



**HAL**  
open science

## **Projet SWALIS. Mesures radar aéroportées en bande Ka : premiers résultats**

Jean-Claude Kokou Koumi, Stéphane Méric, É Pottier, Guy Grunfelder,  
Mohamed Himdi, Cécile Leconte, Paul Leroy, Jordi Chinaud, Alain Mallet

### ► **To cite this version:**

Jean-Claude Kokou Koumi, Stéphane Méric, É Pottier, Guy Grunfelder, Mohamed Himdi, et al..  
Projet SWALIS. Mesures radar aéroportées en bande Ka : premiers résultats. Journées Nationales  
Microondes, Jun 2022, Limoges (France), France. hal-03954264

**HAL Id: hal-03954264**

**<https://hal.science/hal-03954264>**

Submitted on 24 Jan 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Projet SWALIS. Mesures radar aéroportées en bande Ka : premiers résultats.

J-C. K. Koumi<sup>1</sup>, S. Méric<sup>1</sup>, É. Pottier<sup>2</sup>, G. Grunfelder<sup>1</sup>, M. Himdi<sup>2</sup>, C. Leconte<sup>2</sup>, P. Leroy<sup>3</sup>, J. Chinaud<sup>4</sup>, A. Mallet<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univ. Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, 35000 Rennes.

<sup>2</sup>Univ. Rennes, Université de Rennes 1, CNRS, IETR-UMR 6164, 35000 Rennes

<sup>3</sup>Univ. Rennes, Université de Rennes 1, CNRS, OSUR, 35000 Rennes

<sup>4</sup>Centre national d'études spatiales (CNES), 31401 Toulouse

{jkoumi, smeric, ggrunfelder}@insa-rennes.fr; eric.pottier@univ-rennes1.fr

**Résumé** — Cet article décrit le système radar SWALIS (Still Water Low Incidence Scattering). Ce radar est dédié aux applications océanographiques et hydrologiques en se basant sur des mesures à angles d'incidences proche nadir. Les premières campagnes de mesures utilisant PIMA (Plateforme d'Ingénierie Multimodale Aéroportée) de l'IETR ont fourni des données pertinentes pour l'étude de zones d'eau. Des outils de traitements de données sont développés et les premières analyses statistiques montrent le haut potentiel du capteur SWALIS pour les mesures radars aéroportées en bande Ka.

### 1. Introduction

Les radars spatiaux pour l'océanographie et l'hydrologie utilisent la gamme d'incidence proche nadir. En effet, les signaux rétrodiffusés ont une amplitude plus importante pour des angles d'incidence proche de 0. À cet effet, la mission SWOT (Surface Water Ocean Topography), développée entre le CNES et la NASA, est basée sur l'utilisation d'un radar à synthèse d'ouverture d'altimétrie satellitaire interférométrique en bande Ka et avec une gamme d'angles d'incidence allant de 0,6° à 4,1°. La mission SWOT est chargée de mesurer le niveau des eaux à la surface terrestre (lacs, cours d'eau, océans).

Dans le cadre de la mission SWOT, nous avons développé un radar aéroporté expérimental appelé SWALIS (Still Water Low Incidence Scattering) pour estimer à la fois le contraste entre le signal radar rétrodiffusé par des surfaces en eau et celui rétrodiffusé par des surfaces terrestres. Nos expérimentations rendent compte aussi des conditions qui induisent une faible rétrodiffusion du signal radar à très faible angle d'incidence (de 0° à 5°). Ainsi, le système radar SWALIS est considéré comme un instrument de calibration/validation pour la mission SWOT.

Cet article décrit le système radar SWALIS. Dans une première partie, le système SWALIS est abordé avec les différents éléments qui composent le système aéroporté. Toutes les performances sont détaillées en ce qui concerne les paramètres d'acquisition et les caractéristiques de l'antenne. Dans un deuxième temps, l'intégration de SWALIS à bord de PIMA (Plateforme d'Ingénierie Multimodale Aéroportée) est décrite. Dans un troisième temps, nous

décrivons les premiers résultats obtenus en effectuant le traitement du signal rétrodiffusé. En conclusion, nous proposons les prochaines mesures envisagées avec SWALIS.

### 2. Système SWALIS

L'objectif principal du système radar aéroporté SWALIS est d'effectuer des mesures de rétrodiffusion (amplitude du coefficient de réflexion d'une surface rugueuse :  $\sigma_0$ ) à faible incidence afin de caractériser les zones d'intérêt hydrologique dans des conditions de vent faible [1]. Ces mesures sont utilisées pour étudier les thèmes suivants : "inhomogénéités" de rugosité des surfaces hydrologiques et effet de bord, conditions d'obtention de cas de "dark water" avec impacts sur SWOT, contraste entre les zones d'eau et les berges et zones partiellement couvertes (cultures, zones inondées) [2]. Nous proposons d'aborder SWALIS en décrivant les différentes parties de ce système.

#### 2.a. Description globale

Le système SWALIS [3] est divisé en 2 parties : la première se situe dans le cargo-pod localisé sous PIMA et la seconde correspond à la cabine de l'avion. Sur la figure 1, nous décrivons tous les éléments du système d'acquisition et les liens entre la partie installée dans le cargo-pod et celle qui est installée dans la cabine de l'avion.

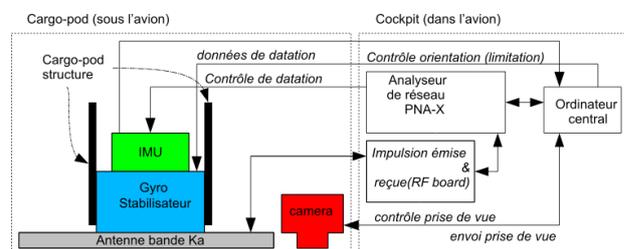


Figure 1. Description générale du système SWALIS.

Tous les appareils sont gérés par un ordinateur central. Cet ordinateur est utilisé pour définir des formes d'onde dont les caractéristiques peuvent être modifiées en fonction des missions prévues : durée des impulsions, temps de répétition des impulsions, liste de fréquences et puissance émise. De plus, les caractéristiques

de la procédure d'échantillonnage (période d'échantillonnage, durée d'échantillonnage et délai d'échantillonnage, nombre d'impulsions par rafale) et du balayage de fréquence (mode de balayage) sont fixées par cet ordinateur central. Une impulsion est caractérisée par une fréquence d'émission et une durée  $\tau$  et une rafale est constituée d'un nombre  $N$  d'impulsions à la même fréquence.

Un analyseur de réseau PNA-X est utilisé pour générer et recevoir un signal radio fréquence dans la bande Ka. L'analyseur de réseau transmet les données radar acquises à l'ordinateur central et envoie simultanément une commande pour récupérer les données d'attitude de l'antenne par le biais d'une carte logique. Ces données d'attitude sont fournies par une centrale inertielle (voir 2.e.).

Enfin, l'ordinateur central gère également la commande de prise de vue. L'appareil photo est installé dans le cargo-pod et a pour but de prendre des photos du terrain pendant l'expérience. Cet appareil est fixé au cargo-pod et suit donc l'attitude de l'avion.

### 2.b. Acquisition de données

La forme d'onde du signal correspond à celle d'un signal impulsionnel de durée  $\tau$  et de fréquence de répétition  $f_R = 1/T_R$ . Les capacités du système d'acquisition déterminent le mode d'acquisition et de stockage des données radar. Le choix du système d'acquisition est porté sur le dispositif référencé KEYSIGHT PNAX 5224B 40 GHz pulsé (DSP version 5 avec l'option 118 FastCW et FIFO). Le choix de la fréquence FI pour le filtre d'entrée appliqué à l'échantillonneur, fixe les limites du plancher de bruit et la longueur de l'impulsion enregistrable. Le PNAX offre plusieurs méthodes pour mesurer l'impulsion. Nous optons pour le mode « pulse profile » permettant un échantillonnage temporel des signaux du PNA-X.

### 2.c. Antenne

Nous utilisons une technologie d'antenne à fente (« leaky-wave antenna ») pour réaliser l'antenne SWALIS. Ce type d'antenne permet un dépointage en fonction de la fréquence. Les caractéristiques physiques de l'antenne sont les suivantes :

- 480 mm (dans le plan du dépointage -plan H- donc perpendiculaire à la direction du vol) x 270 mm (dans le plan parallèle à la direction du vol -plan E-) x 16 mm d'épaisseur,
- 32 guides d'ondes orientés perpendiculairement au plan E
- 80 fentes décrites le long de chaque guide d'ondes suivant le plan H.

Deux ports d'accès sont disponibles pour transmettre ou recevoir des signaux RF. Nous décrivons la convention des angles de dépointage en fonction des ports d'alimentation sur la figure 2. L'angle  $\theta$  concerne l'angle d'incidence ou l'angle de dépointage. L'évolution de cet angle en fonction de la fréquence d'émission est représentée sur la figure 3. En outre, les angles d'ouverture en fonction de la fréquence dans le plan E et le plan H sont respectivement de  $1,6^\circ$  et  $1,25^\circ$ . Le gain d'antenne mesuré est d'environ 36 dBi.

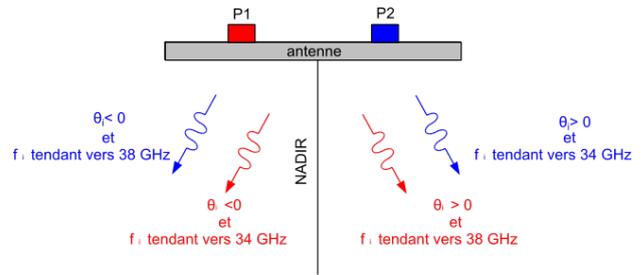


Figure 2. Convention de dépointage de l'antenne.

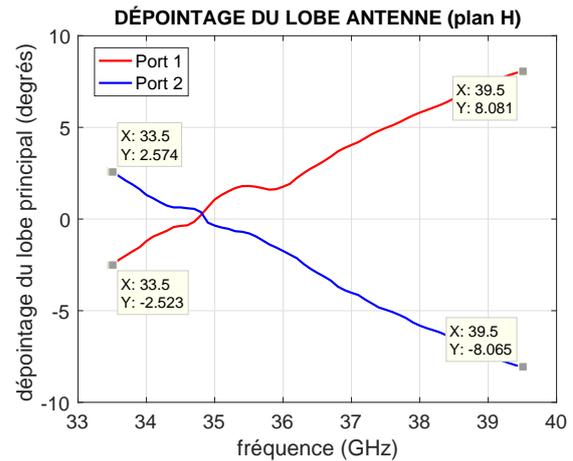


Figure 3. Dépointage antenne en fonction de la fréquence, plan H.

### 2.d. Système gyro-stabilisateur

Le système de gyro-stabilisation est utilisé pour stabiliser l'antenne quelque soit le mouvement de l'avion. Ce système doit maintenir l'axe perpendiculaire au plan de l'antenne dans la direction du nadir. L'exploitation des données de mesure peut se faire s'il est possible de stabiliser à  $\pm 0,1^\circ$  l'axe de l'antenne pendant une période d'intégration. De plus, sur une trajectoire de mesure (dimensionnée actuellement à quelques kilomètres), le faisceau doit rester sur les angles d'incidence de  $\pm 0,5^\circ$ . Le choix se porte donc sur la référence SOMAG CSM130 qui répond aux exigences de stabilisation. Le gyro-stabilisateur dans la nacelle est illustré à la figure 4 (a).

### 2.e. La centrale inertielle

Dans le but de géoréférencer les données radars mesurées, nous associons une centrale inertielle (IMU pour *Inertial Motion Unit*) à la plateforme de stabilisation afin d'estimer la position et l'attitude du porteur. La centrale inertielle utilisée est de type EKINOX SBG INS (modèle N) et fournit des informations à la fréquence de 200 Hz via différents protocoles de transfert de données (FTP, Ethernet, CAN, serial link). Cette centrale permet ainsi d'enregistrer toutes les données de position de l'antenne SWALIS (données brutes GPS et données GPS corrigées avec un filtre de Kalman étendu) ainsi que l'attitude (roulis, tangage et lacet) et la vitesse (nord, est et verticale) pendant les vols. Les performances de l'IMU indiquent une précision sur les axes de roulis et tangage de  $0,05^\circ$  RMS



**Figure 4.** Étape de la mise en place du système global (a) cargopod, (b) intégration dans l'avion, (c) Partie RF dans la cabine.

et de  $0,1^\circ$  sur l'axe du lacet. De plus, l'acquisition des données est synchronisée avec chaque rafale. Dans notre cas d'étude, nous considérons que l'attitude de l'avion est stable pendant la durée d'une rafale (environ 100 ms).

### 3. Mise en place du système

Le système est installé à la fois dans le cargo-pod de l'avion (l'antenne, la centrale inertielle et la plateforme de stabilisation : figure 4(a)) et dans la cabine (le segment RF, l'ordinateur central et le PNA-X : figure 4(c)). Une vue globale est donnée sur la figure 4(b). Il faut noter la présence (non visible ici) de l'appareil photo prenant des clichés des zones illuminées par l'antenne SWALIS. Cette opération est fondamentale pour faire des comparaisons entre la vérité sol et les données radars.

### 4. Mesures et analyses

#### 4.a. Quick look

La campagne de mesures présentée ici a eu lieu le 30 avril 2019 au-dessus de la retenue d'eau de Saint Thuriel (Ille et Vilaine, France). Afin d'estimer les capacités de notre système, nous avons survolé cette retenue d'eau le long d'une trajectoire alternant les zones de terre et d'eau correspondant de TR2\_2 à TR2\_1, représentée sur la figure 5 (a). Les conditions de mesure sont les suivantes : filtre IF de 15 MHz, 60 échantillons par impulsion, 200 impulsions par rafale et 1 angle d'incidence (environ  $0,2^\circ$ ). Nous notons la dynamique importante (figure 5(b)) de la puissance réfléchiée par l'eau par rapport à celle des zones terrestres ( $\approx 15$  dB) ce qui rend possible l'exploitation des données radar pour un post-traitement.

#### 4.b. Traitement et analyse des données

Chaque puissance rétrodiffusée pendant une rafale (intégration de chaque impulsion) est ensuite représentée sur une carte en utilisant la bibliothèque folium (open source python). Le diamètre et la position l'empreinte au sol de l'antenne sur la carte tiennent compte de la hauteur de la plate-forme aéroportée, des paramètres de l'antenne ainsi que des mouvements de l'avion (roulis, tangage et lacet) pendant l'acquisition. La figure 6 illustre la cartographie de l'enregistrement affichée sur la figure 5(b). Nous retrou-

vons géographiquement l'alternance des zones eau/terre.

L'acquisition du 24 juillet 2020 correspond au survol de la même réserve d'eau en suivant une autre trajectoire sur une alternance de zones de terres et d'eau correspondant de TR3\_2 à TR3\_1 (figure 5(a)). Pour cette campagne, les conditions de mesure sont : filtre IF de 15 MHz, 30 échantillons par impulsion, 50 impulsions par rafale. De plus, nous activons le mode balayage en incidence en sélectionnant une fréquence différente par rafale. Les angles d'incidence obtenus sont au nombre de 13 :  $-1,63^\circ$ ,  $0,14^\circ$ ,  $1,83^\circ$ ,  $2,75^\circ$ ,  $3,06^\circ$ ,  $3,57^\circ$ ,  $4,37^\circ$ ,  $5,56^\circ$ ,  $6,22^\circ$ ,  $7,56^\circ$ ,  $8,38^\circ$ ,  $8,8^\circ$  et  $10,32^\circ$ . La figure 7 montre le positionnement sur la carte de la réponse de chaque rafale. La ligne rouge dégradée indique la trajectoire de la plateforme aéroportée. Nous pouvons clairement remarquer que la puissance rétrodiffusée par l'eau est plus élevée que celle de la terre à la même incidence. La puissance rétrodiffusée à partir d'un angle d'incidence élevé (non proche du Nadir) est très faible, que ce soit pour le survol de l'eau ou de la terre. De plus, nous pouvons également afficher les données caractéristiques de l'empreinte au sol (rayon de l'empreinte au sol, fréquence d'illumination, etc...).

Une analyse statistique [4] qualitative est aussi appliquée sur les données enregistrées du 24 juillet 2020 (6722 rafales sur l'eau et 5064 rafales sur la terre). Cette analyse statistique illustre le contraste visible entre la puissance rétrodiffusée par l'eau et la puissance rétrodiffusée par la terre. La figure 8 montre la répartition de la puissance reçue en fonction de l'angle d'incidence et le contraste terre-eau pour ces classes d'incidences. Cette puissance reçue diminue quand l'angle d'incidence augmente.

### 5. Conclusion

Cette communication décrit le système de mesure radar SWALIS destiné à effectuer des mesures de puissance rétrodiffusée par le sol lorsque SWALIS est embarqué sur PIMA ; le sol pouvant être l'eau ou la terre. Nous décrivons les résultats obtenus à la fois lorsque le système est en mode mono-incidence et à la fois en multi-incidence. Les procédures de traitement du signal développées per-

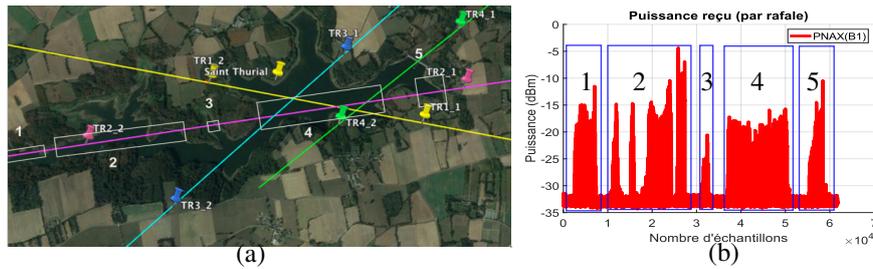


Figure 5. Campagne SWALIS (30 avril 2019) (a) plan de vol, (b) quick look.

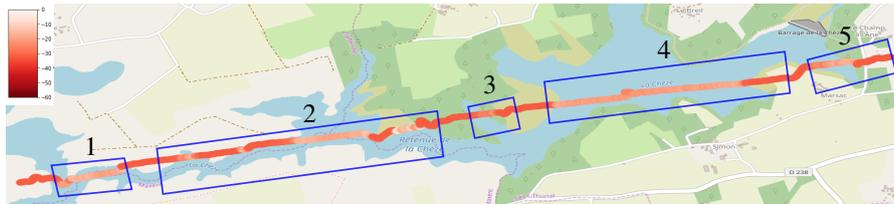


Figure 6. Affichage sur carte d'une acquisition SWALIS (30 avril 2019).

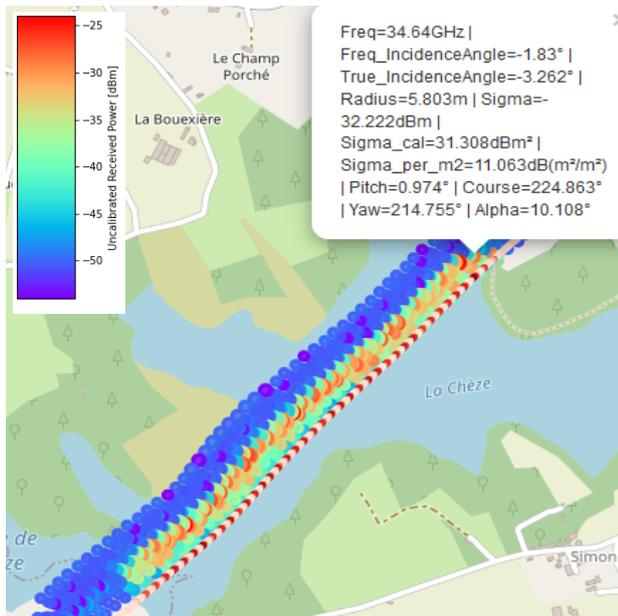


Figure 7. Affichage sur carte d'une acquisition multi-incidences (24 juillet 2020).

mettent de situer géographiquement la puissance rétrodiffusée par le sol. De même, le mode multi-incidences permet de balayer des zones étendues afin d'effectuer des statistiques sur la puissance de rétrodiffusion.

Des campagnes de calibration sont en cours afin de valider nos mesures radar dans la bande Ka en vol au dessus des eaux et terres et ainsi établir une relation entre la puissance mesurée et la surface équivalente radar associée.

## 6. Remerciements

Les auteurs remercient le CNES et le GIS BRETEL (Bretagne Télédétection) pour leur soutien logistique et financier dans le projet SWALIS ainsi que Jean-Claude Laurie, co-initiateur du projet.

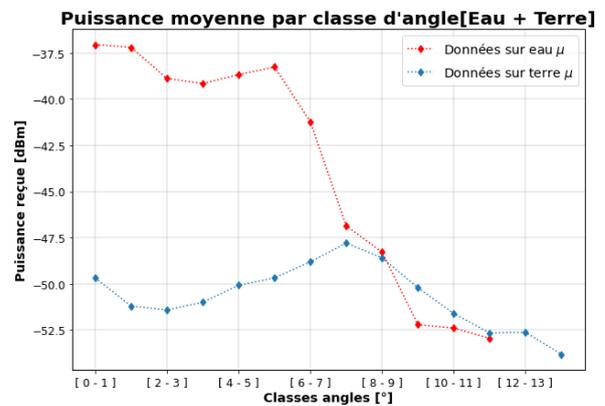


Figure 8. Contraste entre les données eau et données terre.

## Références

- [1] F. T. Ulaby and D. G. Long, *Microwave radar and radiometric remote sensing*. Ann Arbor : University of Michigan press, 2014.
- [2] S. M. Sherman and D. K. Barton, *Monopulse principles and techniques*. Norwood, Mass. : Artech House, 2011, oCLC : 839825917.
- [3] S. Méric *et al.*, "SWALIS/KaRADOC : an airplane experiment platform developed for physics measurement in Ka band. Application to SWOT and SKIM mission preparations," in *proceedings of 6th Workshop on Advanced RF Sensors and Remote Sensing Instruments & 4th Ka-band Earth Observation Radar Missions (ARSI'19 & KEO'19)*, ESA/ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas, Novembre 2019.
- [4] J.-C. Koumi *et al.*, "The SWALIS project : First results for airborne radar measurements in Ka band," in *proceedings of European Radar Conference (EuRAD 2020)*, Utrecht, Pays-Bas, Janvier 2021.