Estimation de paramètres de surface par télédétection micro-onde passive : le radiomètre aéroporté bande-L CAROLS

M. Pardé, M. Zribi, P. Fanise, P. Leroy, M. Dechambre, D. Hauser, P. Waldteufel

Résumé

La mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) utilisera les nouvelles technologies interférométriques afin d'observer la surface terrestre à la fréquence de 1.4 GHz (bande L) pour différents angles de visé. Le radiomètre mesurera la température de brillance du sol et des océans dans le but de suivre l'évolution spatio-temporelle de l'humidité du sol ainsi que de la salinité de la surface de la mer. Dans le cadre de la validation de cette nouvelle mission spatiale, a été réalisé au LATMOS un radiomètre aéroporté en bande L nommé CAROLS. L'objectif est de mieux comprendre et modéliser la physique de la mesure liée à l'estimation de la salinité de surface de l'océan et à l'humidité superficielle des sols et de contribuer à la validation du radiomètre de SMOS. Nous présenterons la mission SMOS ainsi que les objectifs environnementaux associés. Nous rappellerons brièvement les principes de télédétection micro-onde ainsi que différentes méthodes permettant d'estimer les paramètres de surface tels que l'humidité et la salinité. Ensuite nous présenterons le radiomètre CAROLS avec ses différentes spécificités, notamment les étapes nécessaires de son étalonnage. Enfin, nous présenterons les premiers résultats des campagnes qui viennent d'être effectuées dans le Sud de la France et dans le Golf de Gascogne.

1 Introduction

Différents enjeux majeurs pour l'environnement sont actuellement au centre de nombreux débats scientifiques et sociologiques. Le changement climatique, sa quantification et les impacts éventuels qu'il pourrait avoir sur l'équilibre de la planète sont des questions primordiales posées aux spécialistes du climat. L'éventualité d'une intensification des évènements extrêmes (inondations, ouragans...), la disponibilité des ressources en eau ainsi qu'en énergie (souvent d'origine hydrologique) sont également des préoccupations importantes dans de nombreuses régions du monde, et mobilisent donc une large communauté scientifique.
Météorologues, Climatologues et Hydrologues ont comme principal objectif de comprendre les phénomènes mis en jeux, de les modéliser puis de les quantifier. Une part importante des recherches est effectuée autour des processus de surface, processus qui jouent un rôle clé sur le cycle hydrologique global comme sur le climat de la Terre. Ils englobent de multiples aspects, allant des échanges hydriques et énergétiques entre la biosphère et l'atmosphère, à l'évapotranspiration, à la répartition de l'énergie en surface, à la diffusion de chaleur dans le sol, et aux différents processus hydrologiques dans le sol.
Le manque de données relatives au suivit l'humidité du sol à large échelle constitue actuellement une limitation importante au développement de la modélisation et de la compréhension des éléments d'interaction sol-biosphère-atmosphère. Il a également été montré qu'une cartographie de l'humidité du sol serait une avancée importante dans l'étude de l'évolution du climat.

C'est dans ce contexte que le programme de l'ESA (European Space Agency) de lancement d'un satellite appelé SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) a été initié [1]; le lancement est prévu pour juillet 2009. Cette mission a pour objectif l'estimation de la salinité des océans, variable importante pour l'étude de la dynamique de la circulation océanique et du couplage océan/atmosphère et non mesurée de façon globale à l'heure actuelle, et l'estimation de l'humidité du sol. En ce qui concerne l'humidité du sol, un des objectifs est de renseigner les modèles de circulation générale et de décrire les conditions aux limites pour les modèles d'hydrologie à moyenne et grande échelle. Peu de méthodes fiables d'estimation l'humidité de surface par satellite à une telle échelle existent (des méthodes récentes basées sur des mesures RADAR sont en développement).

L'object de cet article est la présentation de l'instrumentation CAROLS (Combine Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies) développée au LATMOS (Laboratoire ATmosphères, Milieux et Observation Spatiale). L'objectif étant la préparation et la validation du radiomètre de SMOS, nous avons réalisé (en collaboration avec l'université technologique du Danemark, TUD) un radiomètre micro-onde avec la vocation à être embarqué dans un avion. Nous avons effectué deux campagnes de mesures aéroportés en 2007 et 2008 avec comme double objectifs la validation du radiomètre et l'amélioration de nos connaissances sur l'émission de différentes cibles : (i) sites continentaux contrôlés dans le sud de la France, (ii) les mesures radiométriques sur le golf de Gascogne étaient simultanées à une campagne de mesure en mer.

Nous présenterons dans la section suivante (section 2) le contexte de la campagne CAROLS, puis les principes de la radiométrie micro-onde passive (section 3), les missions aéroportées effectuées en 2007 et 2008 (section 4) et enfin les premiers résultats de ces missions (section 5).

2 Contexte et objectifs de la campagne CAROLS : La validation du satellite SMOS

Pour arriver à satisfaire les objectifs décrits en introduction, SMOS utilise un concept très novateur d'interférométrie (1,4 GHz). Le capteur acquiert des températures de brillance (Tb) des surfaces avec différents angles d'incidence. À cette fréquence l'atmosphère et les nuages sont quasi transparents, les mesures seront effectuées par tous les temps. La possibilité d'avoir des mesures multi-angulaires devrait permettre, sur les continents, de séparer l'effet de la végétation de celui du sol. Sur les océans, l'observation de l'émission avec plusieurs angles d'incidence devrait parallèlement permettre de séparer l'effet des vagues de celui due à la salinité de la surface. La mesure des températures de brillance de surface sera effectuée avec une résolution de 43 km en moyenne, et cela tous les trois jours au plus.

Les températures de brillance mesurées par le radiomètre de SMOS (MIRAS, Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) représentent l'énergie émise par la surface à une fréquence donnée:

$$T_{bf}(\theta,\phi) = I_f(\theta,\phi)\frac{\lambda^2}{2k}$$

Où λ est la longueur d'onde, θ est l'angle d'incidence, Φ l'azimut d'observation, k est la constante de Boltzmann et I_f est l'intensité spécifique.

Cette émission dépend au premier ordre de la température physique de ces corps mais également des propriétés électromagnétiques (typiquement la permittivité) et de l'état de surface (rugueuse ou non). Sur les continents, la permittivité du sol dépend essentiellement de l'humidité, la matière solide a une permittivité très faible (ε~3-4) comparée à celle de l'eau (ε~80) ; les quelques premiers centimètres ont un impact effectif sur la mesure de télédétection. La rugosité du sol et la végétation ont ensuite un effet important sur l'émission de la surface; ces effets doivent être pris en compte (correctement modélisés) afin d'être séparés de l'effet de l'humidité.
Sur les surfaces océaniques, la température de l'eau, les vagues et la salinité de la surface influent sur Tb. La salinité influe assez faiblement sur l'émission micro-onde alors que l'impact des vagues, difficilement calculable, a un effet important. Inverser la salinité est donc un défit important, une grande sensibilité du radiomètre est requise. Une modélisation très fine des différentes contributions à la température de brillance est nécessaire sur les océans d'une part, et d'une autre part la mesure radiométrique doit être très sensible et stable dans le temps. Cette dernière contrainte est également valable pour les mesures aéroportées que nous avons effectuées.

L'estimation de l'humidité devrait être faite avec une précision de 4%, l'objectif pour l'estimation de la salinité est une précision de 0.1 psu (parctical salinity unit; la salinité de la mer variant typiquement entre 34-37 psu).
Pour l'étalonnage et la validation du radiomètre MIRAS, différents sites ont été instrumentés afin de mesurer les paramètres de surface sur de longues périodes. Différents sites ont été équipés de radiomètres *in situ* et plusieurs campagnes de mesures aéroportées sont également planifiées.

La campagne CAROLS a pour principal objectif la validation de la mesure du futur radiomètre MIRAS de SMOS.
Plus précisément sur les surfaces continentales :

- Fournir des mesures radiométriques indépendantes sur les sites d'étalonnage,
- Etudier l'inhomogénéité interne d'un pixel SMOS (40 x 40 km),
- Identifier et caractériser certaines sources d'interférence perturbatrices.

Sur les surfaces océaniques :

- Mieux comprendre et modéliser l'émissivité en fonction des paramètres de surface,
- Améliorer ou développer empiriquement les paramétrisations physiques
- Contribuer à l'étalonnage de SMOS dans des conditions optimales de comparabilité.

Afin de répondre à ces objectifs scientifiques, différents sites ont été sélectionnés pour les campagnes aéroportées, ceux-ci seront présentés par la suite.

3 La radiométrie micro-onde

Notre objectif est d'estimer des températures de brillance (Tb), grandeur proportionnelle à la puissance émise par une source, pour deux polarisations perpendiculaires (que nous appellerons X et Y), à l'entrée du radiomètre à partir des mesures électriques effectués par l'instrument. Pour cela, différentes phases d'étalonnage sont programmées au cours du vol à différents intervalles de temps, suivant la cible observée. De plus, pour compléter cet étalonnage, des mouvements d'avion sont programmés sur l'océan afin d'estimer les paramètres de correction dues à l'antenne et aux OMT (Ortho-Mode Transducer, un guide d'onde séparant les polarisations orthogonales). Enfin, un certain nombre de mesures en laboratoire sont nécessaires afin de compléter l'étalonnage. Nous présentons ici les caractéristiques du radiomètre CAROLS ainsi que les étapes nécessaires à sont étalonnage; l'objectif étant la mesures du signal émis avec une grande précision, de l'ordre de 0.1 K.

3.1 Caractéristiques du radiomètre

Nous résumons ici les principales caractéristiques du radiomètre CAROLS, radiomètre conçu comme une copie du radiomètre EMIRAD développé à l'Université Technologique du Danemark (TUD) [2] :

- Il est de type polarimétrique à échantillonnage subharmonique [2]: les 4 paramètres de Stockes (I, Q, U et V) sont mesurés simultanément grâce à la mesure des corrélations entre les signaux en polarisation H et V,
- La bande de fréquence de mesure est 1400 – 1427 MHz à -3 dB,
- Les mesures sont effectuées à l'aide de deux antennes de type Potter, dont le lobe principal a une demi ouverture (HPBW) de 37.6°,
- Sensibilité et stabilité doivent être de l'ordre de 0.1 K.

3.2 Etalonnage

Figure 1 nous présentons un schéma de fonctionnement de CAROLS simplifié. V représente la mesure effectuée par le radiomètre représenté à droite de la ligne pointillée centrale. Il est relié à l'aide de câbles coaxiaux (coax) à l'OMT lui-même relié à l'antenne (à gauche du schéma). L'étalonnage complet du radiomètre revient à évaluer les différentes corrections nécessaires pour relier V aux températures de brillance à l'entrée de l'antenne.

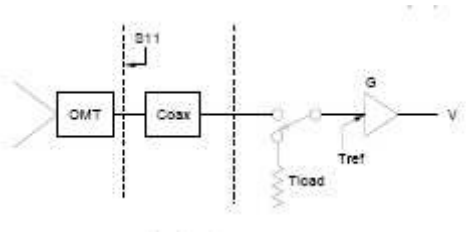


Figure 1: Schéma synthétique de
fonctionnement du radiomètre CAROLS

Le gain G et la température Tref (ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage) sont calculés à l'aide de la charge interne Tload à laquelle nous ajoutons un bruit N (une diode de bruit). Nous obtenons alors des Tb correspondants à l'entrée du radiomètre (au niveau des pointillés centraux). Il est alors nécessaire de calculer l'effet des câbles coaxiaux, celui des OMT (les deux effets sont des pertes) ainsi que les effets des désadaptations aux interfaces. L'équation de correction est la suivante :

$$T'_{out} = \frac{L_{cable}}{(1-S_{11}^2)}T'_b - (\frac{L_{cable}}{(1-S_{11}^2)} - \frac{1}{(1-S_{11}^2)})(1+\frac{S_{11}^2}{L_{cable}})T_{cable} - \frac{S_{11}^2}{(1-S_{11}^2)}\frac{T_{isol}}{L_{cable}}$$

Ici T'_{out} est Tb à l'entrée de l'OMT, L_{cable} est la perte des câbles, S_{11} est le paramètre de réflexion à l'interface câble-OMT, T_{cable} est la température physique moyenne des câbles et T'_b est Tb à l'interface câble-radiomètre ; T_{isol} est la température physique du connecteur câble-OMT.
Deux méthodes sont mises en œuvre pour cela mesurer les paramètres L_{cable} et S_{11}:

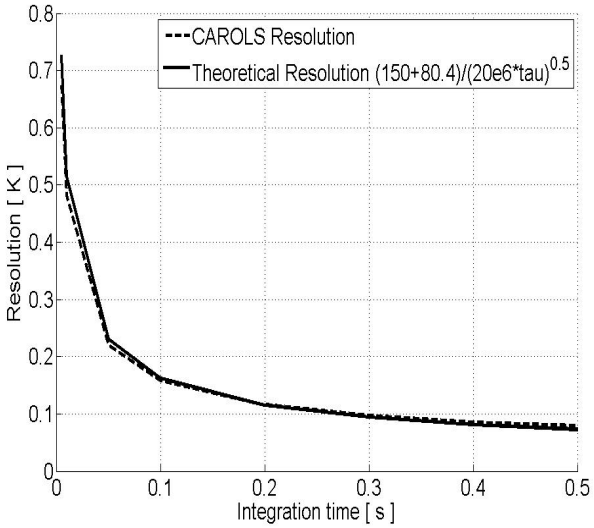
- Estimer les pertes des câbles est possible à l'aide d'une charge cryogénique (dont la température est connue avec précision, et égale à 79 K) placée à l'entrée des câbles dans un premier temps, puis à l'entrée du radiomètre dans un second temps. La différence des deux mesures nous indique la perte du câble.
- La seconde étape consiste à utiliser les mesures effectuées en vol au dessus de l'océan pendant les mouvements d'aile de l'avion.

Cette seconde étape nous permet d'estimer l'effet de l'OMT (perte supplémentaire) et de le corriger ensuite. L'équation permettant de corriger les pertes d'OMT est la suivante :

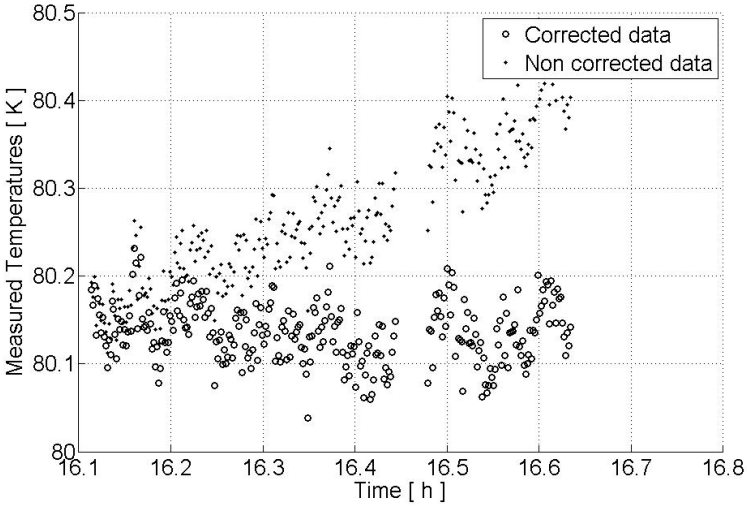
$$T_{out} = T'_{out}\ L_{OMT} + (1 - L_{OMT})T^p_{OMT}$$

où L_{OMT} est la perte d'OMT, T^p_{OMT} est la température physique de l'OMT et T_{out} la température à l'entrée de l'antenne.

Pour estimer ces pertes, nous utilisons des mouvements spécifiques de l'avion (voir chapitre suivant) permettant aux antennes d'observer la surface océanique avec une gamme d'angles allant de -25° à +25° pour l'antenne nadir, et de 0 à 70° pour l'antenne de coté. Les mesures effectuées au nadir sont ainsi utilisées pour l'étalonnage étant donné qu'à cet angle de visée les Tb aux deux polarisations doivent être égales.



(a)



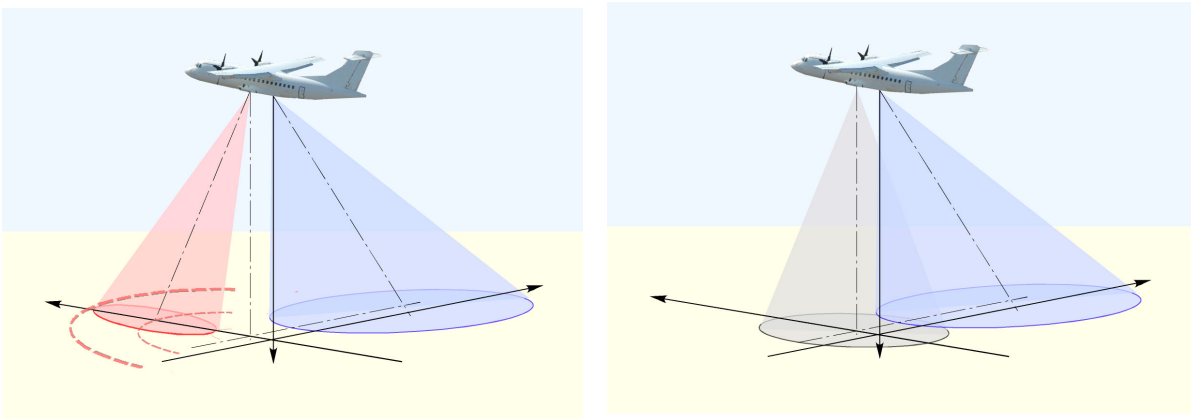
(b)

Figure 2 : Evaluation des performances du radiomètre CAROLS. (a) Comparaison entre la résolution théorique (ligne pleine) et la résolution mesurée (tirets) du radiomètre ; (b) Illustration de la stabilité du radiomètre. Les points indiquent les Tb mesurés sur la charge cryogénique en utilisant uniquement une période d'étalonnage vers 16.1 H, les ronds indiquent les mêmes Tb corrigés à l'aide de deux périodes d'étalonnage, à 16.1 H et à 16,45 H.

Finalement, nous avons évalué les capacités du radiomètre en laboratoire. Les Figure 1 (a) et (b) illustrent la sensibilité de l'instrument (a) et la stabilité de celui ci (b). La figure de sensibilité nous montre qu'avec une intégration des données de plus de 0.3 secondes le radiomètre nous donne une sensibilité meilleure que 0.1 Kelvin, suivant ainsi la courbe théorique. Une intégration des données toutes les 1 s étant adéquate aux mesures aéroportées sur terre et sur océan, nous en déduisons que la sensibilité du radiomètre est très satisfaisante.
La seconde figure nous montre que l'utilisation des points d'étalonnage à intervalles réguliers (ronds noirs) nous permet de garder une stabilité meilleur que 0.1 Kelvins sur plus de 30 minutes : en n'utilisant qu'une seule période d'étalonnage (donc une valeur G et une valeur Tref) avant ces 30 minutes (les points noirs), nous observons une déviation de plus de 0.2 K de la mesure. La stabilité du radiomètre est donc assurée par l'observation régulière de la charge interne additionnée à celle de la diode de bruit.

4 Description des campagnes CAROLS 2007 et 2008

Les deux campagnes, 2007 et 2008, ont été menées en suivant un protocole similaire. Environ 5 vols étaient planifiés, avec deux configurations d'observation différentes. Ces deux configurations d'observation sont présentées Figure 3. La première (a) permet l'utilisation simultanée d'un radar et de l'antenne passive de coté (antenne placée à l'arrière, observant à droite de l'avion avec un angle de 33°), la seconde (b) permet d'observer la surface avec le radiomètre, pour deux angles de visée: au Nadir (antenne placée à l'avant de l'avion), et celle de Coté.

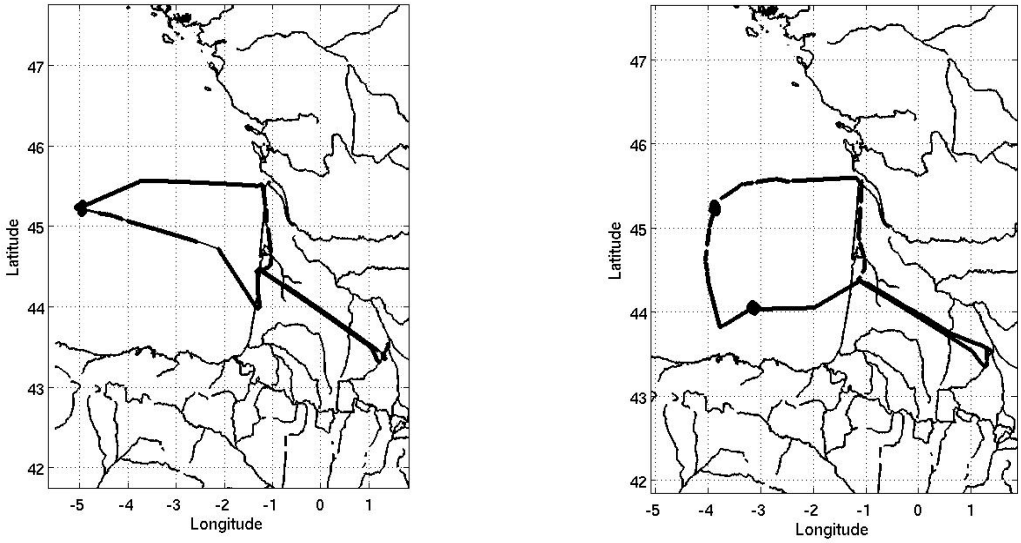


(a) (b)

Figure 3 : Configurations d'observation de CAROLS (a) l'antenne CAROLS de coté installée avec l'antenne radar et (b) des deux antennes CAROLS, visant au nadir et sur le coté avec un angle de 33°.

Pour chaque année, le plan de vol était légèrement différent, ces deux plans sont tracés Figure 4. Les vols débutent en fin d'après midi afin d'éviter les problèmes de réflexion solaire sur la surface de l'océan. Différentes cibles sur terre étaient d'abord survolées:

- le site SMOSrex, au sud de Toulouse, instrumenté pour des mesures sur sol nus et en jachère: mesures d'humidité à différentes profondeurs, mesures de température de sol et de caractéristiques de la végétation. Ce site est également équipé d'un radiomètre observant la surface.
- Le transect SMOSmania, 5 stations de mesures météorologiques et hydrologiques (humidité et température de la surface) sont installées entre Toulouse et Bordeaux.
- Le site forestier Nezer, dans Les Landes. Ce site est également instrumenté afin de mesurer les différentes variables de surface ainsi que différentes caractéristiques du couvert forestier. La caractérisation de la signature radiométrique des couverts forestier est pour l'instant mal connue, nous souhaitons, avec CAROLS, approfondir son étude.



(a) (b)

Figure 4 : Tracé des lignes de vols suivies durant les campagnes CAROLS (a) 2007 et (b) 2008.

La suite consistait à survoler l'océan dans le golf de Gascogne. Une campagne de mesure était effectuée en mer : des mesures météorologiques (vent, température de l'air...) et océanographiques (salinité, température de l'eau et taille des vagues) étaient planifiées régulièrement tout au long du trajet de l'avion. Ajoutons que des bouées de mesure ont été placées en mer pour compléter ces mesures.

Sur l'océan, deux types d'observations particuliers ont été effectués pendant chaque vol :

- A plusieurs reprises l'avion effectuait des mouvements de roulis (angles de ±25-30° maximum) puis des mouvements de tangage (angles de ±5° environ), l'objectif était d'obtenir des profils angulaires de l'émission de l'océan, et comme nous l'avons vu précédemment, d'étalonner l'instrument CAROLS.
- Par deux fois l'avion effectuait des cercles sur la gauche et sur la droite afin d'observer la répartition azimutale des réflexions du ciel sur la surface.

Pour chacune des campagnes, deux vols étaient effectués dans la configuration CAROLS avec une seule antenne (et une antenne radar) et deux autres dans la configuration CAROLS avec deux antennes. Cependant pour la campagne 2008 nous avons ajouté à cela 3 vols particuliers, de jour, pour l'observation à différentes altitudes de sites agricoles dans le sud de Toulouse. Dans ce derniers cas, 3 paliers étaient effectués (450, 750, 1200, 1450 m) afin de survoler une même région sur 10 km environ.

5 Premiers résultats des campagnes 2007 et 2008

5.1 Présence de RFI (Radio Frequency Interference)

Un des objectifs de la campagne CAROLS est d'analyser la pollution électromagnétique qui perturbera éventuellement la mesure du satellite SMOS. Nous avons observé deux types de RFI différents qui sont illustrés Figure 5 : (a) Tout du long de la ligne de vol, une faible partie des mesures se trouve ponctuellement au dessus de la moyenne. Ces mesures peuvent aisément être filtrées grâce au calcul du kurtosis (β_2) définit par la formule suivante :

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$$

μ_4 est le moment centré d'ordre 4, σ est la déviation standard. Une distribution gaussienne (ce qui est le cas de l'émission des surfaces naturelles) a un kurtosis égal à 3 ; les autres distributions ont au contraire un kurtosis différent de 3. Les émissions entropiques n'étant pas gaussiennes, il est possible de discriminer facilement une grande partie des RFI. Néanmoins, la Figure 5 (b), représentant des températures de brillance (en polarisation H et V) à l'approche d'une forte source, nous montre des données filtrées (seuls les données avec un kurtosis $\subset$ [2.9 - 3] ont été gardées) avec des valeurs anormalement hautes. Nous avons observé que cette source de RFI était l'émission puissante d'une antenne à la fréquence 1429 MHz.

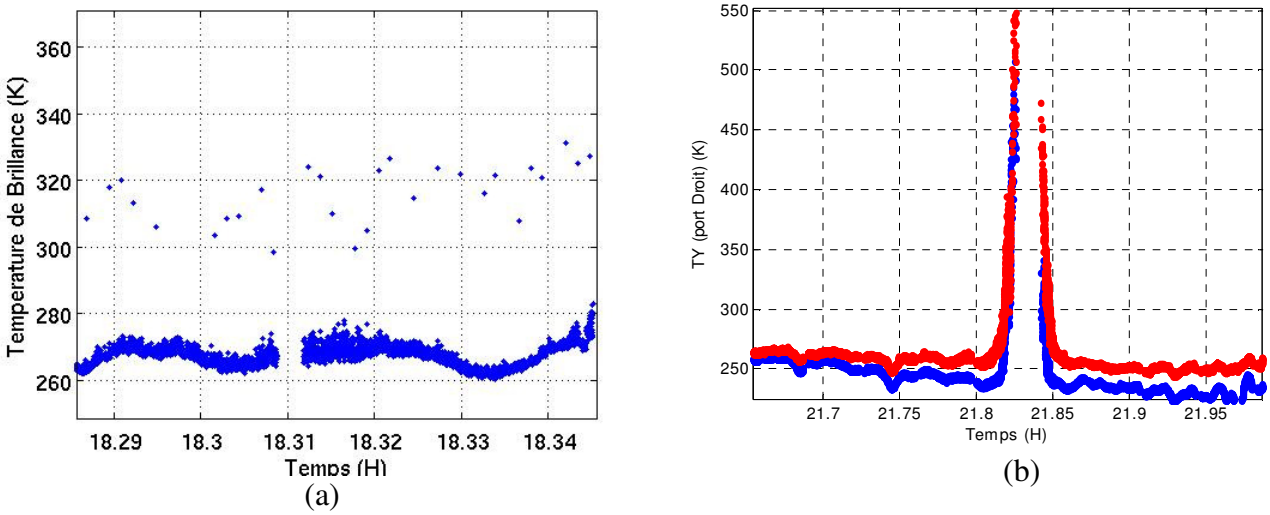


Figure 5 : (a) Températures de brillances mesurées en polarisation H sur le continent. Les points ne suivants pas la courbe bleu correspondent à des émissions de type RADAR (b) Tb mesurés en polarisation H (bleu) et V (rouge) à l'approche de la ville de Auch

En collaboration avec le CNES (Centre National d'Etude Spatiale) nous avons établit une carte des émetteurs autorisés à émettre proche de la bande L protégée, et ainsi des zones qui pourront être problématiques pour le satellite SMOS. Cette carte, présentée Figure 6, nous indique une forte concentration de ces antennes dans le Sud Ouest de la France ; ces antennes émettent alors en polarisation H. Dans le reste du pays, l'émission est plutôt en polarisation V.

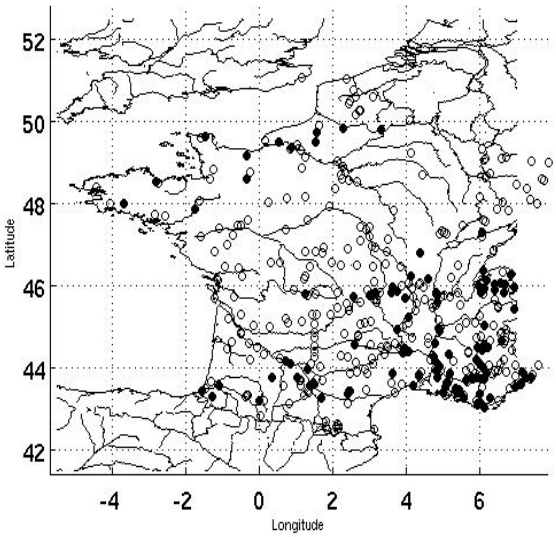


Figure 6 : Position en France des antennes émettant dans la bande de Fréquence proche de 1427 MHz, les points noirs correspondent aux antennes émettant en polarisation H et les points blancs en polarisation V.

5.2 Premiers résultats sur le continent

Un des objectifs des missions CAROLS est l'évaluation de l'effet d'échelle dans l'émission micro-onde des surfaces. Pour répondre à cet objectif, nous avons planifié en 2008 des vols multi altitude entre les villes de Noé et Auterive. Nous présentons Figure 7 les mesures en polarisation Y (équivalente à la polarisation H) dans le repère de l'antenne avec, pour couleur l'altitude de l'avion. Nous observons ici que la variabilité des Tb est très forte à faible altitude; les variations locales (lacs, bosquets...) ont un impact sur les mesures importante. Lorsque l'altitude augmente, cette variabilité diminue, l'effet au premier ordre devient alors la topographie. Néanmoins nous montrons également que la valeur moyenne de Tb sur l'ensemble du transect ne variait pas en fonction de l'altitude de l'avion.

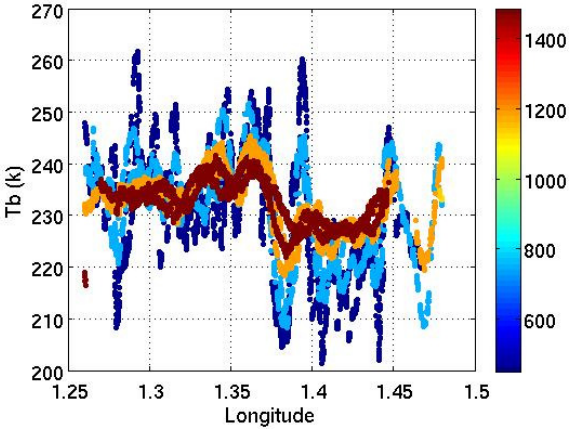


Figure 7 : Evolution des Tb en fonction de l'altitude (couleur, en mètre), en polarisation H et pour un angle de 30°.

5.3 Comparaison aux sorties de modèle sur l'Océan

Sur l'océan, nous avons comparé les mesures durant les mouvements de roulis et de tangage de l'avion avec les sorties d'un modèle nommé TRAP (Terrestrial Radiometry Analysis Package) et développé à l'Ifremer. Ce modèle permet de calculer l'ensemble des contributions géophysiques à la température de brillance mesurée par le radiomètre:

- Contribution de la mer plate (modèle de Klein et Swift, [3]),
- Contribution des vagues (modèle d'émissivité 2-scale, [4]),
- Effet de l'atmosphère, émission propre et atténuation des autres contributions,
- Contribution du bruit galactique, atténué par l'atmosphère et réfléchi par la surface de l'océan,

La température de brillance est estimée pour différents points de la surface correspondants à la projection du lobe d'antenne pour les polarisations H et V. Ces températures de brillance sont ensuite projetées dans le repère de l'antenne puis intégrée sur le lobe de l'antenne. C'est finalement cette valeur intégrée qui est comparée à la mesure effectuée par le radiomètre.

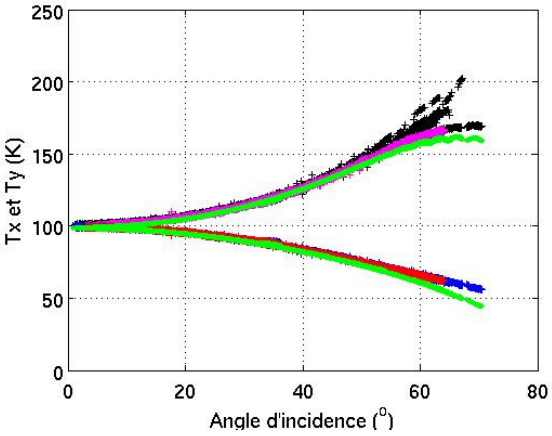


Figure 8: Comparaison entre Tb mesurés (polarisation H: bleu et rouge; polarisation V: noir et mauve) et Tb du modèle (vert) pour l'antenne de Coté durant les mouvements de roulis (vols du 19 et 20 novembre).

Figure 8 nous avons représenté le résultat de cette comparaison pour l'antenne de coté et pour deux vols. Nous montrons une excellente correspondance pour les angles d'incidence inférieure à 40°. Pour les forts angles d'incidence l'écart entre Tb mesurés et modélisés augmente, il y a de plus une plus grande divergence en polarisation V. Différents effets sont responsables de cette divergence : à ces angles d'incidence, le lobe d'antenne balaye une zone de la surface importante, avec une plus forte variabilité des paramètre de surface ; dans ces conditions, il est beaucoup plus délicat de calculer correctement la température de brillance. Il est probable qu'aux plus forts angles d'incidence, une partie du lobe d'antenne (mi-largeur du lobe principal à -3 dB : 37°) observe l'atmosphère aux limbes, hors le modèle ne prend pas en compte cette émission là; de plus, la dispersion des mesures en polarisation V (croix noires) est probablement due à la présence de la terre dans ce cas précis.
Pour les angles inférieurs à 50°, nous observons une excellente correspondance entre les Tb modélisés et les Tb mesurés.
Notons tout de même que les mesures effectuées au nadir ont servi à estimer les pertes d'OMT ; néanmoins les signatures angulaires sont bien reproduites et ce résultat, illustré pour l'antenne de coté, est également observable pour l'antenne Nadir.

Conclusion

Nous avons réalisé un radiomètre bande L afin d'effectuer des mesures aéroportées dans le Sud Ouest de la France et dans le golf de Gascogne. Deux campagnes de mesures nommées CAROLS ont déjà été effectuées en 2007 et 2008 en préparation au lancement du satellite SMOS, l'objectif étant l'étalonnage et la validation du radiomètre MIRAS à bord du satellite.
Dans cet article nous avons montré, à l'aide de mesures en laboratoire, que le radiomètre, suite aux différentes phases d'étalonnage, avait une sensibilité excellente et une stabilité meilleure que 0.1 K. Ces caractéristiques sont nécessaires afin d'étudier la signature radiométrique de la mer, l'objectif étant l'estimation de la salinité à 0.1 psu près.

Nous avons ensuite montré que les campagnes de mesures nous ont permis de montrer différentes caractéristiques des RFI présents dans le Sud de la France : des pics correspondants à des émissions RADAR sont observés, mais bien filtrés grâce au calcul des kurtosis, des antennes au sol émettent un signal puissant à la fréquence 1429 MHz, ce signal est observé par notre radiomètre et le filtrage par le kurtosis ne permet pas d'éliminer ces données.
Nous avons également montré que l'altitude de l'avion n'avait pas un impact important sur l'estimation de la signature radiométrique d'une scène à grande échelle et enfin sur l'océan nous avons montré que les mesures reproduisaient parfaitement la signature angulaire de l'émission modélisée par le modèle de l'IFREMER TRAP.

Il reste encore différentes études à mener avec les mesures effectuées en 2007 et 2008 : analyse des données sur la forêt et sur le transect SMOSmania, étude des mesures de Tb proche de l'embouchure de la Gironde (un fort gradient de salinité y est observable), analyse des mesures des 3^{ièmes} et 4^{ièmes} paramètres de Stockes et la possibilité de les utiliser pour filtrer les RFI…

L'ensemble de ces résultats est très encourageant pour la préparation des campagnes aéroportées suivantes ; le radiomètre CAROLS a la sensibilité attendue et permet d'observer l'émission des cibles avec une grande précision et les campagnes de mesure au sol nous permettent la modélisation de cette émission pour les périodes de survol, mesures et modèles peuvent ainsi être comparés. La prochaine campagne, au printemps 2009 aura comme objectif supplémentaire le survol du site VAS (Valencia Anchor Site) au Sud de l'Espagne, site dédié spécifiquement à la validation des algorithmes d'estimation de l'humidité de SMOS.

Bibliographie

[1] Y.H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J.-M Martinuzzi, J. Font, M. Berger, 'Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission', IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 73, 270-282.

[2] J. Rotbøll, S.S. Søbjærg and N. Skou, 'Novel L-band Polarimetric Radiometer Featuring Subharmonic Sampling', Radio Science, 2003, 38(3), 11-1 – 11-7.

[3] L.A. Klein and C.T. Swift, 'An improved model for the dielectric constant of sca water at microwave frequencies', IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1977, vol AP 25, no. 1, pp 104-111.

[4] E. P. Dinnat, J. Boutin, G. Caudal, J. Etcheto, and A. Camps, 'Issues concerning the sea emissivity modeling in L-band for retrieving surface salinity', Radio Sci., 2003, vol. 38, no. 4.