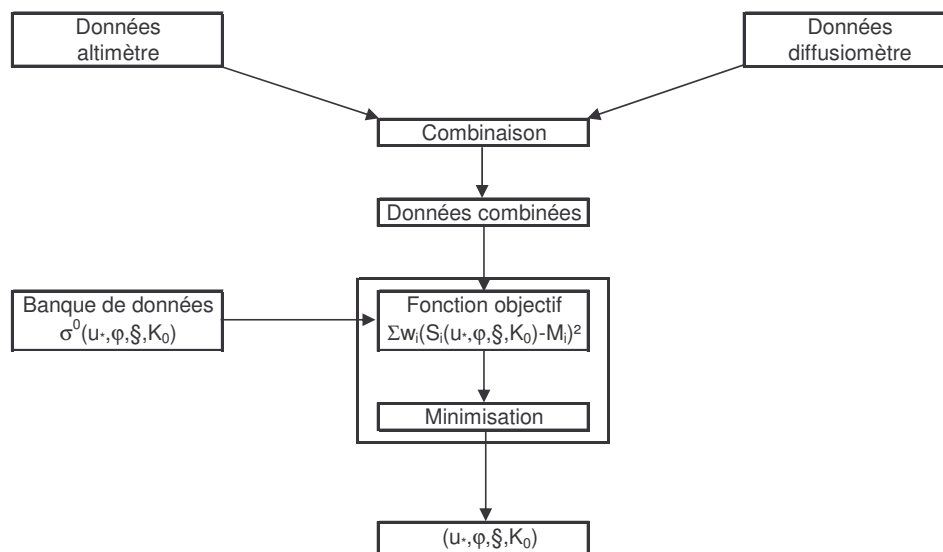


Figure A7.1 : Procédure d'inversion.

Annexe 7.3

Relations empiriques

Les relations empiriques représentées sur les figures 7.5, 7.6 et 7.7 sont celles de :

- Hasselmann et al. (1976) appelée JONSWAP,
- Donelan et al. (1985), appelée DONELAN,
- Pierson & Moskowitz (1964), appelée PIERSON,
- Elfouhaily et al. (1997), appelée YOUNG¹⁰

et sont présentées à la table A7.3.1.

JONSWAP	$\omega_p = 2\pi \left(2.84 * \frac{g}{U_{10m}} X^{-0.3} \right)$ $\sigma_H = 4 \cdot 10^{-4} \frac{U_{10m}^2}{g} (X)^{0.50}$
DONELAN	$\omega_p = 2\pi \left(1.85 * \frac{g}{U_{10m}} X^{-0.23} \right)$ $\sigma_H = 9.17 \cdot 10^{-4} \frac{U_{10m}^2}{g} (X)^{0.38}$
PIERSON	$\omega_p = 0.877 \frac{g}{U_{19.5m}}$ $\sigma_H = 5.3 \cdot 10^{-3} U_{19.5m}^2$
YOUNG	$\omega_p = \frac{0.877g}{U_{10m}} \left[\tanh\left(\frac{X}{X_0}\right)^{0.4} \right]^{-0.7576}$ $\sigma_H = 0.06 \frac{U_{10m}^2}{g} \left[\tanh\left(\frac{X}{X_0}\right)^{0.4} \right]^{1.25}$ where $X_0 = 2.2 \cdot 10^4$

Table A7.3.1 : Formules empiriques utilisées dans les figures 7.5, 7.6 et 7.7 (Lemaire, 1998)

¹⁰ Elfouhaily et al. ont légèrement modifié les relations de Young

La valeur du fetch X a été choisie arbitrairement à 500 km dans les figures.

Pour la figure 7.5, la pente significative est calculée par σ_H divisé par Λ_0 , où Λ_0 est obtenu à partir de ω_p par la relation de dispersion.

En ce qui concerne la figure 7.6, la hauteur significative, $H_{1/3}$, est donnée par $4 \sigma_H$.

Pour la figure 7.7, l'inverse de l'âge de la vague est donné par :

$$\Omega = \sqrt[4]{\frac{m}{m+1}} \frac{\omega_0 U}{g}$$

où ω_0 est ω_p et m est égal à 4.

