



La propagation hertzienne

Une longue histoire plus que jamais d'actualité

Jacques Claverie

Membre senior de la SEE
Maître de Conférences à l'Académie
Militaire de St-Cyr Coëtquidan

Qu'il s'agisse de systèmes de radiocommunications ou de radars, d'applications à courte ou longue portée, il est fondamental de caractériser les phénomènes de propagation des ondes radioélectriques et notamment de décrire le (ou les) milieu(x) où les ondes se propagent. Sans avoir la prétention d'être exhaustif, cet article propose quelques éclairages récents sur une histoire désormais plus que centenaire.

Introduction

Dans leur ouvrage de 1997 sur la propagation des ondes [1], Jacques Lavernat et Michel Sylvain intitulaient leur premier chapitre « Pourquoi et comment faire de la propagation ? ». A cette époque, les liaisons à fibre optique supplantaient progressivement les faisceaux hertziens. Mais la démocratisation naissante des systèmes de téléphonie mobile (GSM) annonçait un nouvel âge d'or pour les liaisons sans fil.

Vingt-cinq ans plus tard, la compréhension des phénomènes de propagation, reste plus que jamais une nécessité absolue et ce pour de multiples raisons :

- les progrès en matière de codage, modulation, traitement du signal ne peuvent à eux seuls permettre le calcul des performances de systèmes pour lesquels il

faut souvent optimiser le triptyque : portée, bande passante (ou débit d'information) et puissance émise ;

- les systèmes utilisant la propagation libre d'ondes électromagnétiques sont de plus en plus divers et nombreux, qu'il s'agisse de systèmes de radiocommunications ou de systèmes de télédétection (radars). Tous ces services, qu'ils soient localisés à proximité du sol terrestre ou à plus haute altitude, tels les satellites, se partagent le même spectre de fréquences. L'étude des possibilités de brouillage entre eux constitue un problème particulier de propagation. La récente mise en lumière de brouillages possibles entre les antennes 5G et les radioaltimètres d'avion en constitue un parfait exemple ¹.

¹ voir Flash Info dans ce numéro, p.15.

- les méthodes numériques de calcul permettent la résolution des équations de propagation dans des environnements de modélisation de plus en plus réalistes. C'est désormais la description « fine » du milieu de propagation : sol, sursol, atmosphère qui concentre une part non négligeable des études et des recherches. Mais comme ces milieux sont spatialement et temporellement très variables, la modélisation de la performance des systèmes passe aussi par une approche statistique.

Éléments d'histoire et de contexte

Naissance des radiocommunications et des radars

On peut considérer que les radiocommunications sont nées avec le XX^{ème} ●●●



Figure 1 : Heinrich Hertz.

●●● siècle. En 1901, Marconi réalisa la première liaison radio transatlantique entre la Cornouaille britannique et Terre-Neuve, 2 ans après la première liaison trans-Manche télégraphique sans fil. Avant Marconi, Hertz (figure 1), en 1888, avait mis expérimentalement en évidence la propagation des ondes radioélectriques (qu'on rebaptisera ondes hertziennes en son hommage) vérifiant ainsi la théorie des champs électromagnétiques publiée par Maxwell une première fois en 1865. Mais Hertz ne voyait pas d'applications pratiques à ses expérimentations...

On a désormais des doutes sur la qualité de la réception du signal reçu lors de l'expérience de Marconi en 1901. Et on ne comprit que bien des années plus tard, le rôle joué par les couches ionosphériques pour expliquer la propagation d'une onde sur plusieurs milliers de kilomètres². Mais l'histoire était en marche :

2 L'ionosphère constitue la partie supérieure de l'atmosphère terrestre (de 50 km à quelques centaines de km d'altitude). Ce milieu complexe et très variable peut être décrit par une ou plusieurs couches qui, en « réfléchissant » les ondes électromagnétiques de fréquences inférieures à quelques dizaines de MHz, vont permettre des propagations à très longue distance par onde de ciel. L'utilisation des liaisons ionosphériques est toujours d'actualité notamment sur un plan stratégique. Malgré des débits numériques qui peinent à dépasser la dizaine de kbits/s, la possibilité d'une transmission radio de plusieurs milliers de km en un seul bond et sans satellite reste un avantage inégalable.

les applications civiles et militaires des télécommunications sans fil, pour employer la terminologie de l'époque, n'allaient cesser de se multiplier.

Dès 1904, Hülsmeier déposait le brevet du « télémbiloscope » [2], véritable ancêtre du radar. L'appareil ne mesurait pas les distances mais il s'agissait bien d'utiliser la propagation d'ondes électromagnétiques pour détecter des objets. L'invention ne connut pas à l'époque de succès commercial et fut quasiment oubliée ; il a fallu attendre le milieu des années 1920 pour que la télé-détection des cibles (re)devienne un sujet d'intérêt majeur.

L'œuf ou la poule ?

Qu'il s'agisse d'applications en matière de radiocommunications ou de radars, les études de propagation visant aussi bien à construire des modèles théoriques d'interactions entre l'onde et le milieu de propagation qu'à trouver des lois de comportement empiriques expérimentales n'ont jamais cessé depuis le début du XX^{ème} siècle. Les ingénieurs et chercheurs français n'ont pas été en reste et comme les ouvrages de synthèse sur la question ne sont pas si nombreux, il est légitime de citer ceux écrits par Lucien Boithias [3] et le Général Jacques Deygout [4]. Il convient de signaler aussi le rôle majeur joué par les équipes du CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications), l'ancêtre d'Orange Labs.

En matière de conférences ou de publications scientifiques, la « communauté propagation » est souvent associée à la « communauté antennes » généralement très majoritaire³. Avec un peu d'humour, on pourra répondre à ceux qui affirment « *qu'il faut bien des antennes pour propager les signaux* » que

3 C'est le cas avec le chapitre « Antennas and Propagation » de l'IEEE comme avec les congrès EUCAP (European Conference on Antennas and Propagation).

« *s'il n'y avait pas de signaux à propager, on n'aurait pas besoin d'antennes...* ».

Toutefois, l'URSI (Union Radio-Scientifique Internationale) en « *promouvant les activités dans le domaine des sciences de la radioélectricité et de ses applications, au profit de l'humanité* » joue un rôle fédérateur important dans le domaine de la propagation. Dès les années 1990, la SEE avait également initié l'organisation de journées d'étude dédiées à la propagation électromagnétique. En partenariat avec la DGA et l'URSI-France, la SEE a relancé l'initiative en 2018. Après une nouvelle édition en novembre 2021⁴, cette manifestation vise désormais une périodicité bisannuelle.

Quelques notions fondamentales

Les gammes de fréquences

Conformément aux recommandations de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) [5], les bandes de fréquences sont regroupées en décades avec les dénominations figurant dans le Tableau 1. Les gammes de fréquences en-dessous de la bande HF⁵ sont limitées à des utilisations nécessitant peu de bande passante : radioamateurs, radiodiffusion grandes ondes, radionavigation, communications avec les sous-marins, détection de phénomènes naturels. Les bandes HF à SHF concentrent l'immense majorité des applications actuelles des radiofréquences. Les besoins de nouveaux services et/ou l'augmentation des débits numériques expliquent l'intérêt croissant porté à la bande EHF (ou bande millimétrique) et au-delà au domaine des térahertz (THz).

Toutefois, cette « montée » en fréquence se heurte à des obstacles physiques ma-

4 <https://see.asso.fr/events/colloque-propagation-radioelectricite/>.

5 Malgré son nom, la bande HF, du point de vue des applications radio ou radar, fait partie des « fréquences basses ».

Fréquences	Longueurs d'onde	Dénomination
3 - 30 kHz	Ondes myriamétriques	VLF (Very Low Frequency)
30 - 300 kHz	Ondes kilométriques	LF (Low Frequency)
300 - 3000 kHz	Ondes hectométriques	MF (Medium Frequency)
3 - 30 MHz	Ondes décamétriques	HF (High Frequency)
30 - 300 MHz	Ondes métriques	VHF (Very High Frequency)
300 - 3000 MHz	Ondes décimétriques	UHF (Ultra High Frequency)
3 - 30 GHz	Ondes décimétriques	SHF (Super High Frequency)
30 - 300 GHz	Ondes millimétriques	EHF (Extremely High Frequency)

Tableau 1 : Dénomination des principales bandes de fréquences. Cette classification est enrichie par des appellations spécifiques aux bandes de fréquences utilisées par les radars mais aussi dans le domaine satellitaire (exemple : la bande X qui s'étend de 8 à 12 GHz). On rappelle que si λ désigne la longueur d'onde et f la fréquence de l'onde, ces deux grandeurs sont reliées par $\lambda=c/f$ où c désigne la vitesse de la lumière (3.10^8 m/s).

jeux au premier rang desquels on trouve l'atténuation atmosphérique. La figure 2 montre qu'à partir d'une fréquence de 10 GHz, cette atténuation ne peut plus être négligée. L'atténuation moléculaire est caractérisée par des pics d'absorption causés par les constituants de l'air (principalement O_2 , H_2O et CO_2). A celle-ci s'ajoute celle liée aux hydrométéores (pluie, neige, brouillard) qui globalement augmente avec la fréquence et l'intensité de précipitation. Dans les régions tropicales et équatoriales, les effets de la pluie sur les liaisons radio sont sensibles dès que les fréquences utilisées dépassent quelques GHz. La réception des liaisons satellitaires, pour ne citer que cet exemple, peut s'en trouver affectée.

L'utilisation des gammes millimétriques et submillimétriques est donc essentiellement envisagée pour des applications d'assez courte portée ; on peut penser aux radars pour l'automobile, par exemple [6]. Toutefois la maîtrise croissante des technologies d'émetteurs

dans les THz permet d'envisager pour ces gammes de fréquences des applications télécoms (Téléphonie 6G, Wi-Fi) en plus de celles déjà existantes : scanners corporels, imagerie ⁷.

7 J. Bourdet, « La révolution des ondes térahertz », <https://lejournel.cnrs.fr/articles/la-revolution-des-ondes-terahertz>, Journal du CNRS, février 2020.

Propagation en espace libre

La propagation dite en espace libre constitue un cas de référence pour l'établissement des bilans de liaisons radioélectriques. La notion de propagation « libre » s'oppose à celle de propagation « guidée » telle qu'on la rencontre dans les câbles coaxiaux ou les guides d'ondes. De façon plus formelle, une liaison en espace libre sous-entend que l'émetteur et le récepteur

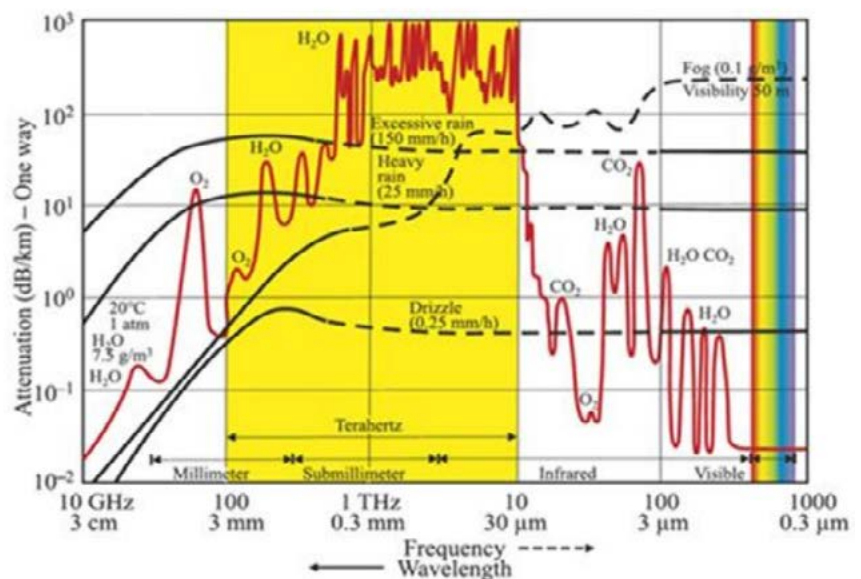


Figure 2 : Atténuation linéique (en dB/km) atmosphérique pour les fréquences allant de 10 GHz à 1000 THz. La courbe en rouge correspond à l'atténuation d'origine moléculaire et les courbes en noir à celles causées par les précipitations (pour différentes intensités de précipitation).

6 Cette forte atténuation peut présenter aussi quelques avantages. Ainsi la bande des 60 GHz où le pic d'absorption du dioxygène atteint 15 dB/km est utilisée pour des faisceaux hertziens courte portée qui sont naturellement « discrets ».

- sont isolés dans un espace équivalent au vide sur un plan électromagnétique. Pour une liaison radio quelconque, les pertes de propagation, P_p , exprimées en dB, représentent l'atténuation entre la puissance électromagnétique en sortie de l'antenne émettrice et celle en entrée d'antenne réceptrice. Dans le cas particulier d'une liaison supposée en espace libre, les pertes de propagation sont alors données par la relation :

$$P_{pEL} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

où d correspond à la distance sur laquelle s'est propagée l'onde (en général assez proche de la distance entre l'émetteur et le récepteur) et λ à la longueur d'onde.

La relation précédente traduit simplement le fait que la puissance reçue décroît, en espace libre, en $1/d^2$. Cette puissance reçue est généralement calculée par l'équation des télécommunications⁸ ; elle dépend de la puissance émise, du gain des antennes utilisées, des pertes diverses du système et des pertes de propagation. Même si la définition de l'espace libre semble très éloignée des conditions réelles de propagation, ces pertes d'espace libre donnent un ordre de grandeur des pertes réelles de propagation. Les modèles de propagation dont nous parlerons plus loin visent évidemment à tenir compte de la réalité des milieux de propagation. Une notion couramment utilisée est celle du facteur de propagation F_p ; exprimé en dB, il est tout simplement défini par :

$$F_p = P_{pEL} - P_p$$

Sa valeur est le plus souvent négative, une valeur positive signifiant que les pertes réelles sont inférieures à celles calculées en espace libre.

Pour ce qui est d'une configuration radar, et on n'envisagera ici que le cas d'un radar monostatique (émission et réception des échos de cible éventuels transitent par la même antenne), la puissance d'écho reçu décroît en $1/d^4$, puisqu'il faut combiner le trajet radar-cible et le trajet cible-radar.

⁸ Souvent appelée équation de Friis par les anglo-saxons.

“ La notion de propagation « libre » s'oppose à celle de propagation « guidée » telle qu'on la rencontre dans les câbles coaxiaux ou les guides d'ondes. ”

Résoudre les équations de propagation

Construire un modèle de propagation consiste à savoir résoudre les équations de propagation dans un environnement réel donné mais aussi à décrire cet environnement du point de vue de ses propriétés électromagnétiques avec une « finesse » qui soit en cohérence avec la précision recherchée et la gamme de fréquence considérée. Pour ne citer qu'un exemple, nous avons vu au paragraphe précédent que certains effets atmosphériques (atténuation moléculaire, pluie) étaient totalement négligeables pour des fréquences inférieures au GHz.

Si les modèles de propagation permettent en général le calcul des pertes de propagation en chaque point de l'espace, d'autres paramètres doivent parfois être estimés. Par exemple dans les situations où la propagation est caractérisée par de nombreux multitrajets (milieu urbain, intérieur des bâtiments,...) des paramètres tels que la réponse impulsionnelle du canal de propagation, l'étalement des retards ou bien la bande de cohérence (plage de fréquences sur laquelle la fonction de transfert du canal peut être considérée comme constante) sont importants pour la conception des systèmes de télécommunication.

Méthodes de référence

La méthode des différences finies dans le domaine temporel, ou FDTD si on utilise son acronyme anglo-saxon, résout les équations de Maxwell dans le domaine temporel. Le schéma numérique utilise des cellules tridimensionnelles et permet la prise en compte d'environne-

ments très variés. Elle présente toutefois des contraintes assez fortes en termes de stabilité, temps de calcul et mémoire nécessaire. Elle est principalement utilisée pour la modélisation des circuits hyperfréquences. On peut également l'employer pour des scénarios de propagation « indoor ».

Une autre méthode considérée comme rigoureuse est la méthode des moments ou MOM [7]. Elle est basée sur la résolution des équations intégrales surfaciques pour traiter des problèmes de diffraction, notamment lorsqu'il s'agit de surfaces rugueuses. Par exemple la question de l'interaction d'une onde électromagnétique avec une surface de mer est d'une grande importance qu'il s'agisse de traiter la détection de cibles navales ou bien d'observation des océans par des moyens de télédétection. La mise en œuvre numérique de la MOM requiert des inversions de matrice. Elle devient donc vite consommatrice de temps de calcul et d'espace mémoire.

Certains problèmes particuliers ont donné lieu à des solutions exactes, avec toutefois le défaut de faire appel à des « objets » mathématiques uniquement calculables par des moyens numériques. Nous pouvons citer **la diffraction de Sommerfeld** qui concerne la diffraction par un demi-plan infini ; on parle souvent d'obstacle « en lame de couteau » et ces résultats sont à la base de bien des calculs de bilan des liaisons hertziennes en présence de relief. Un autre exemple est **la diffusion de Mie** qui concerne l'interaction d'une onde avec une particule sphérique ; une application en est la modélisation des effets de pluie qu'il s'agisse de calculer l'atténuation qu'elle crée sur les liaisons radio ou bien les échos radar qu'elle est susceptible d'engendrer.

Les solutions rigoureuses évoquées ici, même si elles ne sont pas faciles à mettre en œuvre, fournissent des situations cano- niques de référence à partir desquelles on pourra évaluer des méthodes approchées mais nettement moins gourmandes en ressources informatiques. Le lecteur désireux de plus de détails pourra consulter les ouvrages généraux cités dans la biblio- graphie.

Une méthode approchée séduisante : l'équation parabolique

Comme nous le verrons un peu plus loin, l'atmosphère terrestre n'est pas équiva- lente à du vide pour la propagation des ondes, du moins dès que l'on considère des distances de propagation supérieures à quelques km. L'équation de Helmholtz, équation de propagation qui découle des équations de Maxwell est alors plus com- plexe à résoudre. Mais, il est possible avec quelques approximations d'aboutir à une équation aux dérivées partielles scalaire de type parabolique dont la résolution numérique fait appel soit à une méthode des différences finies soit à l'utilisation de transformées de Fourier (méthode dite « *Split Step Fourier* ») [8]. L'approximation la plus « forte » concerne l'hypothèse de paraxialité ; l'équation parabolique n'est valide que pour des directions de pro- pagation proches de l'horizontale (inclinai- son d'au plus 20 °). Avec une paramétri- sation mathématique plus élaborée, cette contrainte peut être desserrée et on passe d'une méthode dite « *narrow angle* » à une méthode « *wide angle* ».

La méthode de l'équation parabolique avait d'abord été développée pour le domaine acoustique. Elle a été trans- posée au domaine électromagnétique dans les années 70-80, profitant des performances sans cesse accrues des ordinateurs personnels. Naturellement adaptée au traitement du phénomène de réfraction atmosphérique, elle a pro- gressivement pris en compte les effets de diffraction y compris désormais pour des scénarios en 3 dimensions. Elle est donc tout à fait utilisable pour traiter des environnements urbains, mais son

Un modèle simple mais pas simpliste : le modèle à deux rayons

Ce modèle s'applique à des liaisons dont la géométrie est représentée ci-dessous : un émetteur situé à une altitude H1 et un récepteur à une altitude H2, les deux étant distants de d, le sol entre les deux étant vierge de tout obstacle. Dans ces conditions, il y a deux trajets possibles entre l'émetteur et le récepteur : un trajet direct (en rouge) et un trajet réfléchi sur le sol (en bleu). Ces deux trajets vont donc interférer (un exemple de figure d'interférence obtenue dans un environnement plus complexe est donné sur la Figure 3b).

A titre d'exercice « simple », on peut traiter cette configuration en multipliant les hypo- thèses simplificatrices. Si on suppose une Terre plate (non sphérique), un sol conduc- teur parfait (hypothèse assez proche de la réalité qu'il s'agisse d'un sol terrestre ou, mieux, d'une surface de mer), une atmosphère homogène équivalente au vide (ce qui revient à négliger la réfraction atmosphérique) et si on néglige l'effet de directivité des antennes, on obtient aisément les résultats suivants :

- Si λ désigne la longueur d'onde transmise, dans le plan vertical, à une distance d de l'émetteur, les maxima de puissance rayonnée sont séparés d'une hauteur égale à $\lambda d / 2H1$.
- Les maxima de puissance rayonnée correspondent à un facteur de propagation de 6 dB ; le champ direct et le champ réfléchi s'additionnent alors et la puissance est multipliée par quatre comparativement à l'espace libre.
- Lorsque les antennes sont très proches du sol, la puissance rayonnée décroît en $1/d^4$ et pas en $1/d^2$ comme en espace libre. Cette loi de décroissance est utilisée par certaines méthodes de localisation d'émetteurs.

Ces résultats fournissent de bons ordres de grandeurs de ce qui peut être observé en situations réelles. Les situations réelles peuvent être modélisées en complexifiant le modèle analytique (voir [3] par exemple) ou bien en utilisant les méthodes numériques évoquées dans cet article.

utilisation la plus intéressante concerne la propagation longue distance pour le calcul des couvertures radar, par exemple (Cf. figure 3b).

Méthodes asymptotiques

La plus connue et la plus implicite d'entre elles est sans doute l'optique

géométrique (OG). Elle revient à consi- dérer que le faisceau émis par une antenne est constitué d'une multitude de rayons dont on va suivre les trajec- toires et les interactions avec le milieu (voir l'encadré sur le modèle à deux rayons). C'est une méthode applicable aux hautes fréquences (donc à des longueurs d'onde faibles). Au cours de

... sa propagation le rayon peut subir des réfractions et des réflexions dont les propriétés sont décrites par les lois bien connues de Snell-Descartes. A l'interface entre deux milieux quelconques dont on connaît les caractéristiques électromagnétiques ⁹, les relations de continuité des champs permettent en outre de calculer les expressions des coefficients de réflexion et de transmission, coefficients connus sous le nom de coefficients de Fresnel ¹⁰. Dans le cas d'une surface rugueuse, ces coefficients de réflexion de Fresnel peuvent être modulés par un coefficient de réduction, inférieur à 1, pour tenir compte d'une réflexion diffuse et pas uniquement spéculaire.

L'OG prévoit un champ nul dans les zones d'ombre géométrique. Pour pallier ce défaut, la *théorie géométrique de la diffraction* (TGD) a été développée. Le coefficient de diffraction est exprimé dans les cas d'un rayon arrivant sur un dièdre, un cylindre, une sphère ou un cône. Ces expressions ne sont valables que si le point d'observation est suffisamment éloigné du point d'impact. Et on obtient une valeur infinie du champ diffracté aux frontières.

La *théorie uniforme de la diffraction* (TUD) a permis finalement d'éviter ces problèmes de discontinuités. TGD et TUD, via des méthodes de tracé de rayons notamment permettent de calculer le champ en tout point du domaine étudié. Ces méthodes sont employées pour le calcul des couvertures d'émetteurs dans des environnements urbains mais aussi à l'intérieur des bâtiments.

⁹ Les caractéristiques électromagnétiques des milieux les plus importantes sont la permittivité diélectrique et la conductivité (et éventuellement la perméabilité magnétique). Ces caractéristiques ne sont pas des constantes propres au milieu puisqu'elles dépendent également de la fréquence.

¹⁰ On retrouve avec ces expressions le fait que si une onde se réfléchit sur un sol assimilable à un conducteur parfait, il n'y a pas de champ transmis ; la réflexion est totale.

“ L'ionosphère peut également perturber les ondes qui la traversent avec des effets de scintillation, notamment, non négligeables jusqu'à des fréquences de 3 GHz... ”

Influence et modélisation du milieu de propagation

La réfraction troposphérique

L'atmosphère est loin d'être un milieu assimilable au vide pour la propagation des ondes hertziennes. Nous avons déjà évoqué plus haut l'atténuation moléculaire et l'effet des hydrométéores. Nous avons aussi mentionné le rôle joué par l'ionosphère susceptible de réfléchir les fréquences de la gamme HF et en deçà. L'ionosphère peut également perturber les ondes qui la traversent avec des effets de scintillation, notamment, non négligeables jusqu'à

des fréquences de 3 GHz ; ces perturbations affectent donc les systèmes de positionnement par satellites qui utilisent des fréquences globalement comprises entre 1,1 et 1,6 GHz.

Mais la troposphère terrestre, qui s'étend jusqu'à 10-12 km d'altitude, réserve elle aussi quelques surprises. Même si l'indice de réfraction γ est très proche de l'unité, comme dans le vide, ses variations ont des effets loin d'être anodins (voir l'encadré consacré à l'indice de réfraction de la troposphère). Le milieu n'étant pas homogène, les rayons, si on garde l'image de l'optique géométrique, ne se propagent

L'indice de réfraction de la troposphère

L'indice de réfraction de la troposphère, n , est effectivement très proche de 1. En moyenne, on a, au voisinage du sol :

$$n \approx 1,0003$$

Par commodité on utilise donc plutôt le co-indice de réfraction :

$N = 10^6 \cdot (n - 1)$, lequel co-indice dépend de la pression atmosphérique, de la température et de la pression partielle de vapeur d'eau.

Il est également très commode d'utiliser le co-indice modifié M . En un point d'altitude z , M et N sont reliés par :

$$M \approx N + 0,157z$$

La loi de Snell-Descartes pour la réfraction, appliquée à un milieu à géométrie sphérique, montre que c'est le gradient vertical d'indice qui est important pour la propagation. L'atmosphère standard qui représente le comportement moyen de l'atmosphère (au sens statistique du terme) est caractérisé par un gradient vertical de de $-39N/km$, soit $118M/km$. Il en résulte qu'une onde émise parallèlement au sol aura tendance à être réfractée vers le haut. Mais si ce gradient vertical devient inférieur à $-157N/km$ soit inférieur à $0M/km$, les rayons sont recourbés vers la surface de la Terre et se retrouvent « piégés » dans un *conduit atmosphérique* (que l'on peut comparer à un guide d'onde qui aurait des parois « invisibles »). Ces conduits existent de façon quasi systématique à la surface des océans où on parle de conduits d'évaporation. On peut aussi en observer à quelques centaines de mètres d'altitude avec des occurrences beaucoup plus élevées dans les régions « chaudes ».

Globalement la prévision du comportement de l'indice de réfraction de la troposphère s'appuie sur les modèles de prévision météorologique.

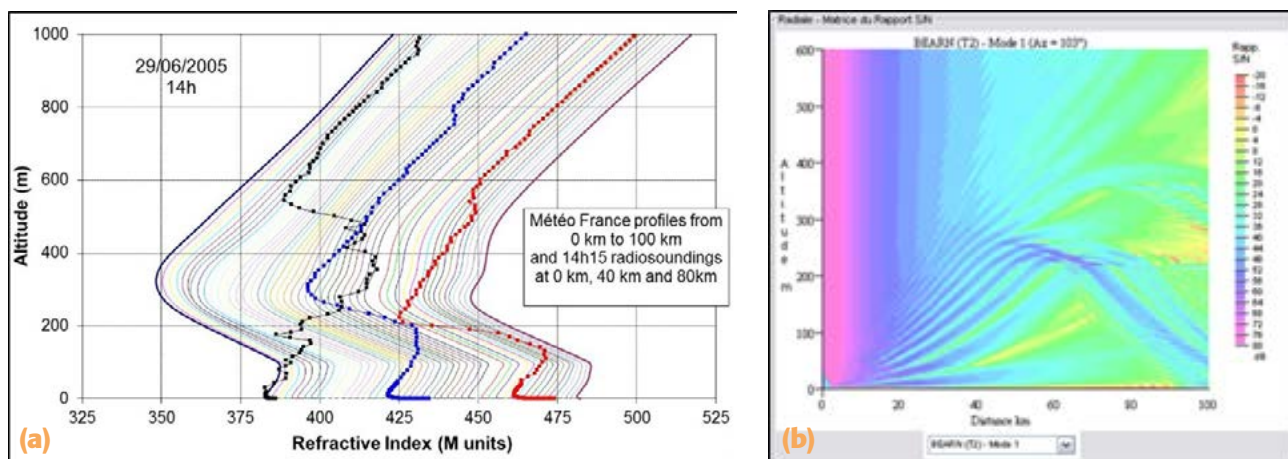


Figure 3 : Exemple de profils de co-indice de réfraction modifié prédits par le modèle AROME et mesurés par radiosondages lors de la campagne PREDEM 2005 (figure a) et rapport signal à bruit correspondant modélisé pour un radar fonctionnant en bande C (figure b).

pas en ligne droite. Ces effets de réfraction sont toutefois négligeables pour des liaisons de longueurs inférieures à quelques km. Ils sont d'autant plus notables que la fréquence de l'onde augmente. Les effets de propagation en présence de conduits atmosphériques sont assez surprenants :

- un accroissement de la portée des radars qui vont pouvoir détecter des cibles situées au-delà de l'horizon radioélectrique standard ;
- s'agissant d'émetteurs radio, l'accroissement de portée peut provoquer des brouillages entre ceux-ci.

Une illustration de ces effets de réfraction est donnée par la figure 3. Elle concerne des mesures faites en Méditerranée au large de l'île du Levant en 2005 dans le cadre de la validation du code PREDEM destiné, notamment, à la prédiction des couvertures radar [9]. Sur la figure 3a, sont superposés les profils de co-indice modifié mesurés par trois radiosondages et prédits par le modèle AROME de Météo France pour des distances allant jusqu'à 100 km de la côte. En plus du conduit d'évaporation à proximité de la surface, on observe un conduit plus élevé à quelques centaines de mètres d'altitude : environ à 500 m au niveau de l'île du Levant et plutôt 200 m d'altitude à 80 km au

“ En milieu urbain, les exigences en matière de résolution sont nettement plus sévères. On a parfois pu utiliser des modèles empiriques avec une description des villes ajustée à quelques paramètres statistiques. ”

large. Arome restitue bien les observations sauf pour le profil au niveau de l'île.

La figure 3b représente la variation avec l'altitude du rapport signal à bruit correspondant à cette situation météo pour un radar situé sur l'île à 35 m au-dessus du niveau de la mer et fonctionnant en bande C. La modélisation a été effectuée avec un algorithme mettant en œuvre la méthode de l'équation parabolique. L'effet du conduit élevé est nettement visible sur la figure d'interférence. Ces résultats de simulation ont été globalement bien validés par la poursuite radar d'une cible aérienne étalonnée qui a pu être détectée jusqu'à au moins 100 km de distance alors que pour la configuration choisie, l'horizon radioélectrique standard aurait été limité à une soixantaine de kilomètres.

En plus de la réfraction « moyenne » telle que nous venons de la décrire, il faut aussi s'intéresser aux fluctuations de petite échelle de l'indice. On parle

alors de turbulence atmosphérique dont les effets sont bien connus dans le domaine optique (la scintillation des étoiles, par exemple). Aux radiofréquences, les fluctuations d'amplitude constituent un élément important à considérer pour les liaisons satellites-Terre.

Le sol et les obstacles divers

Pour choisir l'implantation optimale des émetteurs de radiocommunications, qu'il s'agisse de radiodiffusion, télévision hertzienne¹¹ ou de téléphonie mobile, on couple depuis des décennies les codes de calcul de propagation avec les modèles numériques de terrain qui en donnent l'altimétrie ainsi que des in-

¹¹ On voudrait ici corriger une erreur classique de langage qui consiste à opposer les « anciennes » chaînes de télévision dites hertziennes aux plus récentes chaînes de la TNT. La propagation hertzienne n'interdit pas la transmission de signaux numériques ! La téléphonie mobile le prouve depuis longtemps désormais.

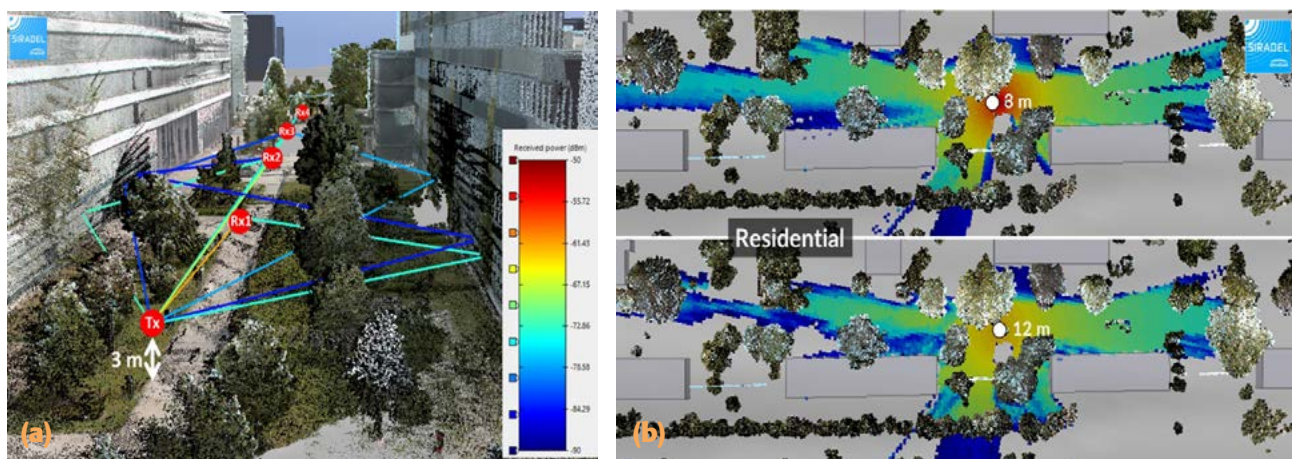


Figure 4 : Exemple de calculs de propagation en milieu urbain à 150 GHz : cas d'un canyon urbain sur la figure (a) et cas d'un environnement plus résidentiel sur la figure (b).

●●● indications sur le sursol (bâtiments, végétation) avec une résolution de quelques dizaines de mètres voire la dizaine de mètres seulement ; tout dépend de la précision recherchée. Ces modèles numériques de terrain ont été construits au fil des ans à partir des photographies aériennes ou des images radar.

En milieu urbain, les exigences en matière de résolution sont nettement plus sévères. On a parfois pu utiliser des modèles empiriques avec une description des villes ajustée à quelques paramètres statistiques. Avec l'utilisation accrue de la gamme millimétrique, cela ne suffit plus. Les opérateurs utilisent de plus en plus des représentations numériques des villes, obtenues à partir de mesures lidar pour calculer la couverture des relais installés. Les méthodes de tracé de rayons sont bien adaptées à ce type de calcul. La figure 4 - que nous devons à la société SIRADEL¹² - illustre des résultats obtenus à la fréquence de 150 GHz (cela reste du millimétrique même si on parle parfois aussi de sub THz). La figure 4a concerne un environnement de type canyon urbain où l'on peut visualiser les

différents trajets à prendre en compte et la figure 4b montre une cartographie du niveau de puissance reçue dans un environnement plus résidentiel pour deux hauteurs d'émetteurs, 8 mètres et 12 mètres.

Qu'il s'agisse des environnements urbains ou de situations dites « indoor », il devient nécessaire de mieux caractériser les propriétés électromagnétiques des matériaux à des fréquences jusqu'à peu ou pas utilisées en pratique. On s'intéresse aussi de plus en plus aux effets de masquage du corps humain sur les liaisons radio.

Quant à l'influence de la végétation sur la propagation des ondes radio, le sujet mériterait à lui seul un article entier. Une fois encore le degré de finesse dans la description du milieu dépendra de l'application étudiée : transmission à travers la végétation, détection d'une cible « masquée » par un couvert végétal, télédétection des propriétés d'un sol en présence de végétation, etc. Mais aussi (et surtout) de la fréquence de travail. Ainsi on pourra, suivant les cas, modéliser une forêt par : une couche diélectrique homogène, une double couche diélectrique : une pour les troncs et l'autre pour le feuillage, une distribution statistique d'arbres : chaque arbre étant lui-même constituée d'un tronc, d'une distribution statistique de branches et

L'auteur

Jacques CLAVERIE. Ancien élève de l'ENS Cachan, agrégé de physique appliquée et docteur en électronique, il est maître de conférences



à l'Académie militaire de St-Cyr Coëtquidan et membre de l'Institut d'électronique et des technologies du numérique (IETR). Ses activités de recherches concernent la propagation électromagnétique et notamment les couplages entre les modèles météorologiques et les modèles de propagation.

Jacques est administrateur de la SEE, secrétaire du groupe Ouest et membre du Comité de rédaction de la REE. Il est un des principaux animateurs des Journées d'études organisées par la SEE sur le thème de la propagation radiofréquence. Il est membre senior de la SEE et commandeur dans l'ordre des Palmes académiques.

d'une distribution de feuillage ; ce ne sont là que quelques exemples possibles de représentation.

12 Ces courbes proviennent de la référence suivante : Mohammed Aslam, Yoann Corre., « Simulated Propagation Properties for Future Outdoor sub-THz Networks ». ETTCOM 2020 Workshop on Enabling Technologies for Terahertz Communications (ETTCOM), août 2020, London, UK.

Conclusion

Comme nous venons de le voir, s'intéresser à la propagation des ondes radioélectriques est plus que jamais une nécessité pour imaginer les systèmes de radiocommunications ou de télédétection futurs. L'utilisation accrue des fréquences élevées du spectre va nécessiter une description électromagnétique de plus en plus fine de l'environnement (on peut aisément comprendre que les besoins en termes de résolution spatiale vont de pair avec la diminution des longueurs d'onde), qu'il

s'agisse de décrire l'atmosphère claire, la pluie, les bâtiments, la surface de mer, la végétation, etc.

L'optimisation des ressources spectrales et la minimisation des risques de brouillage requièrent également une grande précision dans l'utilisation des modèles.

Pourra-t-on toujours compter sur les progrès en matière de résolution numérique des équations de propagation ou de stockage numérique des données d'environnement ? quels apports

peut-on attendre des outils de l'intelligence artificielle ?

Autant de challenges qui, comme depuis plus d'un siècle, vont nécessiter que travaillent ensemble des scientifiques issus de champs disciplinaires complémentaires : électromagnétisme, capteurs et antennes, physique de l'atmosphère, physique des matériaux, analyse numérique, intelligence artificielle sans pour autant négliger les enjeux sociétaux et la question très sensible de l'impact réel des ondes électromagnétiques sur les organismes vivants. ■

Résumé

Depuis plus d'un siècle les télécommunications sans fil et les systèmes de télédétection ont, petit à petit, directement ou indirectement, pénétré dans nos vies quotidiennes. Pour concevoir de tels systèmes dont le point commun est d'utiliser la propagation d'ondes électromagnétiques, pour en optimiser les performances, pour les faire cohabiter sans risque de brouillage, plusieurs questions doivent être abordées : la résolution des équations de propagation via des techniques numériques rendues possibles grâce à l'accroissement des puissances de calcul, la description « physique » des milieux dans lesquels l'onde se propage ou qui vont influencer sa trajectoire : l'atmosphère, la surface des sols, la végétation, les constructions humaines, etc. Le présent article présente un tour d'horizon de ces thématiques après un rappel de quelques données fondamentales. La bibliographie sélectionnée est certes succincte, mais avec une majorité de références en français, elle permettra aux lecteurs les plus passionnés d'approfondir les notions évoquées ici. ■

Abstract

For more than a century, wireless telecommunications and remote sensing systems have gradually, directly or indirectly, penetrated our daily lives. To design such systems whose common point is to use the propagation of electromagnetic waves, to optimize their performance, to make them cohabit without risk of interference, several questions must be addressed: the resolution of the propagation equations via techniques made possible thanks to the increase in computing power, the «physical» description of the environments in which the wave propagates or which will influence its trajectory: the atmosphere, surface of the ground, vegetation, human constructions, etc. This article presents an overview of these themes after a reminder of some fundamental data. The selected bibliography is certainly brief, but with a majority of references in French; it will allow the most passionate readers to deepen the notions mentioned here. ■

Références

- [1] J. Lavergnat et M. Sylvain, « *Propagation des ondes radioélectriques – Introduction* », 256p, Masson, 1997.
- [2] Y. Blanchard, « *Le radar - 1904-2004 - Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles* », 428p, Ellipses, 2004.
- [3] L. Boithias, « *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre* », 328p, Dunod, 1983.
- [4] J. Deygout, « *Données fondamentales de la propagation radioélectrique* », 192p, Eyrolles, 1994.
- [5] Recommandation UIT-R V.431-8, « *Nomenclature des bandes de fréquences et de longueurs d'onde employées en télécommunication* », 2015.
- [6] M. Leconte, « *Evolution des radars pour les véhicules automobiles* », REE, N°2020-4, pp 46-53, 2020.
- [7] C. Bourlier, « *Radar Propagation and Scattering in a Complex Maritime Environment: Modeling and Simulation from MatLab* », Ed. ISTE Press, 312 pages, 2018.
- [8] M. Levy, « *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation* », 352p, IEE Electromagnetic waves series, 2000.
- [9] Y.Hurtaud, J. Clavier, E. Mandine et M. Aidonidis, « *Une préfiguration des aides tactiques : le code PREDEM* », REE, Février 2008, pp31-41.