



**HAL**  
open science

# La propagation dans la troposphère pour les systèmes spatiaux de télécommunications à très haut débit en bandes Ka et Q/V

Nicolas Jeannin

► **To cite this version:**

Nicolas Jeannin. La propagation dans la troposphère pour les systèmes spatiaux de télécommunications à très haut débit en bandes Ka et Q/V. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2016, 2016-1, p. 6-10. hal-01401765

**HAL Id: hal-01401765**

**<https://hal.science/hal-01401765>**

Submitted on 23 Nov 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.

## La propagation dans la troposphère pour les systèmes spatiaux de télécommunications à très haut débit en bandes Ka et Q/V

Nicolas Jeannin

Ingénieur de recherche

Département Electromagnétisme et radar – ONERA Toulouse

**Le Grand Prix de l'Électronique Général Ferrié** récompense des travaux ayant contribué aux progrès de la radioélectricité, de l'électronique et de leurs applications. Décerné depuis 1949, il commémore les travaux du Général Ferrié, pionnier de l'utilisation de la radio auquel on doit des réalisations remarquables telles que la liaison Côte d'Azur-Corse dès 1901 et la première station radiophonique commerciale de la Tour Eiffel.

### Systèmes de télécommunications par satellite à très haut débit et la bande Ka et Q/V

Les systèmes de télécommunications par satellite constituent l'une des possibilités pour assurer la fourniture de services multimédia haut débit aux zones non ou mal desservies par les réseaux de télécommunications terrestres. Il faut à cet effet qu'ils puissent proposer des débits de données par utilisateur du même ordre de grandeur que ceux proposés par les réseaux terrestres, à un coût comparable. Cela requiert une capacité par satellite de plusieurs centaines de gigabits par seconde, sur une zone de couverture continentale. Afin d'atteindre ce débit, il est nécessaire de pouvoir moduler l'information sur de larges bandes de fréquence. Les bandes de fréquence utilisées traditionnellement par les télécommunications par satellite sont saturées et ne sont pas suffisamment larges pour obtenir les capacités ciblées. A cet effet, une migration de ces systèmes depuis les bandes C (3-8 GHz) et Ku (11-17 GHz) vers la bande Ka (20-30 GHz) ou Q/V (40-50 GHz) a été initiée il y a quelques années.

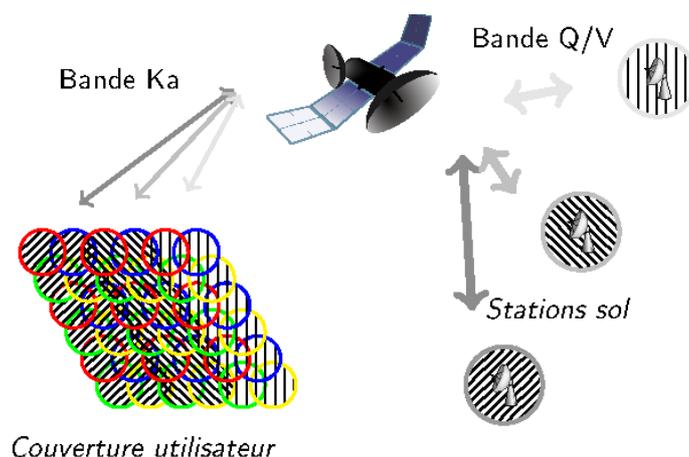


Figure 1 : Schéma de principe d'un système satellitaire multi-faisceaux.

Une illustration du principe de fonctionnement de ces systèmes est donnée à la figure 1. Les stations sol de l'opérateur envoient un signal modulé contenant les données vers le satellite qui amplifie le

signal et le transpose en fréquence pour le renvoyer vers les cellules de la couverture utilisateur desservies. Les utilisateurs dans cette couverture se partagent le flux de données. Les bandes de fréquence disponibles pour le système sont réutilisées par les différentes stations sol, la directivité des antennes et l'espacement géographique permettant de limiter les interférences à un niveau raisonnable. Du côté utilisateur, les faisceaux utilisent uniquement une fraction de la bande disponible afin de limiter les interférences inter-faisceaux. La réutilisation de fréquence est conçue pour que deux faisceaux utilisant la même fréquence ne soient pas adjacents.

L'utilisation de la bande Q/V et Ka permet de limiter le nombre de stations sol côté opérateur et de faisceaux côté utilisateur, à un nombre raisonnable mais suffisant pour obtenir les débits de données visés. En effet, la bande de modulation disponible est supérieure d'au moins un ordre de grandeur à celle offerte par les fréquences plus basses. Outre la problématique liée au développement de composants RF spatiaux, les fortes pertes de propagation dans la troposphère, particulièrement en présence de pluie, ont longtemps constitué un frein à l'utilisation de ces bandes. En effet les pertes atmosphériques augmentent avec la fréquence et ne peuvent plus être compensées avec une marge statique de puissance pour assurer une disponibilité satisfaisante. De ce fait, il est impératif d'utiliser des méthodes de compensation adaptatives des affaiblissements. L'optimisation de ces systèmes requiert une connaissance statistique de ces affaiblissements de propagation. Cette connaissance peut être obtenue par le biais de mesures des fluctuations de puissance d'un signal émis par un satellite induites par les variations des conditions météorologiques. Néanmoins, ces mesures sont spécifiques à la géométrie de la liaison, à la zone climatique et à la fréquence et ont été conduites sur un nombre réduit de sites. Par conséquent, en complément de ces mesures, des modèles capables de reproduire les caractéristiques statistiques de ces observations doivent être développés pour fournir des entrées aux simulateurs systèmes.

## **Effets de propagation dans la troposphère**

Les ondes électromagnétiques sont affectées par différents phénomènes lors de leur propagation dans la troposphère (couche inférieure de l'atmosphère), en fonction des conditions météorologiques. Ces phénomènes - l'atténuation dans les gaz et les hydrométéores, la dépolarisation et la scintillation - ont globalement tendance à augmenter fortement avec la fréquence et deviennent très sensibles au-delà de 10 GHz. L'oxygène et la vapeur d'eau atmosphérique causent des atténuations pouvant aller jusqu'à quelques décibels en bande Q/V. En présence d'hydrométéores (gouttelettes d'eau liquide nuageuse ou gouttes de pluie), une fraction de la puissance des ondes incidentes est absorbée ou diffusée (diffusion de Mie et Rayleigh suivant le rapport entre la longueur d'onde et la dimension de la particule). La variation en fonction de la fréquence de ces atténuations spécifiques, dans diverses conditions atmosphériques est illustrée par la figure 2.

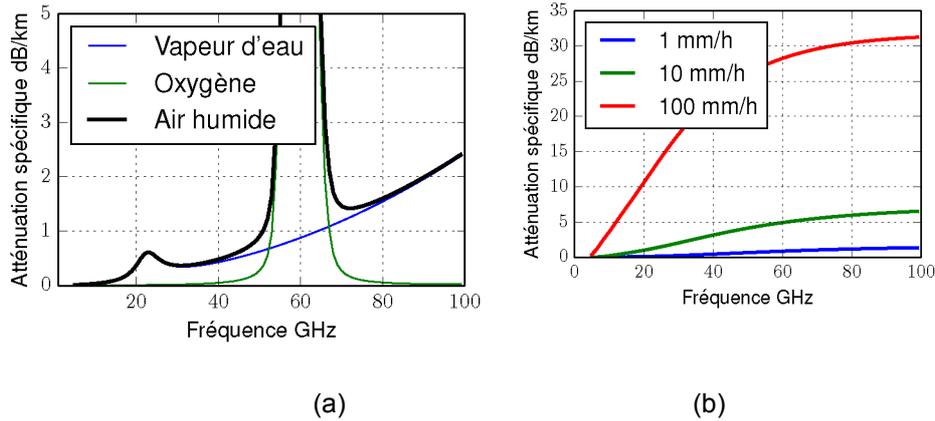


Figure 2 : Atténuation spécifique (dB/km) en fonction de la fréquence causée par les gaz (a) et par la pluie (b).

Les liaisons en bande Ka ou Q/V peuvent subir des atténuations de plusieurs dizaines de décibels en présence de précipitations (ces liaisons ont généralement une longueur de parcours sous la pluie de 5 à 10 km). En outre, en présence d'hydrométéores dissymétriques, l'onde peut également être dépolarisée, ce qui est une source d'interférence d'une polarisation orthogonale sur l'autre. Par ailleurs, les fluctuations d'indice de réfraction dues à la turbulence atmosphérique causent également une scintillation qui se manifeste par des fluctuations rapides du signal.

Pour évaluer la disponibilité d'une liaison terre-espace en fonction de la marge disponible pour compenser ces effets de propagation, des modèles ont été développés par la commission 3 de l'Union internationale des télécommunications secteur Radiocommunication (UIT-R). En bande Ku ces marges de puissances sont généralement de quelques dB pour garantir une disponibilité de 99.99 % en zone tempérée. Un exemple des marges nécessaires pour opérer un lien satellite à 50 GHz avec une disponibilité de 99.5 % est présenté figure 3.

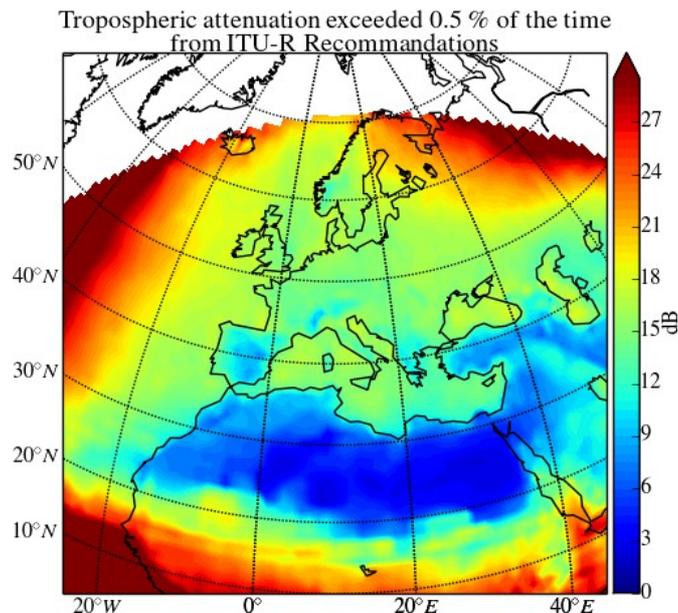


Figure 3 : Carte d'atténuation dépassée 0.5 % du temps sur l'Europe pour un lien avec un satellite géostationnaire à 50 GHz, calculée par la Rec. UIT-R P. 618 [1].

Cette disponibilité de 99.5 % est déjà jugée insuffisante pour la majorité des applications et nécessite pour être obtenue d'avoir en bande Q/V une marge de puissance dépassant la dizaine de décibels sur

la majorité de l'Europe. Garder une telle marge de puissance pour compenser des affaiblissements qui sont peu fréquents (la probabilité de précipitations est proche de 5 % en zone tempérée) est insoutenable vu les limitations de puissance à bord des satellites.

### **Systèmes adaptatifs de compensation des affaiblissements**

Pour compenser ces pertes de propagation, sans pour autant utiliser une marge de puissance trop importante, différents mécanismes adaptatifs, ont été développés pour s'accommoder de la montée en fréquence des transmissions par satellite.

La solution la plus intuitive consiste à faire varier la puissance d'émission en fonction des conditions de propagation. Néanmoins cette solution est limitée à quelques décibels dans la mesure où elle requiert un surdimensionnement coûteux des amplificateurs sol ou bord.

Une autre technique utilisée consiste à faire varier la modulation et le codage de la liaison en fonction de l'état du canal de propagation. Ainsi en cas de dégradation de l'état du canal, des modulations et codages plus robustes, permettant de s'accommoder de rapports signal à bruit plus faible, peuvent être utilisés. En contrepartie l'efficacité spectrale (débit d'information par unité de bande de modulation) de la liaison et donc son débit sont diminués. Cela permet dans la plupart des cas de ne pas avoir une interruption totale du service en cas de mauvaises conditions météorologiques mais seulement une baisse de la capacité de la liaison.

Enfin, pour les réseaux de stations sol des opérateurs pour lesquels les liaisons sont susceptibles d'utiliser la bande Q/V, il est possible d'éviter dans la plupart des cas les indisponibilités en ajoutant au réseau une ou plusieurs stations sol de redondance, capables de prendre le relais d'autres stations sol. En effet ces stations sol sont espacées de plusieurs dizaines de kilomètres et les pertes de propagation sont faiblement corrélées. Dès lors la faible probabilité de subir de fortes précipitations et la combinatoire font que la probabilité d'avoir simultanément plus de stations sol avec de mauvaises conditions de propagation que de stations redondantes est extrêmement faible. Ces mécanismes de diversité permettent d'obtenir des disponibilités comparables à celles que l'on pourrait obtenir à des fréquences plus basses [2].

Ces différentes techniques adaptatives permettent de garder des disponibilités intéressantes. Néanmoins leur dimensionnement requiert une connaissance des caractéristiques du canal de propagation, pour l'optimisation des boucles de contrôle ou pour l'estimation de performances globales du système.

### **Modélisation du canal de propagation**

Pour acquérir cette connaissance du canal de propagation, différentes campagnes de mesures, visant à mesurer à partir d'un récepteur au sol les fluctuations de puissance d'un signal non modulé émis par un satellite (comme illustré à la figure 4), ont été menées.

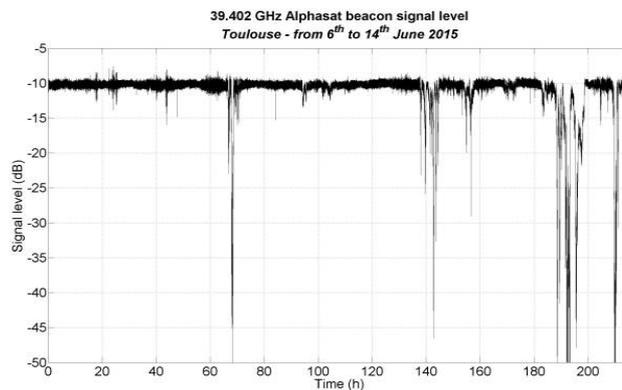


Figure 4 : Stations de réception sur le toit de l'ONERA et exemple de fluctuations de niveau de puissance durant une semaine.

Ces expérimentations permettent de caractériser les propriétés statistiques du canal de propagation. Cependant, ces mesures sont insuffisantes pour le dimensionnement système car elles ne couvrent pas l'ensemble des configurations qui peuvent être rencontrées en termes de fréquence, élévation de la liaison et climat.

Pour pallier ces insuffisances, des modèles permettant de calculer les distributions d'affaiblissement pour des liaisons avec des caractéristiques géographiques et radioélectriques arbitraires ont été développés et standardisés par l'UIT-R comme illustré à la figure 3. Ces modèles reposent sur l'utilisation de paramètres climatiques calculées sur des bases de données de réanalyses. Ces réanalyses météorologiques, comme celle du CEPMMT (Centre européen de prévision météorologique à moyen terme), sont calculées en rejouant sur de longues durées des modèles météorologiques globaux contraints par les observations météorologiques passées.

Néanmoins ces modèles statistiques, indispensables pour la détermination des marges de puissance, ne permettent pas l'optimisation des systèmes adaptatifs de compensation qui nécessitent une connaissance des corrélations spatiales et temporelles de ces derniers. Par conséquent des simulateurs de séries temporelles d'atténuation corrélées dans l'espace et dans le temps, destinées à servir de données d'entrée aux simulateurs systèmes, ont été développés. La solution développée à l'ONERA en collaboration avec le CNES repose sur la simulation de champs météorologiques à haute résolution. Elle combine un modèle de champ aléatoire dont les caractéristiques ont été évaluées sur des données expérimentales (séries temporelles d'atténuation ou observations de radars météorologiques), à des données de réanalyse. En effet les données de réanalyse ont des résolutions trop grossières (supérieure à 50 km) pour permettre de rendre compte de l'atténuation sur des liaisons terre-espace. L'approche utilisée dans cette modélisation, incorporée dans les chaînes de

simulations de plusieurs agences spatiales (CNES et ESA) et industriels, vise à rejouer des scénarios météorologiques passés à haute résolution, statistiquement réalistes, comme montré à la figure 5.

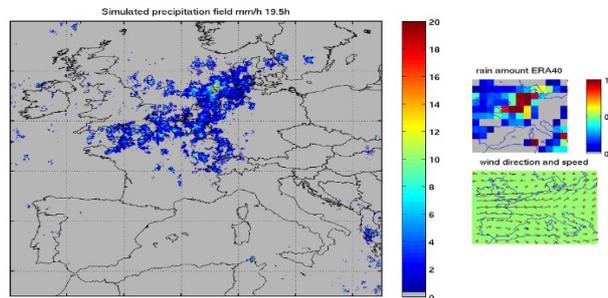


Figure 5: Exemple de simulation de champ spatio-temporel de précipitations. à gauche. A droite : Les données de réanalyse (cumul de précipitations sur 6 h et vent à 700 hPa) correspondantes.

Ces champs de paramètres météorologiques (pluie, nuage, gaz) sont a posteriori convertis en atténuation en utilisant les modèles illustrés à la figure 2. Cela permet de simuler des séries temporelles d'atténuation totale pour plusieurs dizaines de milliers d'utilisateurs répartis sur une couverture satellitaire sur des durées de plusieurs années afin de pouvoir réaliser des statistiques fiables sur les performances des systèmes.

## Conclusion

Les effets de propagation dans l'atmosphère gagnent en importance avec la montée en débit et donc en fréquence des systèmes de télécommunications par satellite. Leur bonne prise en compte est indispensable pour le développement de systèmes optimisés et économiquement viables.

La prise en compte de ces effets ne peut reposer uniquement sur des mesures, qui sont trop rares. Des modèles permettant de prédire les distributions d'atténuation ou de simuler des séries temporelles ou champs spatio-temporels corrélés ont donc été développés. Certains de ces modèles ont été standardisés auprès de l'UIT-R ou incorporés dans les chaînes de simulations des agences ou opérateurs satellites.

Ces modélisations ont permis de prouver l'efficacité de différentes techniques de compensation adaptative des pertes de propagation et de contribuer ainsi à la montée des systèmes en bande Ka et dans un futur proche en bande Q/V. Il est néanmoins déjà pressenti à moyen terme que ces bandes ne seront pas suffisantes pour satisfaire la demande en capacité. Une migration des liaisons entre les stations opérateurs et les satellites vers la bande W (70-90 GHz) ou dans le proche infrarouge (où d'autres types de problèmes de propagation sont rencontrés) est étudiée dès à présent.

## Références

- [1] UIT-R, Recommandation P.618-12, Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunications Terre-espace, 2015 Genève.
- [2] Jeannin, N., Castanet, L., Radzik, J., Bousquet, M., Evans, B., & Thompson, P. (2014). Smart gateways for terabit/s satellite. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 32(2), 93-106.

## Titre de l'article sur toutes les pages impaires sauf la première page

[3] Jeannin, N., Féral, L., Sauvageot, H., Castanet, L., & Lacoste, F. (2012). A large-scale space-time stochastic simulation tool of rain attenuation for the design and optimization of adaptive satellite communication systems operating between 10 and 50 GHz. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012.

**Nicolas Jeannin** est ingénieur de recherche dans l'unité Radiocommunication et propagation du département Électromagnétisme et radar de l'ONERA Toulouse. Après avoir obtenu un diplôme d'ingénieur de Supaero en 2005, et une thèse de l'université de Toulouse en 2008, il a rejoint le département Électromagnétisme et radar de l'ONERA. Depuis, il mène diverses activités principalement pour le compte du CNES et de l'ESA dont les thématiques portent essentiellement sur la modélisation des conditions de propagation dans l'atmosphère et la quantification de leur impact sur les systèmes de télécommunications par satellite et de télédétection.