



HAL
open science

Modélisation du canal de propagation Air-Sol-Air appliqué aux Radioaltimètres

André Paris, David Carsenat, Cyril Decroze, Moctar Mouhamadou, Stéphane Tallet, Guillaume Geneste

► **To cite this version:**

André Paris, David Carsenat, Cyril Decroze, Moctar Mouhamadou, Stéphane Tallet, et al.. Modélisation du canal de propagation Air-Sol-Air appliqué aux Radioaltimètres. 19eme Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01281954

HAL Id: hal-01281954

<https://hal.science/hal-01281954>

Submitted on 3 Mar 2016

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.

Modélisation du canal de propagation Air-Sol-Air appliqué aux Radioaltimètres

André Paris^{1&2}, David Carsenat², Cyril Decroze², Moctar Mouhamadou², Stéphane Tallet¹, Guillaume Geneste¹

¹THALES Communications & Security, 6 Rue Lieutenant-Colonel Laporte, 19100 BRIVE

²Laboratoire XLim, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 LIMOGES Cedex

Résumé

Une nouvelle approche pour l'étude de la propagation air-sol-air dans le contexte aéronautique est proposée dans cet article. L'élaboration d'un simulateur à base de fonctions de distribution de réflexion bidirectionnelle destiné à la caractérisation d'équipements de radionavigation aéronautique est détaillée et l'étude du contexte de développement du simulateur, le principe de calcul électromagnétique déployé et les premiers résultats obtenus sont abordés.

1. Introduction

1.a. Mise en contexte

Un radioaltimètre est un radar dont le rôle est de mesurer la hauteur d'un avion à chaque instant [1]. Equipement critique, il est particulièrement utilisé durant les phases de décollage et d'atterrissage. Le sol est utilisé comme réflecteur et le canal de propagation aéronautique Air-Sol-Air est peu étudié dans ce contexte. Le sol est un élément hétérogène et anisotrope qui modifie particulièrement le signal qu'il réfléchit [2]. Ces caractéristiques du canal de propagation Air-Sol-Air engendrent des comportements des appareils de radionavigation difficilement reproductibles en laboratoire à l'heure actuelle. Afin de disposer d'un moyen de caractérisation de ses produits dans des conditions réelles, THALES, équipementier aéronautique et fabricant de radioaltimètres, s'intéresse particulièrement à l'étude de la propagation air-sol-air. L'objectif principal est de réaliser un émulateur de canal interfacé sur l'équipement qui permette d'étudier l'effet du canal sur le radioaltimètre. Ce document propose l'étude du canal de propagation Air-Sol-Air dans le but d'obtenir un modèle intégrable à un banc de test (Figure 1).



Figure 1. Banc de caractérisation de radioaltimètre

1.b. Etat de l'art

Le canal de propagation est un filtre avec une triple dépendance en temps, en retard et en angle. C'est à dire qu'il varie dans l'espace et dans le temps en retardant, atténuant et déphasant les signaux qui le traversent. Modéliser le canal de propagation revient donc à évaluer les caractéristiques de ce filtre. Ces caractéristiques pourront ensuite être utilisées pour réaliser le filtrage des signaux réels d'un équipement. Le canal de propagation est alors remplacé par son modèle dans le banc de test, ce qui permet de tester les performances d'un radioaltimètre en laboratoire et en temps réel.

La littérature propose des modèles de canaux aéronautiques qui ne correspondent pas au besoin de caractérisation de ce contexte particulier [3], [4]. En effet, les études menées jusqu'à présent traitent essentiellement des problèmes de radiocommunication et concernent donc des transmissions Air-Sol ou Sol-Air pour lesquels le sol ne joue pas un rôle prépondérant. On trouve néanmoins des études qui décrivent des modèles de diffraction de différents matériaux diélectriques constitutifs du sol [1], de la végétation [5], ou encore des plans d'eau [4]. Les résultats de ces études pourront être transposés pour servir de moyen de comparaison avec les résultats du simulateur ou encore pour enrichir sa base de données.

2. Principe du simulateur

2.a. Méthodes de calcul électromagnétique

On trouve dans la littérature plusieurs méthodes de calcul électromagnétique pour la simulation de scènes 3D. On distingue plus particulièrement les méthodes de résolution asymptotiques basées sur la géométrie des objets, les méthodes dites « fullwave » et les méthodes hybrides. L'objectif de cette étude n'est pas de construire un logiciel de calcul électromagnétique mais de réaliser un outil adapté à l'étude du canal de propagation air-sol-air appliqué aux radioaltimètres. Celui-ci doit en outre permettre d'obtenir rapidement des réponses impulsionnelles de grandes scènes adaptées à leur réutilisation à l'intérieur d'un émulateur sur lequel sera connecté un radioaltimètre sous test. Les logiciels cités précédemment ne conviennent pas du fait de leur moteur

de calcul nécessitant des ressources matérielles trop importantes pour l'application spécifique visée.

Les méthodes asymptotiques basées sur la géométrie des objets proposent le traitement d'objets de grande taille devant la longueur d'onde considérée et permettent une résolution avec un temps et un coût de calcul raisonnable. Parmi elles, le tracé de rayon nécessite un nombre de facette considérable et la prise en compte de leurs arêtes pour assurer la continuité du champ réfléchi. Les méthodes « fullwave », basées sur des algorithmes de résolution des équations de Maxwell, permettent une étude plus poussée des objets de petite dimension devant la longueur d'onde, mais leur coût en ressources de calcul est élevé. Les méthodes hybrides proposent quant à elles un calcul globalement géométrique pour réduire les temps et coûts de calcul avec une résolution localement « fullwave » pour traiter les singularités de petite taille devant la longueur d'onde.

Le contexte dans lequel se place cette étude comporte uniquement des scènes de grande taille devant la longueur d'onde. Néanmoins, nous proposons ici une résolution du problème hybride qui permette de traiter efficacement les variations de la nature du sol et de ses éléments constitutifs tels que l'herbe ou les bâtiments.

2.b. Simulateur de canal de propagation

Le simulateur codé pour modéliser le canal de propagation étudié est basé sur une méthode de calcul hybride reposant sur le lancer de rayon et les fonctions de distribution de réflexion bidirectionnelle (BRDF) des facettes constituant le modèle numérique de terrain (Figure 2).

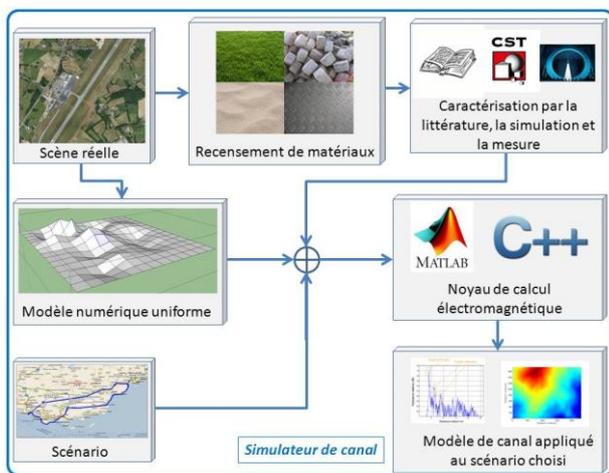


Figure 2. Synoptique de simulateur de canal de propagation Air-Sol-Air

Une BRDF permet de caractériser la surface équivalente radar d'un matériau. Le principe appliqué à cette étude revient à caractériser la SER d'un matériau en composantes principales et croisées. On obtient alors une matrice complexe trois dimensions qui représente les coefficients de réflexion de l'élément de surface. La base de données de ces BRDF est obtenue à partir de la littérature [1], [4], [5], de simulations « full-wave » et de mesures effectuées sur des échantillons.

La contribution C_n d'une facette élémentaire n est donnée par l'équation (1).

$$C_n = \frac{BRDF_n(\theta, \varphi) * G_{Tx}(\theta, \varphi) * G_{Rx}(\theta, \varphi)}{(4 * \pi * d)^2} \quad (1)$$

Où θ et φ sont les angles (élévation, azimut) du rayon incident à la facette considérée. $BRDF_n(\theta, \varphi)$ est la fonction de réflexion bidirectionnelle de la facette, $G_{Tx}(\theta, \varphi)$ et $G_{Rx}(\theta, \varphi)$ sont respectivement les coefficients des diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception, chaque terme étant évalué pour les valeurs des angles calculées. La réponse impulsionnelle du canal de propagation sera ensuite définie par la somme de ces coefficients retardés. Ceci est donné par l'équation (2)

$$H_n(t) = \sum_n C_n * \delta_n(t - \tau_n) \quad (2)$$

Où $\delta_n(t - \tau_n)$ est la fonction de Dirac retardée de τ_n (avec $\tau_n = 2 * d_n / c$, où d est la distance antenne-facette et c la célérité de l'onde dans l'air). La figure 3 donne une illustration de la méthodologie de calcul appliqué à un élément de surface triangulaire discrétisé en facettes carrées. Chaque rayon représenté en vert est « un trajet » de l'onde qui se réfléchit sur un élément carré virtuel (noir) en son centre (rouge). Le signal total sera donc bien la somme de tous ces trajets pondérés par le retard lié à leur temps de propagation.

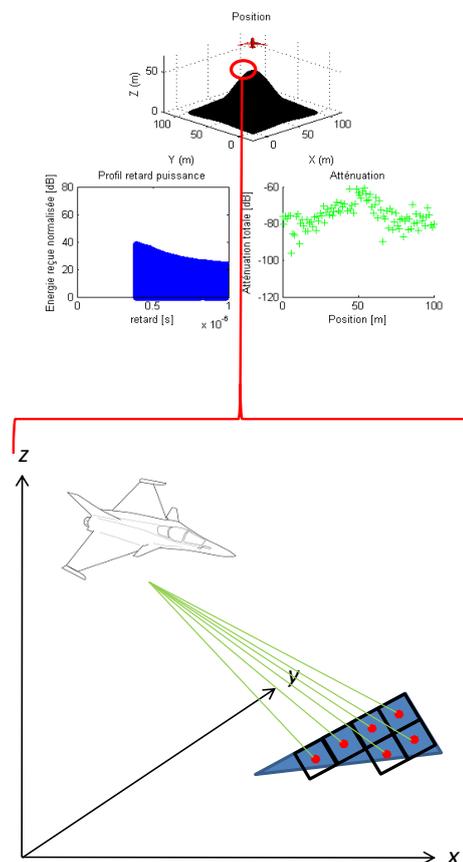


Figure 3. Lancer de rayon appliqué à un triangle discrétisé en carrés

2.c. Caractérisation de matériaux

Trois méthodes sont envisagées pour l'obtention des matrices de BRDF de facettes de matériaux. La première consiste à simuler un échantillon en utilisant le logiciel CST avec comme caractéristiques électromagnétiques du matériau des valeurs données par la littérature. La deuxième méthode est dérivée de la première et consiste à simuler ce même échantillon, mais en utilisant des résultats de mesure comme caractéristiques électromagnétiques (ϵ_r , σ). La dernière solution consiste à réaliser intégralement la mesure en chambre anéchoïque. Pour chacune des méthodes proposées, la demi-sphère supérieure à la facette de matériau à caractériser est balayée avec deux sources omnidirectionnelles, une en champ Horizontal et une en champ Vertical. Les composantes de réflexion principales et croisées sont relevées pour former les matrices BRDF. Dans tous les cas, l'obtention des résultats se fait dans le respect des conditions de champ lointain (choix du rayon de la demi-sphère), ce qui permet de leur appliquer ultérieurement la décroissance en $\frac{1}{d}$ de l'équation (1).

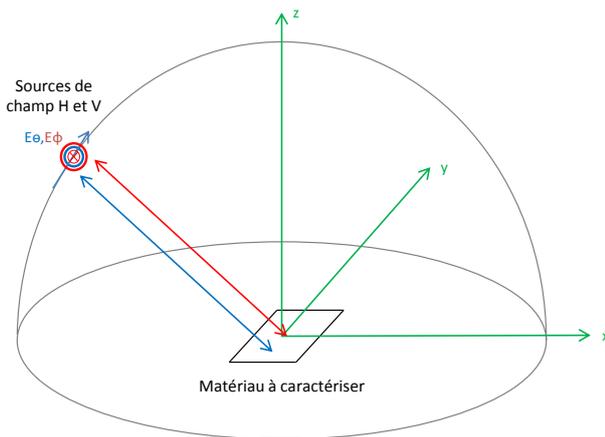


Figure 4. Principe de caractérisation de matériaux

3. Résultats

3.a. Comparaison à CST

Le simulateur est paramétré pour fonctionner sur la base d'un matériau en métal parfaitement conducteur (PEC) dont le modèle est également présent dans le logiciel de calcul électromagnétique CST.

Une facette carrée de 200mm de côté est soumise à un signal CW de 4GHz. En partant de la verticale de la facette, on tourne autour de l'axe y jusqu'à atteindre un angle 90° par rapport à la position initiale. Le logiciel CST est configuré pour réaliser la même simulation. Le module et la phase du signal complexe issu du simulateur sont analysés et comparés aux résultats de simulation du logiciel CST. La figure 5 montre une concordance des résultats excellente, avec un écart sur le module et la phase situé en permanence en dessous de 0.5%. Ceci nous permet de démontrer que dans un cas canonique simple, notre simulateur offre des performances

équivalentes au logiciel CST en termes de résultats attendus.

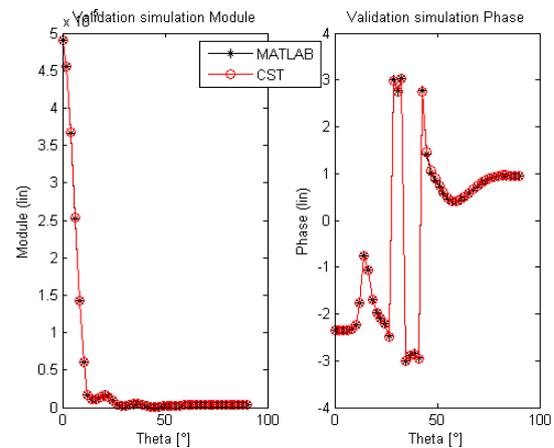


Figure 5. Validation du simulateur pour une seule facette élémentaire en métal parfait

La simulation suivante compare également les résultats du simulateur présenté dans cette étude avec ceux du logiciel CST dans les mêmes conditions (Figure 6).

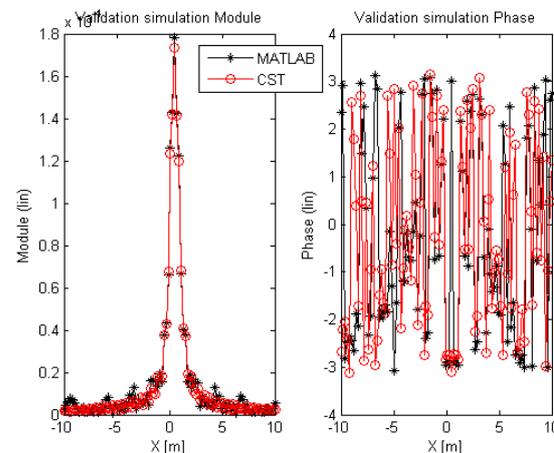


Figure 6. Validation de la reconstitution des signaux en provenance de plusieurs facettes élémentaires

On souhaite ici démontrer le fonctionnement de la reconstitution du signal en provenance de plusieurs unités élémentaires dont le matériau est toujours un métal parfaitement conducteur. Le profil du sol est ici composé de huit facettes orientées et positionnées horizontalement dans l'espace, la trajectoire de l'aéronef virtuel décrivant une ligne droite au-dessus. Il est à noter que les facettes faisant 200mm de côté, elles sont physiquement présentes de environ -1m à 1m sur l'axe x des courbes de la figure 7 (surface de 200m*2m). L'excursion du mobile allant de -10m à 10m, il est totalement logique d'obtenir un pic d'énergie à la verticale de celles-ci (en X = 0). On remarque une très bonne concordance des résultats avec une erreur en

module et en phase inférieure à 3%. Cette erreur résulte directement du principe de calcul du simulateur. En effet, le modèle ne prend pas en compte les interactions entre les facettes. La crédibilité de cette hypothèse est ici validée, la marge d'erreur étant satisfaisante pour notre étude.

3.b. Comparaison à des essais en vol

Une base de données de matériaux a été obtenue à l'aide des méthodes présentées au paragraphe 2.c. Parmi les matériaux caractérisés, on note la présence du « tarmac », matériau largement utilisé en tant que revêtement de pistes d'aéroport. Des essais en vol ont été réalisés avec un hélicoptère, le radioaltimètre embarqué à bord ayant été instrumenté pour servir de sondeur de canal. Le niveau d'énergie réfléchi par le sol est mesuré et sert de moyen de comparaison avec les résultats du simulateur paramétré pour reproduire des conditions similaires de vol (hauteur, puissance émise, fréquence...). La figure 7 compare les résultats issus d'un vol stationnaire au-dessus de tarmac. Le niveau d'énergie réfléchi moyen est de -52.8 dB en mesure contre -54.8 dB en simulation, soit un écart inférieur à 4%. L'écart type est de 3.4 dB en mesure contre 3.8 dB en simulation, soit un écart inférieur à 10%.

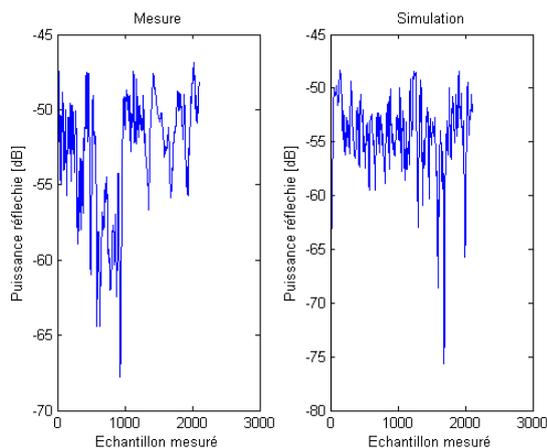


Figure 7. Comparaison d'une simulation avec un essai en vol au-dessus de tarmac.

La figure 8 propose des résultats analogues pour le survol d'un champ de céréales coupées. Le niveau d'énergie moyen est de -60.1dB avec un écart type de 4.9 dB en mesure contre -60.1dB et 4.5 dB d'écart type en simulation. Ceci nous permet de démontrer la capacité du simulateur à reproduire des conditions de vol réelles de manière précise, ce qui en fait un outil suffisamment abouti pour son intégration dans un émulateur destiné au test de radioaltimètres.

4. Conclusion

Un simulateur permettant la reproduction de conditions réelles de propagation a été créé dans le but d'obtenir un outil de caractérisation du canal de propagation Air-Sol-Air. Une méthode originale alliant le lancer de rayon aux fonctions de distribution de

réflexion bidirectionnelles a été mise en place et permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

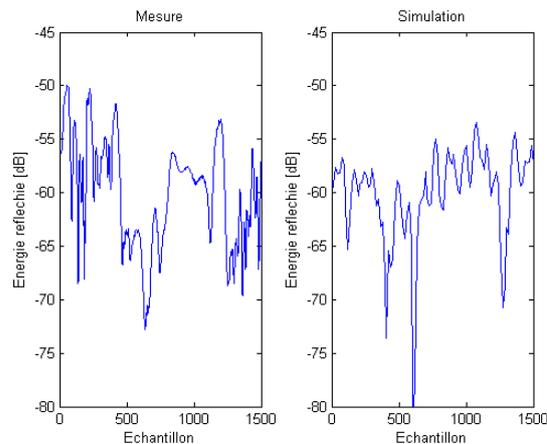


Figure 8. Comparaison d'une simulation avec un essai en vol au-dessus d'un champ de céréales coupées.

Le fonctionnement a été validé par des comparaisons à des logiciels de calcul électromagnétiques dans des cas simples et à des essais en vol pour des cas complexes.

Par ailleurs, le travail présenté ici constitue la première brique du développement d'un banc pour l'émulation du canal de propagation Air-Sol-Air dans le contexte de fonctionnement des radioaltimètres. L'implémentation de ce modèle sur une architecture matérielle constitue l'étape suivante. Dans ce sens, les résultats extraits de la version actuelle du simulateur sont d'ores et déjà formatés pour leur implémentation sur un émulateur, ce dernier étant à l'heure actuelle en cours de développement.

5. Bibliographie

- [1]. A.G.Stove, « *Linear FMCW Radar Techniques* », Radar and Signal Processing, IEE Proceedings, Vol. 139, Issue 5, October 1992, pp. 343-350.
- [2]. Fawwaz T.Ulaby, M.Craig Dobson « *Handbook Of Radar Scattering Statistics for Terrain* », Artech House IPF Book.
- [3]. E.Haas, « *Aeronautical Channel Modeling* », IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 51, N° 2, March 2002, pp. 254-264.
- [4]. Y.S.Meng and Y.H.Lee, « *Measurements and Characterizations of Air-to-Ground Channel Over Sea Surface at C-Band with Low Airborne Altitudes* », IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, N° 4, May 2011, pp. 1943-1948.
- [5]. M.A.Karam, A.K.Fung, R.H.Lang, and N.S.Chauhan, « *A Microwave Scattering Model for Layered Vegetation* », IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, N°4, July 1992, pp. 767-784.