HAL
open science

SMOS vole au-dessus de nos têtes

Philippe Waldteufel, Yann H. Kerr, Jacqueline Boutin

To cite this version:

Philippe Waldteufel, Yann H. Kerr, Jacqueline Boutin. SMOS vole au-dessus de nos têtes. La Météorologie, 2012, 76, pp.32-43. 10.4267/2042/47244 . hal-00698965

HAL Id: hal-00698965

https://hal.science/hal-00698965v1

Submitted on 12 Sep 2020

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.

SMOS vole au-dessus de nos têtes

Philippe Waldteufel(1), **Yann Kerr**(2) et **Jacqueline Boutin**(3)
(1) Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS) Quartier des Garennes, 11 boulevard d'Alembert - 78280 Guyancourt
(2) Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse, France
(3) Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN), Paris, France

Résumé

Lancée en novembre 2009, la mission *SMOS* (Soil Moisture and Ocean Salinity) est triplement ambitieuse par :
- ses finalités : elle est destinée à mesurer systématiquement des quantités physiques – humidité du sol et salinité à la surface de la mer – de haute signification dans le système climatique ;
- son parti pris technique innovant de radiométrie interférométrique ;
- ses choix en matière d'extraction des quantités recherchées, choix qui mettent en œuvre des modélisations explicites du transfert radiatif.

Même si l'évaluation exhaustive des résultats de *SMOS* devra attendre la fin de la mission et certainement au-delà, le temps est venu d'apprécier les chances que les défis posés soient relevés avec succès.

Abstract

The SMOS spacecraft flies above our heads

The SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) spacecraft was launched in November 2009. This is an ambitious project at three levels:
- the objectives, SMOS is the global monitoring of soil moisture and ocean surface salinity both highly significant in the climate system;
- the technical implementation, for which the fully innovative principle of interferometric radiometry from space was chosen;
- the data processing retrieval concept based on explicit simulations of the radiative transfer processes at microwave wavelengths.

A full assessment of SMOS results will have to wait until the mission ends and probably beyond; still, the time has come to reckon the chances that the challenges raised by SMOS will be met successfully.

Pourquoi mesurer l'humidité et la salinité de surface ?

Humidité

Chaque type de sol absorbe une quantité spécifique d'eau avant d'être saturé. Par humidité de surface (en abrégé SM pour « Soil Moisture ») on désigne le contenu en eau (exprimé le plus souvent comme un rapport volumique en m^3/m^3) des premiers centimètres de profondeur – par opposition à l'humidité de la zone racinaire qu'ils surmontent. La SM peut varier de valeurs quasi nulles jusqu'à la saturation, où elle atteint environ 0,5.

La SM conditionne la partition, en cas de pluie, entre l'eau qui ruisselle et celle qui s'infiltre. De plus, elle apparaît comme une double condition aux limites :
- vers le haut et l'atmosphère, en conditionnant les flux de vapeur d'eau et donc aussi de chaleur latente ;
- vers le bas et les écoulements hydrogéologiques, en contraignant le flux descendant et, par ce biais, le contenu en eau de la zone (racinaire) plus profonde.

Ainsi une bonne connaissance de la SM devrait-elle améliorer substantiellement notre aptitude à prévoir le temps ainsi que des événements extrêmes tels que sécheresses, inondations et glissements de terrain. De plus, elle apporte des informations sur les disponibilités en eau, et donc une aide à la gestion de sa ressource.

Salinité

La salinité de surface (en abrégé SSS pour « Sea Surface Salinity ») est une mesure du nombre de grammes de sel par kilogramme d'eau de mer. Pour une composition chimique de l'eau de mer donnée, la SSS est communément mesurée selon un rapport entre conductivité de l'eau de mer et salinité et elle est exprimée par un nombre sans dimension. La salinité moyenne des océans terrestres est proche de 35 avec des valeurs en haute mer variant entre 32 et 37, et des valeurs côtières qui peuvent évidemment devenir très faibles à l'embouchure des fleuves.

La salinité de surface affecte la circulation thermohaline et, par suite, les flux interhémisphériques de matière et d'énergie. Elle joue également le rôle de marqueur de masses d'eau océaniques et du flux d'eau douce reçu par l'océan (précipitations moins évaporation ou décharge fluviale). De nombreux phénomènes océaniques, tels que les lentilles d'eau douce créées par les épisodes pluvieux intenses, mettent en jeu la SSS.

Spécification

Pour l'humidité des sols, les utilisateurs souhaitent une résolution spatiale de l'ordre de 10 à 20 km et une couverture de l'ensemble des surfaces émergées avec une récurrence inférieure ou égale à 3 jours. L'incertitude de mesure devrait être inférieure à 0,04 m^3/m^3.

Les spécifications pour la salinité sont différentes : une résolution spatiale de l'ordre de 100 km et une résolution temporelle de 10 à 30 jours sont

adéquates. Cependant, l'exigence de parvenir à une incertitude de mesure de l'ordre de 0,1 sur un domaine spatio-temporel de 100 km × 100 km et de 30 jours est très contraignante.

Techniques de mesure

Humidité

Une détermination de SM ponctuelle dans le temps et l'espace est assez aisée, voire triviale, mais fastidieuse. S'il s'agit d'obtenir régulièrement des mesures représentatives d'une surface, la stratégie d'échantillonnage est délicate et l'échelle régionale elle-même est hors de portée.

Les nombreuses tentatives par télédétection aux longueurs d'onde visibles ou infrarouges n'ont pas été convaincantes. Cela est dû en partie au masquage par l'atmosphère (nébulosité) et la végétation, et en partie à l'influence considérable des conditions physiques (vents) qui conditionnent les échanges thermiques à la surface.

Les micro-ondes donnent en principe accès à la constante diélectrique des sols, qui dépend fortement de leur contenu en eau. Ces micro-ondes sont d'autant plus prometteuses que l'atmosphère, aux fréquences basses, est quasi transparente et même le couvert végétal peut être traversé. À partir de ce principe, ont été utilisés :

• Les radars à synthèse d'ouverture (SAR pour « Synthetic Aperture Radar ») : excellents en résolution spatiale, ils souffrent d'un temps de revisite très long et d'une sensibilité au couvert végétal, et surtout à la rugosité de surface, qui entache les estimations d'humidité d'une grande incertitude ;

• Les diffusiomètres ou scattéromètres : ils offrent un compromis plus satisfaisant entre la résolution spatiale et la fauchée (donc le temps de revisite). Toutefois, la rugosité et surtout la végétation représentent, aux longueurs d'onde disponibles (bande C vers 5 GHz, voire plus), des obstacles importants qui restreignent les mesures quantitativement exploitables aux zones et aux périodes à faible couverture végétale et à l'usage de méthodes relatives (détection de changements) ;

• La radiométrie : cette dernière technique est délicate mais maîtrisée et spatialisée depuis longtemps.

Le principe de la radiométrie consiste à détecter le rayonnement thermique de la surface terrestre, c'est-à-dire à mesurer des températures de brillance (TB) qui sont le produit de la température physique par une émissivité. Le rayonnement thermique, polarisé, est entièrement défini par les quatre paramètres « de Stokes ». Une description fréquemment réduite à deux polarisations linéaires orthogonales se résume à deux températures « horizontale » et « verticale », TH et TV.

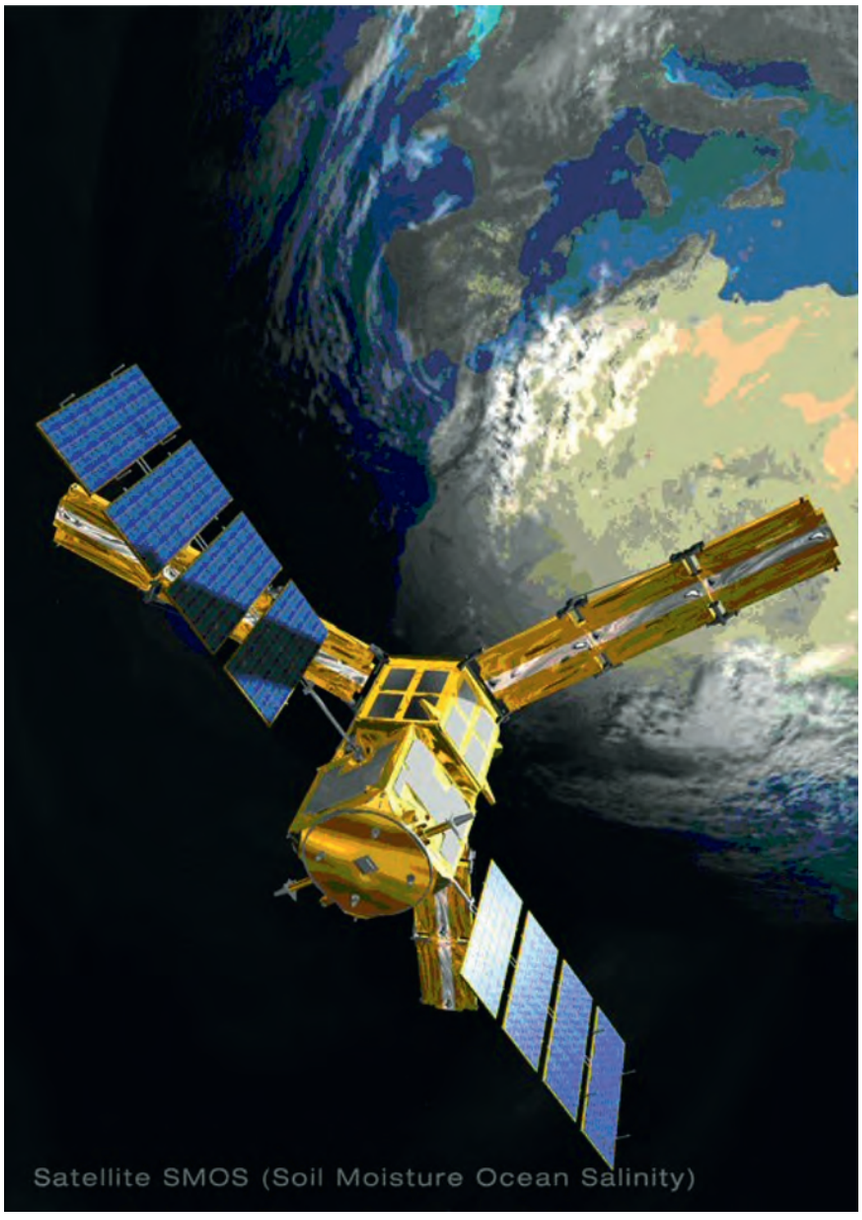
L'humidité de surface est l'une des quantités physiques déterminant l'émissivité. La théorie de la mesure impose de construire un modèle radiatif complet prenant en compte les autres paramètres caractérisant le sol (texture, rugosité, etc.) et les autres sources de rayonnement ou d'absorption (couvert végétal, atmosphère et ciel).

Des résultats encourageants, obtenus aux ondes centimétriques, restent limités aux zones très peu couvertes par la végétation et sont souvent pollués par des interférences. Il a été montré que la meilleure sensibilité à l'humidité se rencontre en réalité pour les ondes décimétriques. De plus, pour la longueur d'onde de 21 cm (dans la bande L des radaristes, à 1,4 GHz), il existe une fenêtre protégée qui devrait donc, en principe, échapper aux risques d'interférences.

Salinité

Comme pour la SM, la salinité n'a longtemps été connue que par échantillonnage direct (à partir de bateaux). La mise en œuvre de mesures de

Figure 1 - Le satellite *SMOS*, vue d'artiste. Au premier plan, la plateforme de servitude et les panneaux solaires. Puis, montés sur la plateforme, la charge utile avec son « hub » (moyeu) et les trois bras angulairement équidistants de l'interféromètre. On distingue la structure de chaque bras en trois segments qui ne seront déployés qu'après la mise sur orbite.



conductivité sur bateaux, mouillages et à partir de flotteurs dérivants, a considérablement amélioré la situation, notamment avec la multiplication des profileurs ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography). Toutefois, ces profileurs ne mesurent la salinité qu'à quelques mètres de profondeur et restent en deçà de la surveillance régulière et exhaustive souhaitée, que seules des techniques de télédétection par satellite peuvent éventuellement apporter. En cela, mesures *in situ* et télédétectées apparaissent très complémentaires (Lagerloef et al., 2010).

Le seul accès direct à la salinité par télédétection se trouve dans l'usage passif des micro-ondes et aux fréquences les plus basses possibles. Même dans ces conditions, la sensibilité des températures de brillance aux variations de salinité reste faible (de l'ordre de 0,5 K par unité de salinité). Les exigences en termes d'étalonnage, de stabilité et de prise en compte de toutes les contributions au transfert radiatif, sont extrêmement strictes.

Vers le projet SMOS

Faisabilité d'une mesure radiométrique en bande L

Les raisons pour construire un projet utilisant la radiométrie en bande L sont fortes et convergentes. S'agissant de la salinité, la sensibilité aux fréquences plus élevées est si faible qu'elle ne laisse guère d'espoir. S'agissant de l'humidité, les estimations de l'influence du couvert végétal ne permettent pas, à des fréquences plus élevées, de traverser une épaisseur qui correspondrait, par exemple, à une zone céréalière cultivée en période de maturité.

Même avant de rentrer dans le détail des spécifications, il est visible que l'exigence de résolution spatiale pour la SM est très contraignante. Cette résolution fait intervenir l'altitude de vol et la taille de l'antenne perpendiculairement à la visée. Pour les ondes décimétriques, obtenir (à partir d'un satellite volant en orbite basse, vers 800 km d'altitude…) une résolution spatiale de 20 km conduirait à retenir une antenne de très grandes dimensions (qu'il faudrait ensuite intégrer dans un système à balayage afin de réaliser une fauchée suffisante pour garantir une période de revisite acceptable).

Même après avoir dégradé la spécification de résolution spatiale aux environs de 40 km, la taille nécessaire reste voisine de huit mètres. Il n'y a guère d'espoir de trouver dans le budget de la recherche spatiale un montant permettant de mettre une telle antenne en orbite pour mesurer les quantités qui nous intéressent.

Ainsi s'explique une situation à la limite du paradoxe : alors qu'une expérience conduite à bord de Spacelab en 1974 démontrait l'existence d'un signal géophysique tant sur les mers que sur les continents (signal souffrant toutefois d'un bruit élevé et d'une insuffisance notoire de résolution spatiale), il a fallu attendre presque 25 ans avant de voir apparaître des projets spatiaux réalisables et exploitables.

L'interférométrie

La solution est venue de l'idée (Ruf et al., 1988) d'emprunter aux radioastronomes la technique interférométrique qui leur avait permis un gain considérable en résolution angulaire (voir annexe 1).

Développés aux États-Unis, les premiers projets en télédétection ont fait l'objet d'un prototype aéroporté ESTAR (Electronically Scanned Thinned Array Radiometer), puis d'un projet de mission HYDROSTAR soumis à la Nasa (National Aeronautics and Space Administration) à peu près en même temps que s'élaborait le projet *SMOS* (Soil Moisture and Ocean Salinity). Ce dernier, qui avait à l'évidence capitalisé sur les travaux des collègues américains, proposait néanmoins de franchir une étape supplémentaire. Là où ESTAR et HYDROSTAR utilisaient un interféromètre linéaire perpendiculaire au plan de l'orbite, *SMOS* incluait un instrument totalement imageur, muni d'un interféromètre (figure 1) développant des lignes de base sur l'ensemble du plan.

Par la suite, HYDROSTAR n'a pas été retenu par la Nasa et l'ensemble des laboratoires intéressés s'est regroupé autour de *SMOS* pendant plusieurs années, jusqu'à ce que les collègues américains proposent de nouveaux projets en bande L dont l'un, *Aquarius*, consacré à la mesure de la salinité, a été accepté et a été lancé le 10 juin 2011. C'est un radiomètre de type « push broom » de 3 cornets, ayant une revisite de 8 jours et une résolution spatiale supérieure à 100 km.

De la proposition initiale au lancement

Au début des années 1990, l'interférométrie à une dimension était validée par les collègues américains (Jackson et al., 1995). Les radioastronomes et thématiciens toulousains ont alors conceptualisé l'extension (2D) au radiomètre interférométrique imageur. Après une décennie de travaux techniques soutenus par le Centre national d'études spatiales (Cnes) puis par l'Agence spatiale européenne (ESA), et en parallèle de travaux sur la modélisation radiative et le traitement du signal radiométrique, le pari d'une mission spatiale semblait pouvoir être proposé. Un projet RAMSES (Radiométrie appliquée à la mesure de la salinité et de l'eau du sol) a donc été soumis au Cnes et sélectionné à la fin de 1997. Pour des raisons de financement, la recherche de partenariats internationaux s'imposait. C'est à l'occasion de l'appel à proposition de l'ESA pour les « Earth Explorer Opportunity missions » que le projet *SMOS* a pris forme.

De RAMSES à SMOS, les aspects techniques ont mieux été pris en compte (choix de l'orbite, d'une plateforme PROTEUS(1)…) et l'équipe scientifique proposante, déjà internationale, s'est encore élargie. Par souci de retour géographique, l'industrie espagnole a été sollicitée. Dans le même temps, l'implication croissante des collègues espagnols(2) s'est concrétisée par le choix de Jordi Font en tant que co-investigateur principal.

Cryosat et *SMOS* ont été sélectionnés par l'ESA en 1999, dans cet ordre. Les années de phase A (études préliminaires, augmentées d'une « phase A étendue »), puis de phase B (définition) ont semblé longues pendant que l'ESA développait *Cryosat*, mais elles ont permis de traiter les problèmes d'interface plateforme-instrument, de mieux définir le concept instrumental, de rédiger les documents formels de spécification et, surtout, d'effectuer une première optimisation de l'instrument (géométrie de l'interféromètre) et du scénario de mission (Waldteufel et al., 2003), voir annexe 2.

Un « Science Advisory Group » (SAG), mis en place par l'ESA, a commencé à proposer, puis a suivi la réalisation des

(1) PROTEUS : Plateforme reconfigurable pour l'observation, les télécommunications et les usages scientifiques.
(2) Et/ou catalans !

efforts sur le plan de la modélisation (études sur des points insuffisamment établis ou de nouvelles voies), tout en élaborant, en parallèle, le plan des campagnes terrain ou aéroportées en synergie avec ce qui était planifié sur le plan national.

Le choix définitif des industriels (EADS CASA[1] pour l'instrument, Thales Alenia Space pour la plateforme et la société Eurockot pour le lanceur, une fusée Rockot) marque le passage en phase C/D (réalisation et intégration/test). Dans le même temps, la partie segment sol se met en place. Trois groupements de scientifiques, les « ESL » (Expert Support Laboratories), couvrant respectivement les niveaux 1 (TB), 2 (SM) et 2 (OS), reçoivent pour tâche d'écrire les descriptions détaillées des traitements et d'interagir étroitement avec les industriels choisis pour en développer et réaliser les prototypes ainsi que les versions opérationnelles destinées au centre ESA de Villafranca en Espagne. La possibilité de temps quasi réel (Near Real Time, NRT : disponibilité des données moins de 3 heures après la mesure), prévue initialement puis abandonnée, a finalement été réintégrée à la mission suite à une demande formelle du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), entérinée par l'ESA.

S'il faut choisir une étape marquante, c'est probablement la première image (2D) réalisée avec l'interféromètre (le plafond de la chambre anéchoïde !). Après quoi aucune difficulté sérieuse n'a été rencontrée lors de l'intégration du satellite ou du long voyage de Cannes vers la base de lancement de Plesetsk (Russie), du montage sur le lanceur et enfin du lancement irréprochable du satellite *SMOS* (et de son compagnon *PROBA*[2]) dans la nuit du 1er au 2 novembre 2009. Le *SMOS* qui partait ainsi au travail de bon matin (Kerr et al., 2010) était somme toute très proche de celui proposé en 1998 !

Le système SMOS

Segment spatial

SMOS (Barré et al., 2008) est un satellite de la catégorie « mini » (cf. tableau 1). Sa plateforme fournit l'énergie, le positionnement (grâce à un pointeur stellaire) et la transmission des télémesures et des télécommandes ainsi que des informations générales sur le système.

Tableau 1 - Caractéristiques techniques du satellite SMOS

Masse	670 kg dont 360 kg pour la charge utile
Puissance	405-530 W
Orbite	Polaire héliosynchrone (6 h-18 h à l'équateur)
Altitude moyenne	756 km
Durée de vie	3 ans extensibles à 5 ans

Une fois déployé, le satellite a une « envergure » de 8 m avec, en outre, des panneaux solaires qui, compte tenu du choix de l'orbite (franchissement de l'équateur à 6 h et 18 h en temps local), permettent d'alimenter le satellite en permanence (à l'exception d'une courte période d'éclipse lors du solstice d'hiver). Le plus gros de la consommation d'énergie sert à réguler la température des systèmes.

Segment sol

Les télécommandes sont préparées par le Cnes à Toulouse puis transmises au satellite via la station de Kiruna (Suède). Les données (télémesures) sont transmises principalement via la station de Svalbard et ensuite acheminées vers le centre ESAC (European Space Astronomy Centre) de Villafranca. Elles y sont traitées pour alimenter (grâce au processeur NRT) le centre européen de prévisions CEPMMT et pour produire les niveaux 1 et 2 qui sont ensuite archivés et deviennent accessibles à tous via l'ESRIN (European Space Research Institute).

Enfin, un dernier « tuyau » alimente le Centre aval de traitement des données *SMOS* (CATDS), financé par le Cnes avec le concours de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). Ce centre a pour vocation de produire et diffuser des données de niveau 3 (agrégations spatiotemporelles, composites) et 4 (produits utilisant d'autres données spatiales ou des modèles de simulation numérique).

Enseignements de la recette en vol

Les six mois de recette en vol qui ont suivi le lancement (*commissioning phase*) ont été consacrés à la vérification du fonctionnement de l'ensemble du système. S'agissant des données, la priorité a été accordée aux niveaux 0 (voisin de la télémesure) et 1 (pour *SMOS* : produits de corrélation et températures de brillance).

Satellite

Après un lancement sans faute, une mise sur orbite quasi parfaite (500 m de l'orbite prévue) a permis d'ajuster cette dernière avec un minimum de manœuvres et donc de conserver suffisamment de carburant pour une durée théorique de mission de 22 ans. Toutes les vérifications de routine se sont déroulées de façon nominale : déploiement des panneaux solaires, de la charge utile 15 jours plus tard, régulation thermique, pointage, transmissions des données, etc. Dès l'allumage de l'instrument, les données ont été reçues et traitées, fournissant ainsi, quelques heures après la mise en route, les premières images (imparfaites certes !) d'humidité superficielle.

S'agissant de la charge utile, une sensibilité gênante de l'électronique aux ions lourds dans les zones les plus actives a été constatée. Ce problème a été résolu en faisant appel aux redondances du système. Moins grave, mais gênant tout de même, certaines régions de la mémoire de bord se sont avérées défectueuses, ce qui a contraint à jongler quelque peu avec les procédures d'écriture.

Dans l'ensemble cependant, il n'y a aucun point bloquant et le satellite acquiert les données de façon nominale.

Le niveau L1

De nombreuses indications sont obtenues à partir des températures de brillance (TB). Elles apportent des éléments majeurs de validation concernant la modélisation de la mesure. Ainsi, les TB en double polarisation présentent une variation avec l'angle d'incidence en bon accord qualitatif avec la modélisation radiative (formules de Fresnel) dans le cas des surfaces les plus simples (figure 2).

(1) EADS CASA : European Aeronautic Defence and Space company - Construcciones Aeronáuticas Sociedad Anónima
(2) PROBA : Project for On-Board Autonomy.

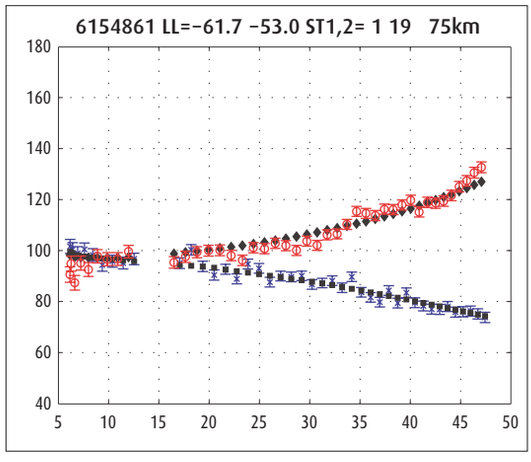


Figure 2 - Exemple de profils de TB en double polarisation : variation en fonction de l'angle d'incidence (en abscisses) des valeurs mesurées et ajustées par l'algorithme prototype SML2PP. Cette figure illustre les composantes mesurées au niveau de l'antenne et non celles émises à la surface.

De manière similaire, les incertitudes radiométriques estimées empiriquement sur l'océan se comparent favorablement aux prévisions (Yin et al, 2010) [figure 3].

Inversement, nombre de difficultés subsistent deux ans après le lancement :

• Sur les terres mais aussi sur mer : les interférences radioélectriques (RFI, Radio Frequency Interferences) sont beaucoup plus fréquentes et destructrices qu'on ne s'y attendait (cf. l'encadré « Les interférences »).

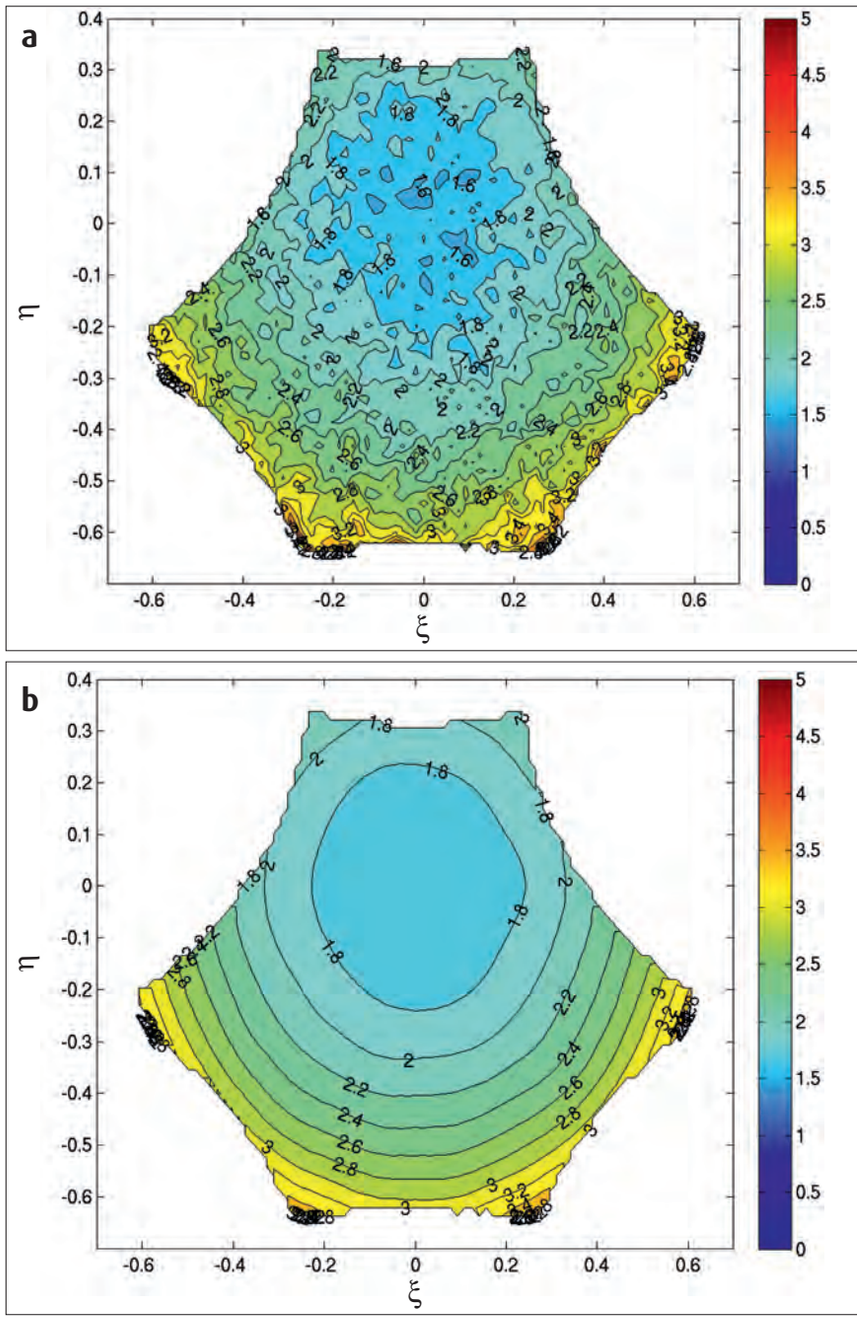
• Sur l'océan on constate un biais résiduel inexpliqué qui s'exprime par une correction empirique quasi stationnaire dans le repère (figure 3 et figure A1-2 de l'annexe 1) des cosinus directeurs au niveau de l'antenne. On note une sorte de contamination apparente des zones océaniques côtières par les terres avoisinantes, ainsi que des différences inexpliquées entre les parties ascendantes et descendantes des orbites.

• Sur les continents, même en appliquant une procédure de correction similaire, les ajustements obtenus dans les traitements de niveau 2 n'ont pas la qualité attendue. En d'autres termes, la dispersion constatée (figure 2) est trop forte (d'un point de vue quantitatif, la fonction de coût d'ajustement reste trop élevée). Les imperfections du modèle direct ne peuvent pas expliquer cette performance dégradée.

• Enfin, les comportements des paramètres de Stokes 3 et 4, lorsque l'observation fournit ces valeurs, ne sont pas totalement cohérents avec les modèles directs (alors que cette cohérence est dans l'ensemble bien obtenue pour les paramètres de Stokes 1 et 2).

Les équipes de *SMOS* continuent évidemment à travailler sur ces problèmes. La liste semble longue mais elle est devenue bien plus courte que celle des problèmes qui ont déjà été résolus.

On peut constater que sur une surface lisse et homogène, non contaminée par des RFI, les mesures *SMOS* sont très proches de celles mesurées au niveau du sol avec un radiomètre (figure 4).

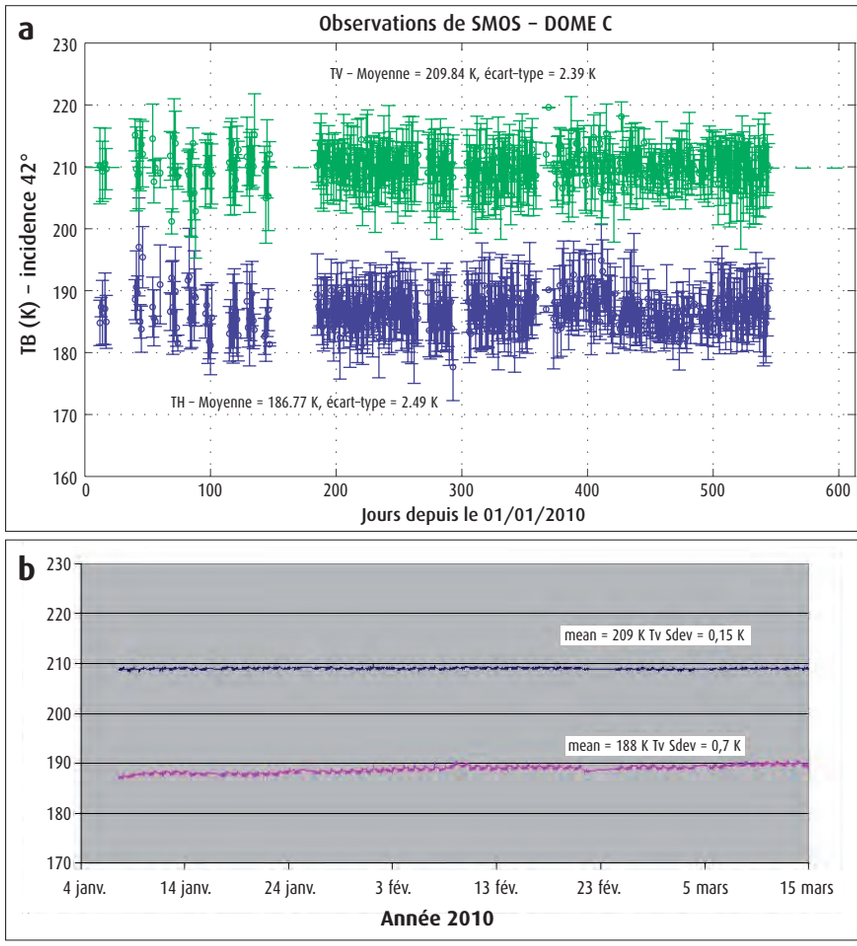


Figures 3a et b - Écart-type sur les TB de *SMOS* (en kelvins) estimé empiriquement d'après les mesures sur une zone uniforme dans l'océan Pacifique (a) et calculé à partir du modèle de l'instrument (b).

Premiers résultats géophysiques

Traitements de niveau 2 : principes généraux

Les températures de brillance sont principalement produites par l'émission de la surface à laquelle s'ajoute l'influence de l'absorption et de la réémission sur le trajet jusqu'au satellite. D'autres contributions trouvent leur origine dans l'émission directe ou réfléchie de sources discrètes : soleil ou son alias ou encore sa réflexion, sources galactiques... sans oublier les interférences RFI.



Figures 4a et b - Comparaison entre les températures de brillance mesurées par *SMOS* et celles mesurées par un radiomètre de terrain sur le site Concordia (Dôme C) en Antarctique pour un angle d'incidence de 42°. (a) : les mesures *SMOS* obtenues entre janvier et octobre 2010 en polarisation V (vert) et H (bleu). Les intermittences des six premiers mois s'expliquent par des changements de mode de fonctionnement pendant la recette en vol. On peut noter aussi la sensibilité de *SMOS* sur ce genre de surface. Les valeurs moyennes sont très comparables et les écarts-types meilleurs que les spécifications. (b) : évolution temporelle entre janvier et mars 2010 de la température de brillance mesurée par un radiomètre au sol. Elle est très stable en polarisation V (courbe bleue).

L'émission de surface est le produit de la température physique de surface par l'émissivité, elle-même fonction de l'humidité ou de la salinité selon les cas. Ce résultat est ensuite modifié par l'effet de la rugosité de surface.

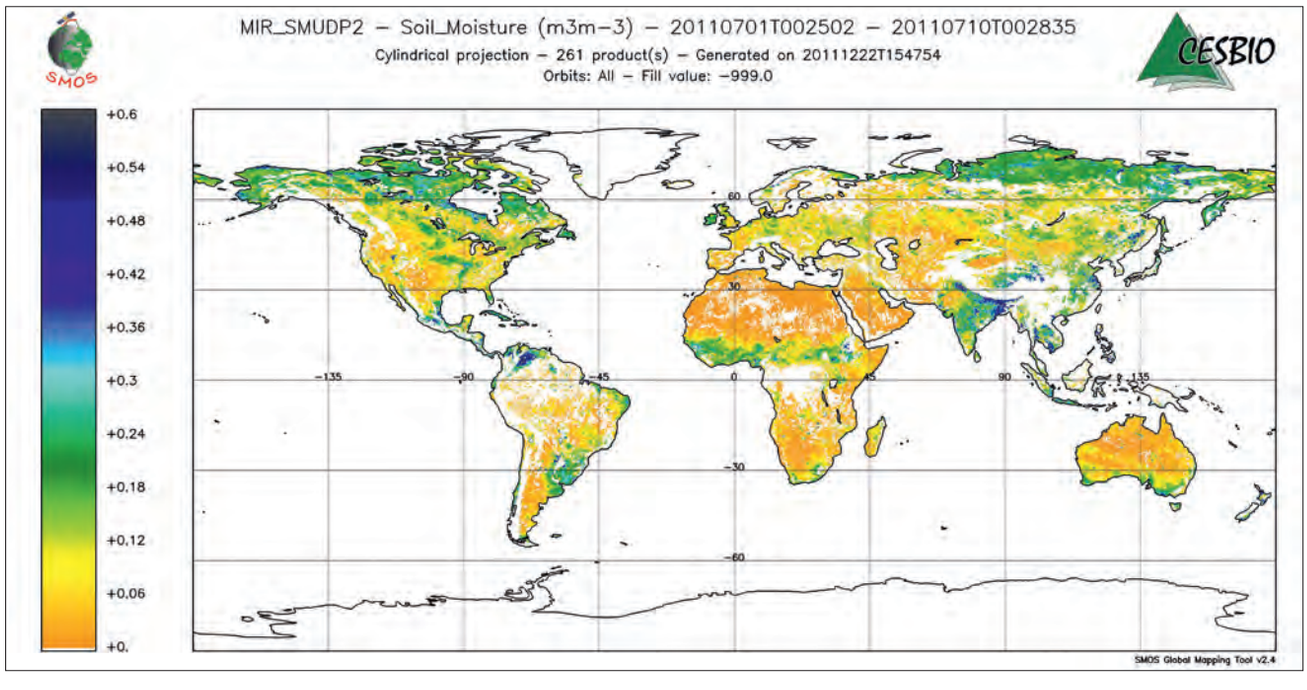
On a retenu pour *SMOS* des modèles radiatifs mettant en œuvre, de façon certes simplifiée, l'ensemble de ces processus. Le traitement fait intervenir un ajustement des TB mesurées à celles modélisées. L'angle d'incidence jouant le rôle de variable, on s'attache à extraire un ou plusieurs paramètres pour lesquels des contraintes *a priori* sont définies en fonction des connaissances disponibles.

Humidité de surface

La figure A2-2 (cf. Annexe 2) fait apparaître les dépendances des TB en fonction de l'humidité de surface SM, de l'épaisseur optique équivalente τ du couvert végétal et de la température physique. Cette dernière, assez bien connue par ailleurs, n'est pas soumise à extraction, alors que SM et τ le sont systématiquement. D'autres quantités (albédo de la végétation ou rugosité) peuvent être extraites dans des cas particulièrement favorables.

Même si le couvert végétal n'est pas opaque en bande L, sa présence dégrade la sensibilité à la SM et donc les incertitudes sur les valeurs extraites. On a vérifié (Wigneron et al., 2000) que l'utilisation des valeurs de τ obtenues lors de passages antérieurs réduisait l'incertitude d'extraction sur la SM. Cela est possible du fait qu'elle varie peu, en général, sur quelques jours. Cette amélioration alourdit le traitement en rendant nécessaire la tenue à jour de fichiers historiques pour τ. Toutefois,

▼Figure 5 - Carte de l'humidité superficielle du 1er au 9 juillet 2011.



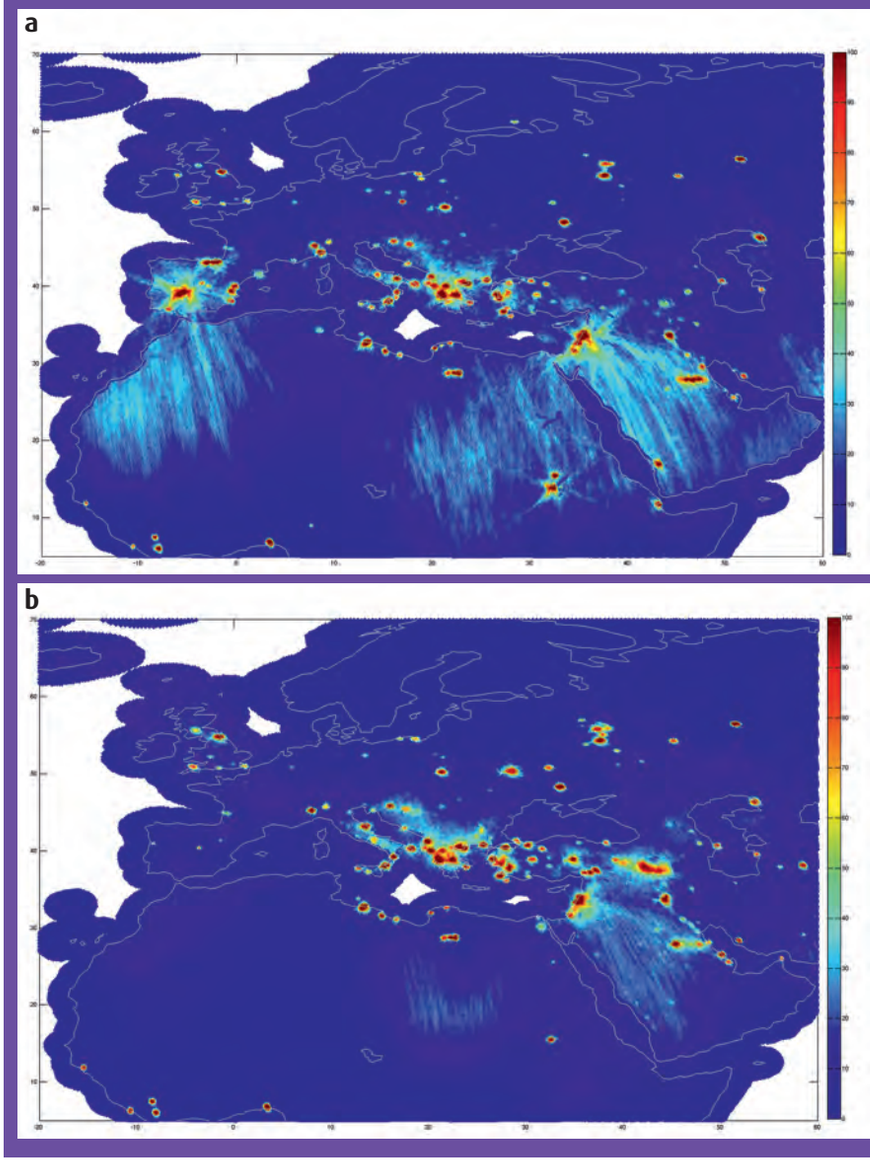
Les interférences

On a matérialisé pour chaque point de la grille *SMOS* la fréquence (cumulée sur une longue période) des cas où les températures de brillance (TB) excèdent nettement les valeurs susceptibles d'être produites par le rayonnement thermique naturel (typiquement, le seuil choisi vaut 340 K) ainsi que les cas où les évolutions angulaires sont anormales. Si on élimine les parasites naturels (soleil, radiosources) de localisation connue, on est alors en présence de signaux artificiels (RFI, Radio Frequency Interferences). La figure E1a illustre une telle carte sur l'Europe pour le début de 2010.

Il est clair que dans plusieurs pays la protection stricte de la bande utilisée par *SMOS* est ignorée.

Le premier objectif concernant les RFI consiste à les identifier afin d'éliminer les mesures contaminées. Les moyens peuvent évidemment être plus sophistiqués que les seuillages comme celui ci-dessus, mais on n'arrivera jamais à détecter les contaminations faibles (que l'on peut confondre avec l'incertitude radiométrique).

Au-delà de l'élimination, des techniques peuvent être appliquées pour corriger l'effet des RFI. Toutefois, la meilleure méthode consiste assurément à convaincre les pays concernés de revenir au respect de la bande protégée. C'est possible ! Ainsi la figure E1b illustre l'amélioration spectaculaire obtenue en Espagne, mais aussi en Afrique, grâce à l'action des autorités espagnoles. Sans nul doute, la publication des cartes de contamination joue et jouera un rôle pour convaincre d'autres pays (en Europe et ailleurs) de suivre l'exemple espagnol.



Figures E1a et b - Carte des probabilités d'occurrence de RFI sur l'Europe pour les trois premiers mois de 2010 (a) et l'été 2010 (b).

ces fichiers ne font que s'ajouter à ceux qu'il faut maintenir pour les lieux contaminés par les RFI.

L'obtention de la SM est d'autant plus délicate que la surface continentale est presque toujours fortement hétérogène à l'échelle de la résolution de *SMOS* (une quarantaine de kilomètres). De plus, la SM n'est pas toujours un concept pertinent pour exprimer l'émissivité (par exemple, dans le cas de surfaces d'eau libre !). La surface est cataloguée *a priori* en une dizaine de types principaux de couverture et les fractions qui ne font pas intervenir la SM donnent inévitablement lieu à des contributions radiatives par défaut dont l'estimation peut conduire à des erreurs supplémentaires.

Toutefois, les premiers résultats concernant l'humidité superficielle s'avèrent encourageants. La figure 5 montre une carte globale d'humidité des sols obtenue sur une période de 10 jours. Les zones à forte topographie sont masquées ainsi que celles fortement contaminées par le gel ou la neige. Sous les zones couvertes de forêts tropicales denses (bassin amazonien) les traitements donnent également des valeurs fausses qui sont donc masquées. Cependant, les plus gros problèmes rencontrés proviennent des pollutions radioélectriques (voir encadré ci-dessus) qui augmentent artificiellement les températures de brillance. Dans certaines zones, la proportion des extractions satisfaisantes est ainsi fortement réduite. Les efforts portent actuellement sur la meilleure approche pour filtrer efficacement les RFI.

Bien sûr, au-delà des cartographies et des analyses qualitatives, il importe de valider les produits sur des zones. Pour cela, un certain nombre de sites équipés sont utilisés. Afin d'éviter la multiplicité des problèmes, nous nous sommes concentrés, dans un premier temps, sur les zones où les RFI sont minimales et

où des données terrain représentatives sont disponibles (sites situés en Australie, en Afrique subsaharienne et en Amérique du Nord). Dans un deuxième temps nous considérerons les sites européens et asiatiques où les perturbations restent plus fortes.

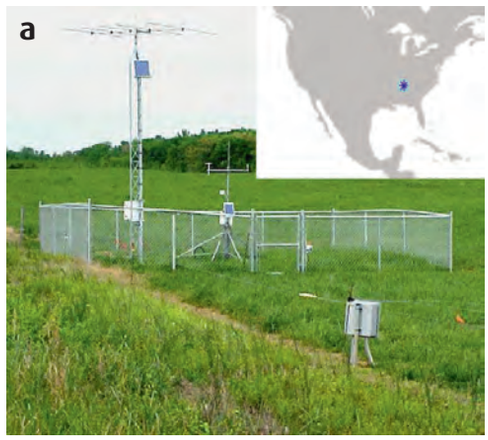
La figure 6 donne un aperçu des résultats obtenus sur un site SCAN (Soil Climate Analysis Network) aux États-Unis. Sont notamment représentées les mesures de terrain (vert), les estimations CEPMMT (magenta) et les estimations *SMOS* (bleu). Il est visible que le CEPMMT surestime un peu les humidités mais que les deux jeux de données restituent bien les évolutions temporelles de l'humidité superficielle mesurées sur site, et notamment les courbes d'assèchement.

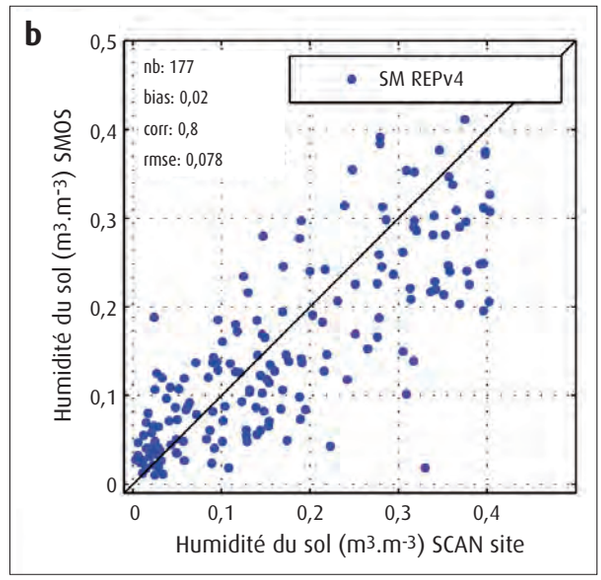
Salinité de surface

À une température de surface donnée, les paramètres de la surface océanique qui affectent le plus les TB sont la salinité de surface SSS (via son influence sur la permittivité de l'eau de mer) et la vitesse du vent (via son influence sur la rugosité de la surface et la présence d'écume). Sur l'océan, les variations de TB attendues des variations en SSS et en vent sont du même ordre de grandeur : un biais sur la vitesse du vent de 1 m/s se traduit à 15 °C par un biais sur la SSS de 0,4. Ces deux paramètres ayant une signature différente sur chacune des polarisations, le processus vise à optimiser l'extraction simultanée de la SSS et de la vitesse du vent. Ce processus minimise la différence quadratique moyenne entre TB *SMOS* et TB simulées par un modèle de transfert radiatif qui prend en compte, outre l'émissivité de la surface, l'émission et l'absorption par l'atmosphère et la diffusion par la surface de la mer du signal atmosphérique et céleste. Ce dernier, très variable dans le plan galactique, est une source d'erreur non négligeable dans certaines directions car la diffusion par la surface de la mer d'un signal fortement hétérogène dans l'espace reste difficile à modéliser.

Étant donnée la faible sensibilité des TB aux signaux océaniques, un préalable au traitement de niveau 2 concernant la SSS est la soustraction du biais systématique observé entre le modèle direct et les mesures *SMOS* en chaque point. Cela fait, la chaîne temps réel de l'ESA (Zine et al., 2008) fournit, le long de l'orbite, des salinités et leur incertitude théorique (de l'ordre de 1 à 2) avec une résolution spatiale de l'ordre de 40 km. Grâce à l'excellente couverture de *SMOS*, une moyenne spatiotemporelle des mesures (pondérées par l'incertitude théorique sur la SSS obtenue et par la résolution moyenne du pixel) permet de réduire notablement le bruit. La figure 7 illustre la répartition spatiale des SSS moyennées sur 100 km × 100 km du 3 au 31 août 2010, ainsi que la moyenne climatologique pour le mois d'août déduite des mesures *in situ* (World Ocean Atlas, 2005).

Au premier ordre, loin des côtes et de la glace, les variations spatiales de la SSS *SMOS* sont fidèles à la climatologie (maxima de SSS dans les zones subtropicales et dans l'Atlantique ; fortes dessalures dans les zones de convergence intertropicales et dans le panache de l'Amazone…). Néanmoins, ces cartes mettent également en évidence des défauts en cours d'étude :





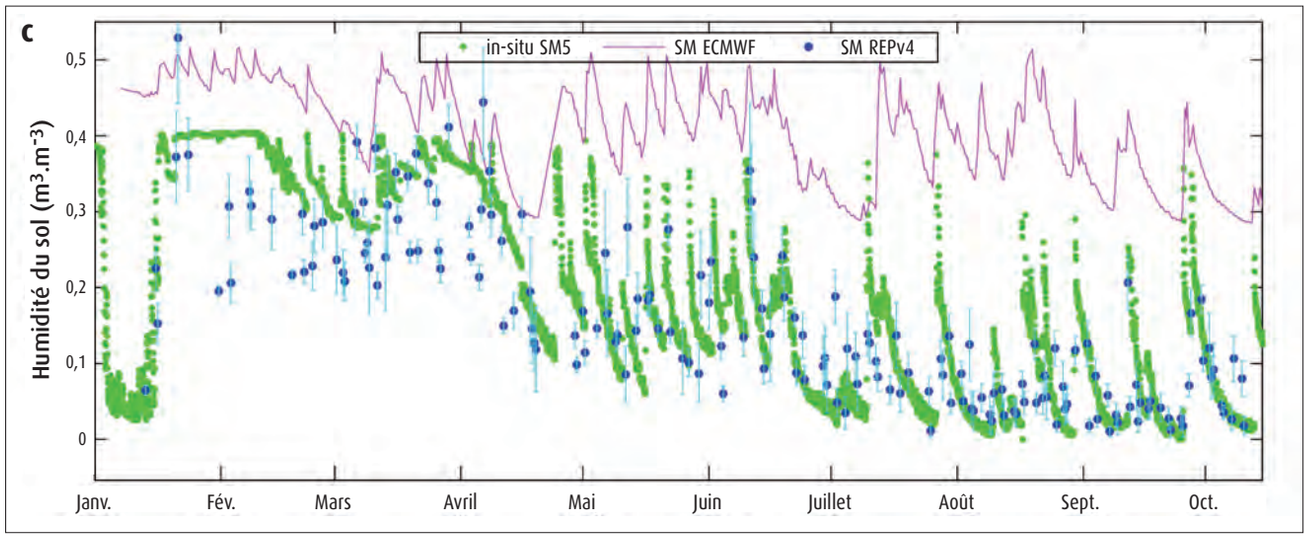


Figure 6 - Résultats obtenus sur un des sites du réseau SCAN aux États-Unis (point bleu sur la carte en haut à gauche). (a) : la photo donne un aperçu du type d'occupation des sols. (b) : les mesures SMOS et SCAN sont représentées et s'alignent assez bien sur la première bissectrice. (c) : évolution temporelle avec, en bleu, la mesure sol et, en magenta, les valeurs issues du modèle du CEPMMT. Les points bleus correspondent aux mesures SMOS.

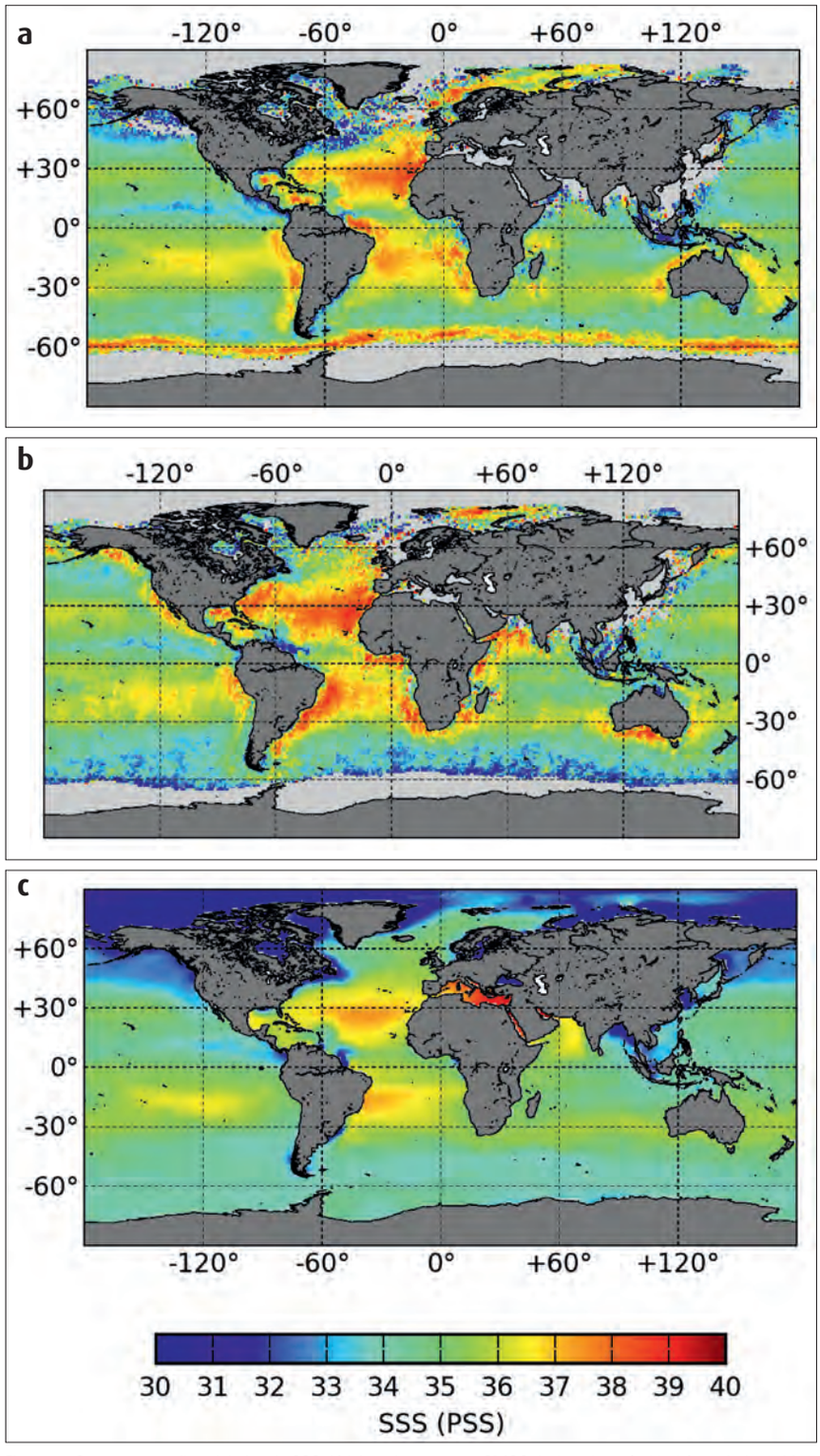


Figure 7 - Cartes mensuelles globales de SSS déduites des mesures SMOS du 3 au 31 août 2010 à partir des orbites ascendantes (a) ou descendantes (b). (c) : SSS climatologique pour le mois d'août, d'après la climatologie du World Ocean Atlas (2005).

- une perturbation à plusieurs centaines de kilomètres des côtes et de la glace qui dépend de l'orientation du satellite par rapport à celles-ci (alors que les simulations avant le lancement indiquaient que cette contamination devait s'étendre à moins de 80 km) ;
- un biais entre les SSS déduites le long des orbites ascendantes et descendantes dont la cause semble être une température de l'antenne mal prise en compte et une mauvaise correction de l'influence du signal galactique lorsque ce dernier est important (orbites descendantes au mois d'août) ;
- l'absence de SSS valides dans certaines régions (océan Atlantique nord, nord de l'océan Indien, côtes chinoises...) due à la présence de RFI ;
- une trop forte variabilité de la SSS dans l'océan Antarctique due à une mauvaise prise en compte de l'effet du vent (en cours de correction).

Dans des régions éloignées des côtes et de la glace, la comparaison des SSS *SMOS*, obtenues à partir des orbites ascendantes et moyennées sur 100 km × 100 km et 10 jours, avec les mesures *in situ* réalisées par des flotteurs ARGO durant le mois d'août 2010 indique une erreur de l'ordre de 0,4. Obtenu avec un modèle de transfert radiatif défini avant le lancement, ce résultat est très encourageant.

Conclusions

Les indications qui précèdent peuvent donner l'impression que le chercheur s'attaquant à l'exploitation des données fournies par *SMOS* s'est engagé sur une route longue et difficile.

Ce n'est pas faux, d'autant plus que ces indications sont tout sauf exhaustives. Dans le cas de la SM, on n'a pas mentionné toutes sortes de faiblesses ou d'incertitudes portant sur le modèle direct : quid de la rugosité de surface ? Quid de l'épaisseur optique équivalente ou des autres caractéristiques radiatives en cas de couvert forestier ? Plus généralement, il serait imprudent de prendre pour argent comptant toutes les données auxiliaires indispensables (nature du couvert, paramètres de texture du sol) qu'il faudra donc valider pas à pas. Dans le cas de la SSS, la variabilité spatiale obtenue en utilisant un modèle de transfert radiatif non optimisé pour les mesures *SMOS* est très encourageante, mais la correction du biais entre orbites ascendantes et descendantes, l'amélioration des modèles de rugosité, d'écume et de diffusion du bruit galactique sont des défis à relever pour atteindre les spécifications fixées par le groupe GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment). Dans certaines zones, les RFI réduisent fortement le nombre de SSS extraites. Une amélioration est espérée en raffinant le tri des mesures aberrantes.

En dépit de toutes ces réserves, chez celles et ceux qui travaillent sur ces données, le sentiment dominant est une sorte de jubilation parce que le signal géophysique s'est manifesté de façon claire, tant sur mer que sur terre, et qu'on a pu le mettre en évidence avec une rapidité que personne n'osait espérer, au bout de quelques mois de vol de *SMOS*. Cela veut dire que, pour l'essentiel, le pari des équipes qui ont proposé la mission en 1997-1998 et celui des agences et autorités spatiales qui l'ont acceptée et soutenue, est d'ores et déjà gagné.

Même si l'obtention d'une parfaite fiabilité n'est pas pour demain, l'optimisme sur la bonne qualité des données de *SMOS* est grand. En témoigne l'effort décidé pour préparer l'assimilation en temps quasi réel des mesures dans le modèle de prévision numérique du CEPMMT.

Les proposants de *SMOS* n'ont jamais revendiqué de caractère opérationnel pour cette mission. Bien évidemment, on pense ça et là à des successeurs pour lesquels il pourrait en aller autrement. Reste que, pour *SMOS*, la principale vocation est celle d'un démonstrateur. À cet égard, 18 mois après le lancement, beaucoup a déjà été accompli. Il reste un travail important qui implique des avancées substantielles dans la théorie de la mesure à divers égards. Mais on ne devrait pas manquer de données pour cela : le dimensionnement de *SMOS* autorise à espérer que le satellite fonctionnera de nombreuses années.

Annexe 1 - L'interférométrie

La résolution angulaire d'un détecteur d'ondes électromagnétiques est (en radians) de l'ordre du rapport de la longueur d'onde λ à la taille D du détecteur normalement à la direction de propagation. Conceptualisée en optique, puis développée depuis longtemps dans le domaine des micro-ondes par les radioastronomes, l'interférométrie permet d'atteindre une résolution voisine de λ/D (en radians) avec une antenne composée d'un réseau (ou d'une série si l'antenne est unidirectionnelle) d'éléments qui s'étendent sur une distance D mais n'en couvrent qu'une faible partie.

Pour chacune des lignes de base définies par toute paire de ces éléments, on forme la fonction d'autocorrélation des signaux reçus. Alors, selon le théorème de Wiener-Khinchine, la transformée de Fourier de cette fonction est le spectre de puissance, c'est-à-dire ici la distribution angulaire des températures de brillance TB. Ce résumé approximatif ne serait vrai que si tous les éléments d'antenne et les canaux de réception étaient parfaitement identiques. Dans la pratique, la « reconstruction » de la carte des TB pour chaque FOV (Field Of View, champ de vue) successif fait appel à l'inversion d'une matrice de transfert régularisée qui prend en compte toutes les informations disponibles sur l'instrument.

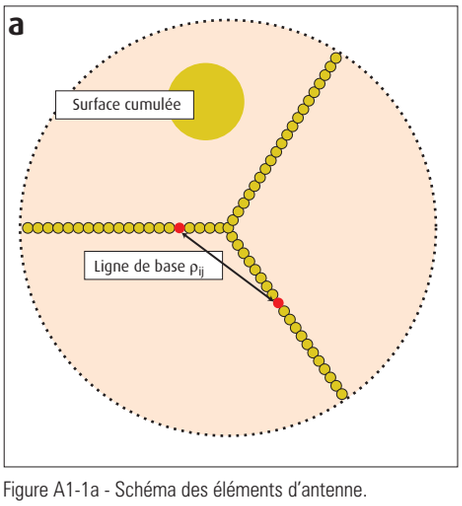


Figure A1-1a - Schéma des éléments d'antenne.

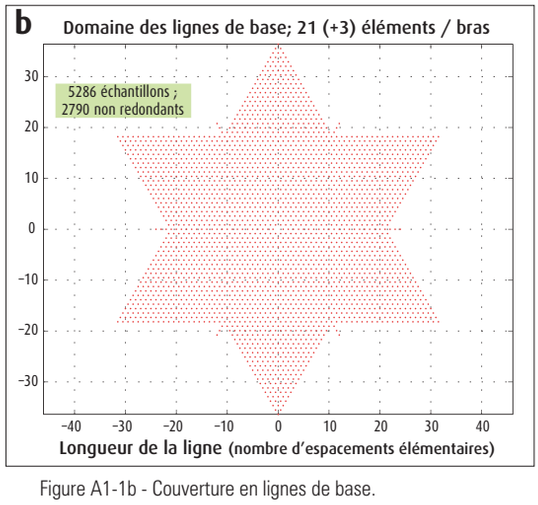


Figure A1-1b - Couverture en lignes de base.

La figure A1-1a schématise la disposition des éléments d'antenne de SMOS, qui, comme l'indique la vue d'artiste de la figure 1, sont alignés le long de trois bras angulairement équidistants. Choisie en vertu de sa simplicité mécanique, cette disposition minimise en outre la proportion des lignes de base redondantes. Le diamètre D du cercle coloré en beige est proche de 8 m. Le petit cercle coloré en jaune illustre comparativement le gain en surface (et par suite, dans une large mesure, en poids et encombrement) apporté par la technique interférométrique.

La résolution angulaire de l'antenne synthétique est, quant à son lobe principal, celle autorisée par la taille totale de l'aérien. Cependant la fonction de gain directionnelle souffre de lobes secondaires qui pourraient être importants si la couverture en ligne de base souffrait de manques de continuité. La figure A1-1b montre que ce n'est pas le cas. Toutefois, il restera nécessaire d'apodiser, c'est-à-dire de sous-pondérer les contributions associées aux lignes de bases les plus longues, afin d'atténuer l'effet anisotrope des pointes du diagramme en forme d'étoile mis en évidence par cette figure.

Dans le plan de l'antenne, le champ de vue de l'instrument est représenté (figure A1-2) dans le diagramme des cosinus directeurs. On visualise ici principalement :

- la limite du demi-espace face à l'antenne, cercle de rayon unité ;
- la zone de reconstruction (Anterrieu, 2004), hexagonale par suite de la géométrie en forme d'étoile à 3 branches de l'antenne de MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis). Elle ne s'étend pas jusqu'à l'horizon parce que l'espacement entre les éléments d'antenne est, pour des raisons pratiques, supérieur à la limite qui résulterait de l'application du critère de Nyquist, de sorte qu'une partie des contributions radiométriques est « repliée » dans l'hexagone ;
- la présence des 6 cercles de rayon unité adjacents qui délimitent les zones de repliement ou aliasing, et identifient par défaut le champ de vue totalement libre d'alias (bleu clair) ;
- la présence de la ligne d'horizon terrestre (ellipse) et de ses 6 alias, qui permet d'étendre le champ de vue utile (zone délimitée par le trait noir épais) en y ajoutant la zone couverte par le ciel, sous réserve de corriger la contribution radiométrique de ce dernier, généralement très faible.

La fonction d'autocorrélation ρ_{ij} est formée à bord par une batterie de corrélateurs à 1 bit (fournissant le signe du produit) qui échantillonnent à 55 MHz (à rapprocher de la bande de fréquence équivalente de 20 MHz). Avant télémesure, la fonction ρ_{ij} est préintégrée sur une durée de 1,2 seconde (soit environ 7 km le long de l'orbite, à comparer à la résolution spatiale moyenne de 30 à 40 km). Les informations de valeur absolue sont ainsi perdues. Cette perte est compensée par un système d'étalonnage à bord complexe et efficace, dont on fera grâce au lecteur.

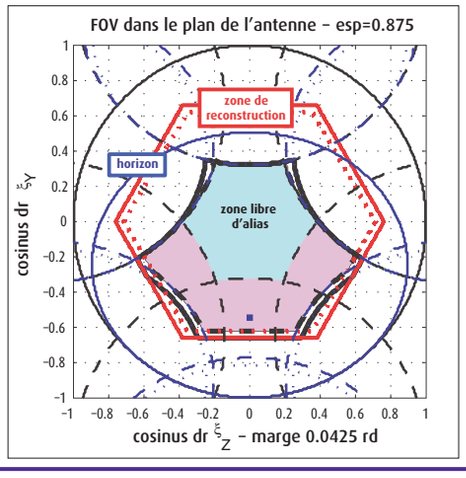


Figure A1-2 - Champ de vue (FOV) dans le repère des cosinus directeurs, zone de reconstruction (hexagonale), zone complètement libre d'alias (bleu clair) et zone libre d'alias étendue (trait noir épais).

Annexe 2 - Optimisation du scénario de mission

Les paramètres de Stokes du rayonnement émis depuis la surface terrestre, et faiblement modifiés lors du trajet atmosphérique, sont mesurés dans le repère de l'antenne. Ils sont liés à ceux du rayonnement émis dans le repère terrestre par une transformation linéaire tenant compte du changement de repère entre la surface terrestre et le plan de l'antenne et de la rotation de polarisation engendrée par l'effet Faraday au passage de l'ionosphère.

De plus, le champ de vue s'apprécie à présent sur la surface de la Terre. Sur la figure A2-1, les axes sont gradués en km et l'origine se trouve à la verticale du satellite. On reconnaît les limites du champ de vue libre d'alias de la figure A1-2. Deux limites géométriques sont ajoutées, l'une imposée par la taille moyenne du pixel SMOS et l'autre destinée à éliminer les pixels exagérément allongés.

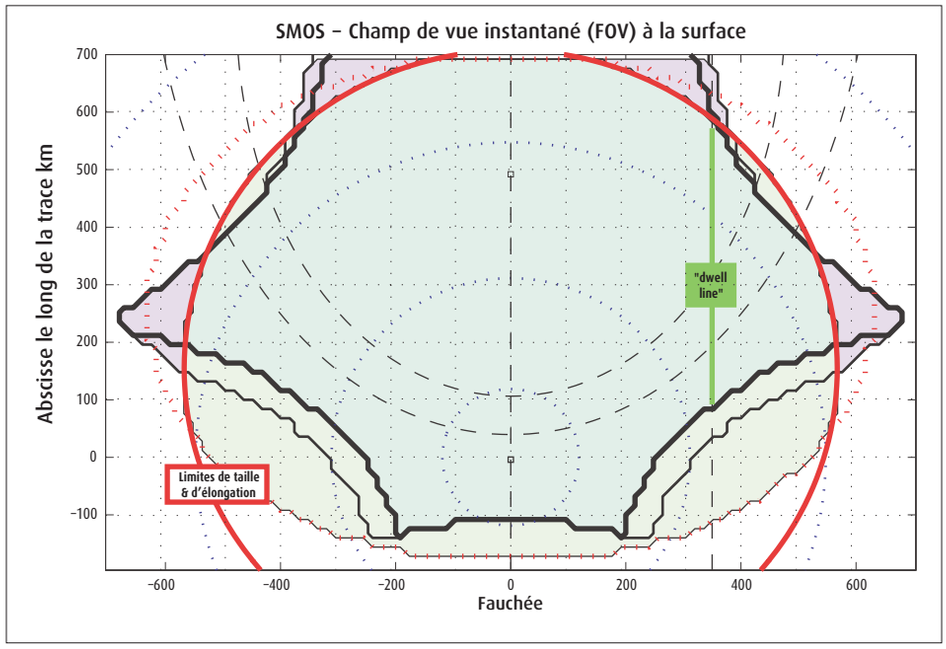


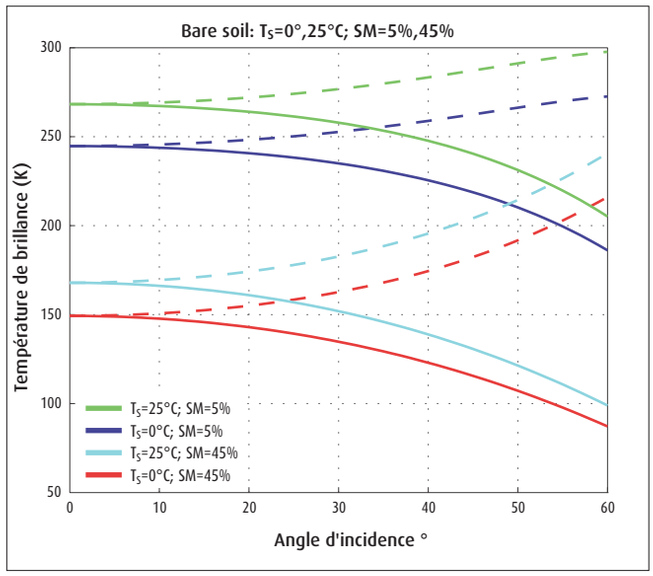
Figure A2-1 - FOV au sol montrant la variation sur une « dwell line » de l'angle d'incidence. Les cercles tiretés, centrés sur la position horizontale du satellite, correspondent à des angles d'incidence croissant par pas de 15°.

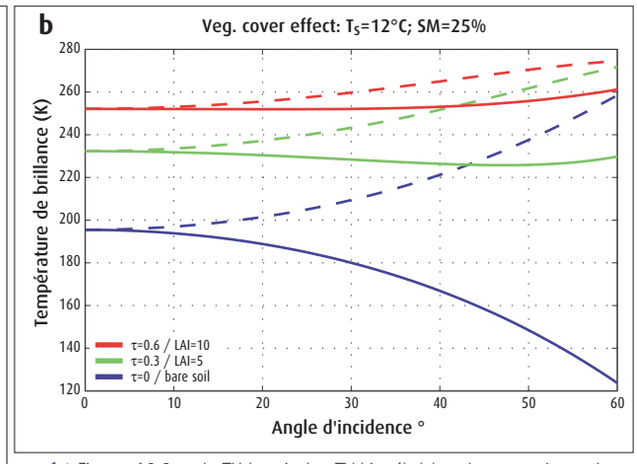
Lorsque le satellite avance, un lieu donné à la surface apporte d'abord une contribution à l'avant du FOV, puis reste sur une ligne parallèle à la trace du satellite jusqu'à sa sortie par l'arrière de la zone utile. Cela est symbolisé par la ligne verte, dite ligne de résidence ou *dwell line*.

Chaque position sur la *dwell line* correspond à un angle d'incidence différent.

Cette multiplicité d'angles d'incidence θ est importante. La variation des températures de brillance émises TH et TV, calculées à partir d'un modèle radiatif simple, est illustrée figure A2-2 pour diverses valeurs de l'humidité, de la température physique et de l'épaisseur optique équivalente τ du couvert végétal. On se rend compte que la signature des variations en fonction de θ offre un principe puissant d'extraction des TB.

Sur l'océan, les signatures géophysiques en fonction de la SSS et du vent de surface sont présentes de même, avec une sensibilité des TB plus faible.





◀▲Figures A2-2a et b- TH (continu) et TV (tireté). (a) : sol nu, pour deux valeurs de l'humidité SM et de la température physique de surface Ts. (b) : sol non nu, pour trois valeurs de l'épaisseur optique équivalente τ du couvert végétal.

Toutefois, l'efficacité du traitement mettra en jeu non seulement la gamme de variation de l'angle d'incidence mais aussi le nombre de données indépendantes (matérialisé qualitativement par la longueur de la *dwell line*). En effet le signal radiométrique est aléatoire. Les mesures sont donc affectées d'une incertitude radiométrique.

Le temps de revisite dépend de la fauchée, qui est limitée par les trois contours montrés sur la figure 3 (contraintes géométriques, bornes de repliement), mais aussi par la longueur minimale de la *dwell line* permettant de satisfaire l'exigence de précision sur la SM. Les contraintes géométriques dépendent de l'altitude de vol ainsi que du diamètre du cercle dans lequel s'inscrit le réseau interférométrique. Ce diamètre dépend du nombre d'éléments mais aussi de leur espacement qui conditionne par ailleurs la zone non soumise aux repliements... Tout cela montre que l'optimisation du scénario doit être réalisée simultanément sur l'ensemble des spécifications et des principaux éléments qui les dimensionnent. L'optimisation a donc porté sur l'altitude de vol, le nombre et l'espacement des éléments d'antenne, l'inclinaison du plan d'antenne et le positionnement des bras.

Bibliographie

Anterrieu E., 2004 : A resolving matrix approach for Synthetic Aperture Imaging Radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 42, 1649-1656.

Barré H., B. Duesmann et **Y. H. Kerr**, 2008 : SMOS: The mission and the system. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46, 587-593.

Jackson T. J., D. M. Le Vine, C. T. Swift, T. J. Schmugge et **F. R. Schiebe**, 1995 : Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92. *Remote Sens. Environ.*, 53, 27-37.

Kerr Y. H., P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, S. Delwart, F. Cabot, J. Boutin, M.-J. Escorihuela, J. Font, N. Reul, C. Gruhier, S. Juglea, M. Drinkwater, A. Hahne, M. Martin-Neira et **S. Mecklenburg**, 2010 : The SMOS mission: new tool for monitoring key elements of the global water cycle. *Proc. IEEE*, 98, 666-687.

Lagerloef G. S. E., J. Boutin, Y. Chao, T. Delcroix, J. Font, P. Niiler, N. Reul, S. Riser, R. Schmitt, D. Stammer et **F. Wentz**, 2010 : Resolving the global surface salinity field and variations by blending satellite and in situ observations. *Proceedings of the OceanObs09: Sustained Ocean Observations and Information for Society* (vol. 2), Venise, Italie, 21-25 septembre 2009, éd. J. Hall, D. E. Harrison et D. Stammer, ESA Publication WPP-306 (http://www.oceanobs09.net/proceedings/cwp/Lagerloef-OceanObs09.cwp.51.pdf).

Ruf C. S., C. T. Swift, A. B. Tanner et **D. M. Le Vine**, 1988 : Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for remote sensing of the earth. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 26, 597-611.

Waldteufel P., J. Boutin et **Y. Kerr**, 2003 : Selecting an optimal configuration for the Soil Moisture and Ocean Salinity Mission. *Radio Science*, 38, 8051, doi: 10.1029/2002RS00274.

Wigneron J. P., A. Chanzy, P. Waldteufel, J.-C. Calvet et **Y. Kerr**, 2000 : Two-dimensional microwave interferometer retrieval capabilities over land surfaces (SMOS mission). *Remote Sens. Environ.*, 73, 270-282.

World Ocean Atlas, 2005 : http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html.

Yin X., J. Boutin, P. Spurgeon, J.-L. Vergely et **P. Waldteufel**, 2010 : First analysis of SMOS sea surface salinity. *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen, Norway, 28 June-2 July 2010. ESA SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6.

Zine S., J. Boutin, J. Font, N. Reul, P. Waldteufel, C. Gabarro, J. Tenerelli, F. Petitcolin, J.-L. Vergely, M. Talone et **S. Delwart**, 2008 : Overview of the SMOS Sea Surface Salinity Prototype Processor. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46, 621-645.