

## Fiche “ Valorisation des résultats des campagnes aéroportées ” Campagne d'évaluation 2015

### **Nom de la campagne : Mesure et étude des états de mer (vent/vagues) par radar aéroporté KuROS**

Projet / Programme de rattachement : Mission Spatiale CFOSAT

Domaine scientifique : Océan, interface océan/atmosphère

Avion : ATR42

Dates de la campagne : Mars-avril 2013, novembre 2014, octobre 2015

Nombre de jours scientifiques : 15 en 2013 (+ 3 vols d'étalonnages), 1 en 2014, 5 en 2015 (+ 3 vol étalonnage)

Nombre d'heures de vols :

Aéroport(s) : Franczal en 2013, Brest en 2015

PI (Principal Investigator), Nom, prénom et organisme : HAUSER Danièle, CNRS

Nombre de chercheurs et d'enseignants-chercheurs : 2 directement sur les campagnes mais données mis à disposition plus largement

Nombre d'ingénieurs et de techniciens : ~ 3

Nombre d'étudiants : 1 master + 1 thèse (a venir)

Fiche remplie par : Danièle HAUSER

Date de rédaction ou d'actualisation de la fiche : février 2016

Adresse : LATMOS, 11 boulevard d'Alembert, 78 280 GUYANCOURT

Email : daniele.hauser@latmos.ipsl.fr

Tel : 01 80 28 50 23

Résumé (20 lignes maximum) :

L'observation et la modélisation numérique des états de mer restent des enjeux majeurs que ce soit pour la prévision marine (sécurité des biens et des personnes) que pour la progression des connaissances sur le système couplé océan/atmosphère.

Depuis de nombreuses années l'équipe de recherche du CNRS/LATMOS développe des travaux dans ces domaines. Ainsi le radar KuROS a été mis au point par le LATMOS en 2012 pour être embarqué à bord de l'ATR42. Les objectifs sont multiples: i) préparation de la mission spatiale CFOSAT dédiée à l'observation globale du vent et des vagues par radar ii) étude des champs de vent et vagues, des couplages vent/vagues et vagues/courant et validation des modèles de prévision numérique des vagues, iii) travaux amonts sur la mesure du courant de surface par radar (appui au concept VASCO retenu par le CNES pour une étude amont). Depuis 2013, KuROS a été mis en oeuvre à bord de l'ATR 42 à plusieurs reprises: lors de la campagne HYMEX en hiver 2013 au-dessus du Golfe du Lion (Méditerranée) dans des situations de forts états de mer (Mistral et Tramontane), et lors des campagnes PROTEVS (SHOM, 2013) et BBWAVES (IFREMER, 2015) en Mer d'Iroise dans des situations de fortes interactions vagues/courant. Les données du radar et les méthodes de traitement associées ont été validés en 2014 (Caudal et al, 2014). Des travaux combinant des observations de spectres des vagues par KuROS et des sorties du modèle de prévision des vagues MFWAM sont en cours. Au-delà de l'analyse en cours, qui servira la plupart des objectifs mentionnés ci-dessus, le projet est de compléter le jeu de données par des vols en mer d'Iroise en 2016 avant une mise en oeuvre de KuROS dans le golfe de Gascogne pour la période la validation du satellite CFOSAT après son lancement en 2018.

### Résultats majeurs obtenus (maximum 5 pages)

#### 1 – Contexte scientifique et programmatique de la campagne

La mission spatiale Franco-chinoise CFOSAT en cours de développement est dédiée à la mesure du vent et des vagues à la surface de l'océan. Elle embarquera deux instruments radar, un diffusiomètre-vent (SCAT) conçu et développé par la Chine, et un diffusiomètre-vagues (SWIM) conçu et développé par la France sur financements CNES. Les objectifs scientifiques principaux de la mesure globale du vent et des vagues par CFOSAT sont les suivants :

- Améliorer les connaissances sur les processus de surface et échanges d'énergie et de matière à l'interface océan/atmosphère (évolution des vagues, interactions vagues-courant, vagues-glace, couplage avec la couche mélangée océanique et la couche limite marine, ..)
- Améliorer la prévision des conditions de surface marine (vent/vagues) en particulier dans les conditions d'événements extrêmes (amélioration des modèles de prévision, et assimilation de données)
- Améliorer la modélisation et la prévision de la circulation océanique par un meilleur forçage de surface et des données de validation
- Contribuer à l'étude de la variabilité climatique des paramètres océaniques de surface

Des objectifs secondaires ont été définis concernant les surfaces continentales, et la cryosphère.

CFOSAT dont le lancement est prévu mi-2018, embarquera le radar SWIM, radar en bande Ku, opérant dans une gamme d'incidences de 0 à 11° couverte par 5 faisceaux, qui balayeront sur 360° en azimut. Cet instrument servira à l'estimation du spectre directionnel des vagues et à la mesure du profil de section efficace radar en fonction de l'incidence qui permettra d'accéder aux propriétés statistiques des pentes des vagues. L'analyse spectrale de l'écho donne accès au spectre de modulation du signal rétrodiffusé, lié lui-même au spectre de pente des vagues de longueur d'onde 70 à 500 m environ. CFOSAT embarquera également le diffusiomètre SCAT en bande Ku (conçu par les Chinois) couvrant les incidences d'environ 18 à 55°, pour la mesure du vent de surface selon le principe classique du diffusiomètre-vent.

Dans le cadre de la mission CFOSAT, le LATMOS a développé et opère le radar aéroporté radar KuROS (Ku Band Radar for Observing Surfaces), embarquable sur ATR42, avec un concept reproduisant au plus près celui des instruments SWIM et SCAT de CFOSAT.

Les campagnes de mesures KuROS sont proposées avec des objectifs multiples : appui à la mission spatiale CFOSAT (préparation/validation) ou à d'autres missions spatiales complémentaires (Sentinel-1), étude des interactions air/mer (dont dynamique des vagues et leurs interactions avec l'océan et l'atmosphère) à l'échelle régionale, préparation de futurs concepts pour la mesure des paramètres de la surface marine (en particulier courant de surface).

## 2 – Rappel des objectifs

Les objectifs des campagnes KuROS 2013 à 2015 étaient liés d'une part à la préparation de la mission spatiale CFOSAT, d'autre part à l'étude des champs de vagues en conditions variées. En effet en plus des objectifs liés à CFOSAT, KuROS est un instrument bien adapté à l'étude des interactions air/mer à l'échelle régionale car il est conçu pour donner accès à une estimation à fine échelle (de l'ordre du kilomètre) du spectre directionnel des vagues, et du vent de surface. Il s'agit alors de contribuer à la mesure des paramètres qui influent sur les échanges de quantité de mouvement et de chaleur, d'étudier l'impact des vagues sur ces échanges, ou encore de mieux comprendre et paramétrer les interactions entre vagues et courant de surface.

De plus, KuROS est utilisé pour mieux comprendre le contenu des signaux de télédétection radar (en particulier mesures Doppler) dans l'objectif de mieux comprendre la physique des interactions ondes électromagnétiques/surface pour préparer des missions océanographiques futures dédiées à la mesure du courant de surface.

Les paramètres géophysiques que l'on peut extraire des données KuROS sont les suivants :

- spectre directionnel des vagues: répartition de l'énergie (ou de la hauteur) des vagues en fonction de leur longueur d'onde et de leur direction de propagation pour la gamme de longueur d'onde [30-400]m environ
- propriétés statistiques des vagues courtes (de 0.06 à 10m) environ : forme de la distribution des pentes, anisotropie, variance des pentes, paramètres caractérisant l'écart à la gaussianité
- vent de surface à partir de modèle empirique reliant section efficace radar mesurée et vent
- vitesse des diffuseurs de surface

Le schéma de la Figure 1 rappelle la géométrie d'observation qui permet d'accéder à ces variables

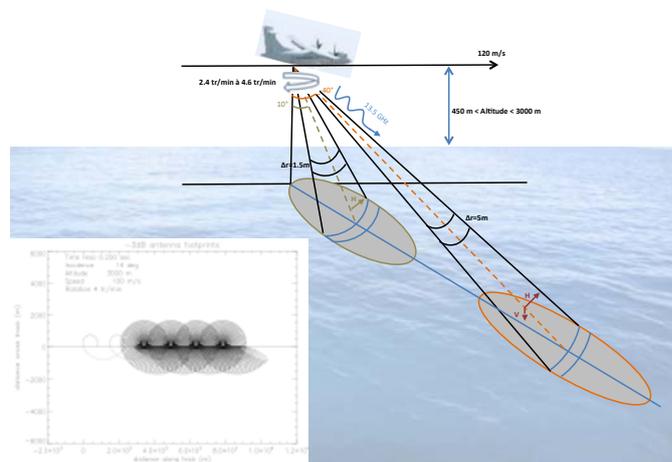


Figure 1 : Géométrie d'observation du radar KuROS :le système utilise 2 antennes l'une visant autour de  $10^\circ$  par rapport à la verticale, l'autre autour de  $40^\circ$ . Les deux antennes balayent en azimut autour de l'axe vertical. Chacune illumine la surface marine avec une empreinte au sol de plusieurs centaines de mètres pour les altitudes d'utilisation recommandées pour KuROS (2000 à 3000m). La résolution du radar (1.5m pour antenne  $10^\circ$ , 5 m pour antenne  $40^\circ$ ) permet d'accéder au coefficient de rétrodiffusion radar (section efficace normalisée) avec une résolution dans l'axe de visée d'une dizaine de mètres.

### 3 – Données acquises et analyses effectuées

Le radar a été qualifié pour la mesure des vagues en 2012 et la première campagne scientifique s'est déroulée en mars-avril 2013 en profitant des contextes de l'expérience HYMEX (Méditerranée), et de l'expérience PROTEVS du SHOM (mer d'Iroise, Bretagne). Suite à des améliorations du système radar, une campagne de test a été réalisée en 2014. En 2015, une campagne scientifique d'une semaine a été menée en mer d'Iroise de manière coordonnée avec les campagnes océanographiques BBWAVES de IFREMER et PROTEUVS du SHOM.

#### Campagne 2013

Le radar KuROS a été mis en opération lors de 14 vols en Méditerranée et 2 vols en Mer d'Iroise. A noter que lors de la plupart des vols en Méditerranée, les plans de vols étaient conçus de manière à partager le temps entre des mesures pour Kuros à haute altitude (2000 ou 3000m) et des mesures de turbulence en basse couche (besoins des équipes de Hymex), si bien que sur 4 à 5 heures de vol, les données KuROS représentent au plus 2 heures de mesures. Lors d'un des vols en Méditerranée, le radar n'a pu acquérir des données en raison d'une panne, et lors d'un autre vol seulement 20 minutes de données ont été enregistrées (défaut logiciel). Pour tous les autres vols, le fonctionnement du radar a été optimal. Trois vols à Franczal au-dessus de cibles réflectrices ont également effectués pour des besoins de contrôle et étalonnage du radar.

La liste des vols KuROS sur mer est donnée au tableau ci-dessous, avec une indication sur le type d'événement rencontré. La grande majorité des événements échantillonnés en Méditerranée concerne des états de mer en condition de vent fort et fetch limité (développement d'état de mer fort par vent – Tramontage ou Mistral). Les deux vols effectués en mer d'Iroise ont été effectués le même jour, par condition de houle forte et à deux moments différents par rapport à la marée.

Date	NO Vol	Plan de vol	Heure des données Kuros sur mer (UTC)	Commentaires radar	Commentaires situation (Hs et T: respectivement hauteur et période dominante) des vagues)
6/2/13	4	3 (mixte)	13:48 à 17:42	mode bi-polar non fonctionnel. mais données OK sur 1 des 2 polarisations	vent NW et forte mer bouée Lion: vent 25-30 kts ,Hs ~ 3 m, T~6-7 s
8/2/13	5	3 (mixte)	Rien	pas de données (panne switch antenne)	
11/2/13	6	11 (Iroise)	11:11 à 13:50	RAS	forte houle de NW (4-5 m) mais peu de vent début de marée montante
11/2/13	7	11b (Iroise)	15:53 à 16:59	RAS	forte houle de NW (4-5 m) mais peu de vent marée proche marée haute
13/2/13	9	12 (mixte)	13:25 à 16:40	RAS	vent NW et forte mer bouée Lion: vent 30-35 kts ,Hs ~3 à 4 m, T~7-8 s
14/2/13	10	12 (mixte)	07:53 à 13:00	RAS	vent et mer du vent modérée-bouée Lion: vent 25 à 20kts en baisse ,Hs ~ 1 à 2 m, T~5 à 6 s
15/2/13	11	3 (mixte)	10:33 à 14:34	RAS	vent et mer du vent modérée-bouée Lion:20 kts ,Hs ~ 2 à 3 m, T~4 à 5 s
23/2/13	13	HYMEX2-2	20 minutes seulement (14:05 à 14:36)	panne d'enregistrement sur disque	bonnes conditions mais vol incomplet pour kuros; bouée Lion: en augmentation, vent 35 kts ,Hs ~4 à 5 m en augmentation, T~9 s
1/3/13	14	Kuros seul plan de vol 12	11:52 à 14:32	Ok sur mer	assez forte houle; bouée Lion: vent 25 à 30kts ,Hs ~ 3.5m en augmentation, T~8 à 9 s
2/3/13	15	HYMEX-mixte couche limite	06:13 à 09:08	RAS	houle modérée; bouée Lion:vent 25 à 20kt en décroissance ,Hs ~2.5 m, T~6-7 s
4/3/13	16	HYMEX-mixte couche limite	14:30 à 18:15	RAS	houle assez faible; bouée Lion:vent 15 à 20kts en augmentation ,Hs ~ 1 à 2 m, T~ 4 à 5 s
05/03/13	17	Hymex -3 modifié, Kuros seul	12:45 à 15: 38	RAS.	très fort état de mer et vent d'Est Nord-est- bouée Lion: vent 30 à 35 kts d'Est,Hs ~4 à 5 m, T~8 à 9 s
06/03/13	18	Hymex-3 modifié, Kuros seul	11:47 à 14:22	RAS	très fort état de mer er vent d'Est Nord-est, bouée Lion: 15 à 20 kt en rotation,Hs ~3 à 4 m, T~8 à 9 s
13/03/13	20	Hymex-10 mixte	~15:00-18:00	RAS	Très forte Tramontane max vers Espagne - à la bouée Lion: ~40kts,Hs ~5 à 6 m, T~8 à 9 s

14/03/13	21	Hymex-10 mixte	~14:00-17:30	RAS	Suite forte Tramontane. à la bouée Lion, vent ~40 kts, 320°, Hs 5 à 6 m, T~9s
15/03/13	22	Hymex-10	~07:13-10:39	RAS	début de décroissance de la Tramontane. à la bouée Lion, vent vent ~35 kts, 320° Hs 5 à 6 m, T~9s

Les données acquises sont de bonne qualité avec les réserves ci-dessous

- le diagramme de rayonnement de l'antenne 40° s'est révélé fortement perturbé par le système d'implémentation du hublot
- la stabilité en puissance des signaux radar s'est révélée non satisfaisante en raison i) d'un défaut du logiciel commandant la génération des impulsions radar ii) d'une détérioration du joint tournant.

Ceci ne compromet pas la qualité des données en terme de spectres de vagues (issues des observations via l'antenne 10° et pas de nécessité de connaître le niveau absolu du signal). En revanche les analyses en terme de vent de surface s'avèrent difficiles pour cette campagne.

Ces problèmes ont été résolus aux campagnes suivantes.

#### **Campagne 2014**

Il s'agissait en 2014 de tester les modifications effectuées pour résoudre les problèmes identifiés en 2013 (cf ci-dessus). Les tests ont été concluants. Un seul vol scientifique a pu être réalisé en Méditerranée, mais dans des conditions de mer plate (sans vent ni vagues).

#### **Campagne 2015**

Cinq vols ont été réalisés en 2015 au départ de Brest, chacun d'une durée sur mer de 3 à 4 heures (mer d'Iroise, ouest et Sud de la pointe du Raz). Les conditions rencontrées sont caractéristiques d'un état de mer modéré à fort (2 à 4 m de hauteurs significative) avec des houles dominantes (houle d'ouest) et peu de mer du vent (vent modéré de 5 à 10 m/s). Les plans de vol étaient conçus pour traverser des zones de forts courants de marée aux abords de Ouessant) ainsi que des zones moins affectées par ce courant de marée.

Aucun problème technique n'est à signaler. Des vérifications sont encore en cours concernant l'étalonnage absolu du radar.

#### **4 – Principaux résultats obtenus (avec quelques illustrations)**

Un article a été publié (JAOT, 2014) sur le concept du nouveau radar, les méthodes d'analyse et les premiers résultats. Des résultats préliminaires ont été présentés à diverses conférences.

Un accent particulier a été mis dans l'analyse de ces premières données KuROS, sur les méthodes d'inversion des observations en lien avec les spécifications de la chaîne de traitement en cours de développement pour la mission spatiale CFOSAT. On s'est en particulier intéressés à l'une des méthodes d'élimination du bruit de speckle (bruit qui affecte de façon significative l'estimation des spectres des vagues), en l'occurrence la méthode dite « cross-spectre » qui utilise les spectres de signaux issus de deux mesures décalées dans le temps. On a pu valider cette méthode et estimer ses limites d'application dans une configuration de type KuROS ou SWIM/CFOSAT (antenne tournante) alors qu'elle n'avait été utilisée jusqu'ici que dans une configuration de radar imageur SAR (antenne fixe sur le côté).

Une première étude sur le niveau du speckle a également été menée, ce qui a mis en évidence que dans la configuration de KuROS, ce bruit est non seulement lié aux caractéristiques du radar (nombre

d'intégrations, Bande Doppler,..) mais également aux propriétés de la surface elle-même (temps de corrélation des diffuseurs).

Une nouvelle méthode de levée d'ambiguïté sur la direction de propagation des vagues a été mise au point (elle reste encore à valider dans toutes les configuration de direction de vol par rapport à la direction des vagues).

Enfin, la méthode de partitionnement du spectre des vagues (estimation de différentes composantes d'état de mer telles que houles et er du vent) a été adaptée au cas de données très bruitées telles que les données issues de KuROS ou du radar SWIM/CFOSAT.

Des travaux sont en cours concernant l'évolution spatio-temporelle des champs de vague rencontrés pour HYMEX et PROETVS, en collaboration avec Météo-France (Service de Prévision Marine) pour la comparaison aux résultats des modèles numériques et avec le SHOM et l'IFREMER pour la comparaison aux données in situ.

La figure 2 illustre un exemple d'évolution du spectre de vagues omni-directionnel entre la côte et le large dans une situation de Tramontane (vent soufflant depuis la côte).

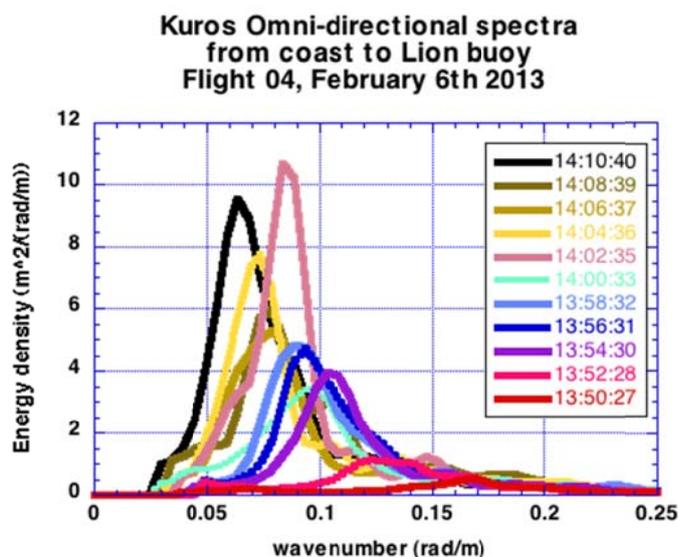


Figure 2 : Spectres de hauteurs de vagues en fonction du nombre d'onde des vagues, pour le 6 février 2013 en différents points de mesure répartis tous les 12 km environ le long d'un axe terre-mer à peu près aligné avec la direction du vent (Tramontane) : 1<sup>er</sup> spectre, en rouge sombre à 15km de a côte environ, dernier spectre en noir environ 120 km plus loin.

## Tableau récapitulatif

		Nombre
1	Publications d'articles originaux dans des revues avec comité de lecture référencées dans <b>JCR</b> ( <i>Journal Citation Reports</i> ) (ajouter des lignes si nécessaire)	
	Année n+1 : 2014	1
	Caudal G., D. Hauser, R. Valentin, C. Le Gac, KUROS : A new airborne Ku-band Doppler radar for observation of ocean surfaces, Jour. Atmos. and Oceanic Technology, Vol. 31, No. 10. , 2223-2245, 2014	
	Année n+2 :	
	Année n+3 :	
	Année n+4 :	
	Année n+5 :	
	Année n+6 :	
	Année n+7 :	
	<b>Total</b>	
2	Publications dans d'autres revues ou ouvrages scientifiques faisant référence dans le domaine	3
	Hauser D., Caudal G., Le Gac C., Valentin R., Delaye L., Tison C., KUROS : A new airborne Ku-band Doppler radar for observation of the ocean surface, Proceedings of the IGARSS2014 conference, 14-18 July, Quebec-City (Canada)	
	Hauser D., G. Caudal, C. Le Gac, R. Valentin, L. Lapauw, L. Delaye, N. Pauwels, C. Tison, KUROS : A new airborne Ku-band Doppler radar for observation of the ocean surface, proceedings of the International radar conference, 13-17 Octobre 2014, Lille (France)	
	Hauser D., G. Caudal, C. Tison, R. Valentin, C. Le Gac, et al.. A study of speckle properties over the ocean surface from the airborne radar Kuros. ENVIREM 2015 : L'Environnement Electromagnétique des radars à l'horizon 2020 : quels enjeux en termes de modélisation et moyens de mesures ?, Jun 2015, Gif-sur-Yvette, France. 2015	
	Rapport scientifique annuel (2015) de Météo-France: 1 page est consacrée aux campagnes KuROS	
3	Publications sous forme de rapports techniques	
4	Articles dans des revues ou journaux « grand public »	
5	Communications dans des colloques internationaux Les 3 mêmes qu'à la rubrique 2 et : CHEN Ping , YIN Qiaohua, WANG Liye : Impact of non Gaussian surfaces on the near-nadir radar cross-section and the future analysis of CFOSAT data, conférence internationale IGARSS 2016 (juillet 2016, Pékin)	
6	Documents vidéo-films	
7	DEA ou MASTER 2 ayant utilisé les données de la campagne Laura Gómez Navarro : X-band remote sensing of the sea surface , stage de Master 1 à LPO IFREMER, 2015	
8	Thèses ayant utilisé les données de la campagne	
9	Transmission à une banque de données : non mais des données sont fournies à la société Alyotech dans le cadre d'un contrat R&T CNES auquel le LATMOS est associé et un site Web d'accès aux données est en préparation.	Non/Oui
10	Considérez-vous la publication des résultats terminée ? Si en cours, préciser et donner les échéances NON	en cours/terminée

## Références

**R1 - Références des publications d'articles originaux dans des revues avec comité de lecture référencées dans JCR** (vérifier dans la base « *Journal Citation Reports* » via « *ISI Web of Knowledge* » si les revues sont bien référencées) **et résumés des principales publications**. (Les classer par années croissantes).

**R2 – Références des publications parues dans d'autres revues ou des ouvrages scientifiques faisant référence dans la discipline.** (Les classer par année).

**R3 – Références des rapports techniques.** (Les classer par année).

**R4 – Références des articles parus dans des revues ou des journaux « grand public ».** (Les classer par année).

**R5 – Références des communications dans des colloques internationaux.** (Les classer par années croissantes).

**R6 – Liste des documents vidéo-films.** (Les classer par année).

**R7 – DEA ou MASTER 2 ayant utilisé les données de la campagne** (Nom et Prénom de l'étudiant, Laboratoire d'accueil. Sujet du DEA ou MASTER, Date de soutenance)

**R8 – Thèses ayant utilisé les données de la campagne** (Nom et Prénom de l'étudiant, Laboratoire d'accueil. Sujet de la thèse, Date de soutenance)

**R9 – Liste des données transmis** (Préciser les destinataires, SEDOO, autres banques de données, équipes scientifiques ...)

**R10 – Liste des résultats restant à publier – échéance**