

TRANSMISSION D'ÉNERGIE À DISTANCE

Méthodes et applications
aux couplages
électromagnétiques
multidimensionnels

Arnaud Guéna

Chapitre 1- Prérequis et notions fondamentales pour la résolution électromagnétique

I. Comprendre et appliquer les méthodes de résolution électromagnétique

Dans l'objectif de présenter l'étude du domaine de la transmission d'énergie à distance, ce premier chapitre décrit les notions fondamentales de la résolution des champs électromagnétiques. Il offre aux lecteurs, aux lectrices une vue d'ensemble de ces problématiques et de la modélisation électromagnétique associée. Le but recherché de ce chapitre est de couvrir l'ensemble des configurations technologiques d'une transmission d'énergie électromagnétique.

Pour chaque configuration, il est important de s'appuyer sur des règles simples de résolution afin de mieux orienter la modélisation et la résolution associées à des mécanismes physiques complexes. C'est dans ce sens qu'il est possible de présenter les méthodes de résolution sur lesquelles s'appuient ces outils d'ingénierie. Ceux-ci introduisent la notion de simulation électromagnétique. On traduit le terme simulation par la résolution d'une configuration physique donnée dont les paramètres d'entrée sont connus et caractérisés par la géométrie de la structure, les propriétés physiques de la matière. Celle-ci s'appuie donc sur la théorie électromagnétique des champs selon des méthodes de résolution temporelle ou fréquentielle. C'est pourquoi il est indispensable de rappeler les notions fondamentales en les replaçant dans un contexte physique donné. Ainsi, il est plus facile d'appréhender toutes les hypothèses, les phénomènes physiques, les grandeurs observables.

Ce chapitre se focalise sur certaines notions comme l'impédance d'onde utile pour différencier les domaines de résolution : champ proche-champ lointain, phénomène de propagation distinct de l'évanescence des ondes, vecteur de Poynting, coefficients de Fresnel...

Ceux-ci sont à maîtriser afin de mettre en œuvre les méthodes de résolution ultérieure dans le domaine de la transmission d'énergie.

Pour mieux appréhender notre démarche, donnons un exemple actuel de transmission d'énergie. Considérons le sujet émergent de l'internet des objets, celui-ci requiert l'analyse électromagnétique des antennes, les valeurs des fréquences d'émission-réception, et les modèles électromagnétiques associés au couplage sur l'homme pour l'étude du débit d'absorption spécifique : DAS. Ce sujet requiert des connaissances dans les modes de couplages radiofréquences avec les tissus biologiques. L'utilisation des

technologies sans contact de type étiquettes RFID comme Radio Frequency Identification, technologie Bluetooth s'est multipliée dans notre quotidien.

Dans le cadre de cet ouvrage, nous allons tout d'abord rappeler l'étendue du spectre des ondes électromagnétiques ou encore nommé spectre de radiofréquence d'émission/réception. Certaines notions requièrent des approfondissements ou compléments, c'est pourquoi des ouvrages sont référencés en bibliographie.

1. Le spectre électromagnétique et quelques exemples d'application

Pour appréhender la diversité de toutes les configurations électromagnétiques du domaine de la transmission d'énergie électromagnétique, commençons par présenter l'étendue du spectre électromagnétique. Celui-ci obéit à des règles de nommage explicite, à savoir la distinction des différentes bandes de fréquences. L'utilisation du spectre est régie par des lois nationales et internationales promulguées par des organismes dédiés, à savoir l'ANFR : Agence Nationale des Fréquences, et l'UIT : Union Internationales des Télécommunications

<https://www.anfr.fr/fileadmin/medias/institutionnel/ANFR-spectre-frequences-juin-2020.pdf>).

Ces deux organismes identifient l'occupation du spectre électromagnétique constitué des bandes de fréquence disponibles ou non pour les futures applications technologiques. L'ensemble du spectre électromagnétique s'étend aux fréquences de quelques Hertz, à plusieurs centaines de Gigahertz. Dans le cadre de l'étude de la transmission d'énergie à distance, certaines bandes de fréquence sont à analyser, par exemple celles des technologies sans contact. Concentrons-nous sur les bandes RFID, et plus hautes fréquences comme la 5G. Beaucoup d'articles de presse présentent le déploiement dans le début des années 2020 du réseau 5G et l'achat par les opérateurs de télécommunication des bandes de fréquences (inférieures à 100 MHz) dans la bande [3,4 : 3,8] (GHz) (voir tableau I-1). Celle-ci doit amorcer l'émergence de nombreux outils numériques plus performants et tend progressivement vers une révolution numérique à venir pour nos sociétés.

La figure I-1 présente une synthèse de l'organisation du spectre électromagnétique que nous avons choisi pour notre démarche d'analyse. On y associe aux bandes de fréquence d'intérêt les parties susceptibles d'avoir des applications aux transmissions d'énergie à distance afin de parcourir les caractéristiques de longueur d'onde associées.

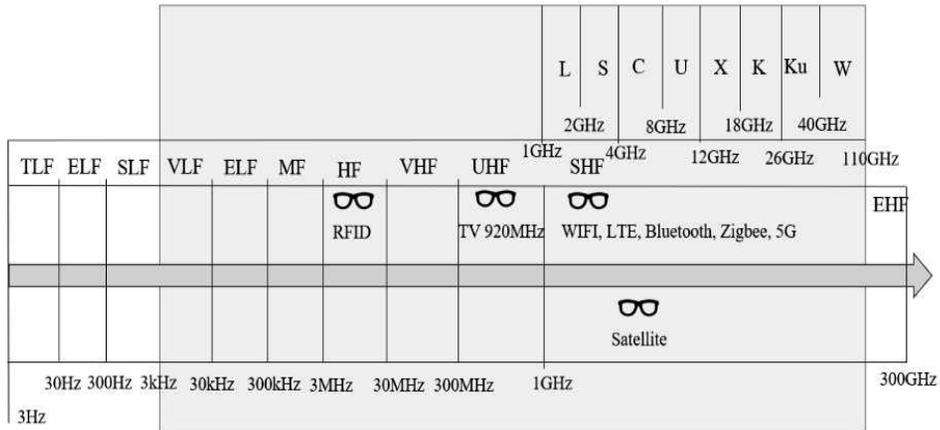


Figure I-1 : spectre électromagnétique avec les applications de la transmission d'énergie à distance

Avec la diffusion de nouveaux dispositifs sans contact, un cadre normatif précis promulgué par des comités européens de normalisation est nécessaire, on peut citer CENELEC : comité européen de normalisation en électronique et électrotechnique, CISPR : ce dernier se préoccupe des niveaux d'émission maximum de chaque technologie qui s'intègre dans le comité international sur la protection des rayonnements non ionisants (ICNIRP, 1998). Avec l'émergence de la notion d'interopérabilité, cet axe est devenu majeur pour la conception des systèmes industriels civils et militaires. La multiplication des réseaux de téléphones mobiles génère donc une augmentation des sources électromagnétiques dans une large bande de fréquence. Ainsi, l'évolution technologique tend vers la cohabitation de tous les protocoles de communication du réseau GSM au réseau internet.

Donnons un exemple sur la conception future d'autoroutes de transport entièrement automatisées et équipées de nouveaux systèmes de gestion basés sur le système global GPS (figure I-2). En effet, de plus en plus de modes de communication sont adoptés pour la gestion des trafics autoroutiers aux applications télématiques. D'autre part, les véhicules automobiles deviennent des dispositifs communicants qui nécessitent de multiples tests expérimentaux de validation pour garantir leur fiabilité. En effet, le fonctionnement d'une automobile requiert beaucoup plus de fonctions électroniques qui améliorent ainsi leur autonomie par l'économie d'énergie, et aussi par des systèmes d'aide à la conduite. Toutes ces fonctions se structurent selon une technique de multiplexage pour garantir la communication entre les calculateurs embarqués du réseau de bord ; actuellement les véhicules sont constitués d'une vingtaine de calculateurs.

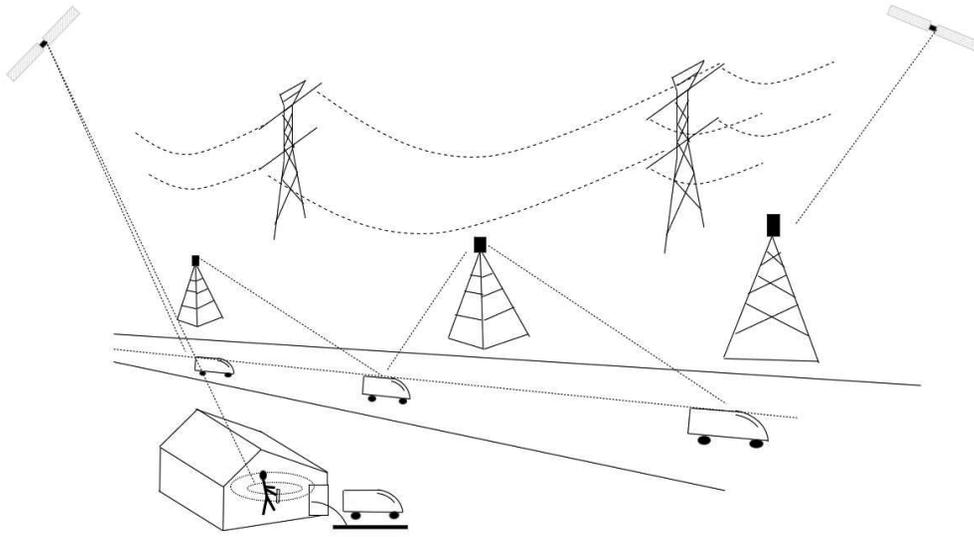


Figure I-2 : architecture des réseaux de télécommunication et d'alimentation terrestre

Par ailleurs, le développement croissant des véhicules électriques et l'interaction des différents réseaux de communication et d'énergie nous conduit à repenser en totalité les moyens d'énergie au plus près des utilisateurs selon des réseaux de gestions intelligentes nommées « maillage intelligent ». L'automatisation des grands axes de transports de nos futures autoroutes peut s'envisager selon des modes de convois de véhicules communicants (protocole V2V de véhicule à véhicule, ou V2I de véhicule à l'infrastructure) et améliore la gestion des flux de transport à grande échelle. En complément, ces véhicules électriques communicants requièrent de plus en plus de moyens de recharges rapides et efficaces en remplacement des anciennes technologies, cet axe de recherche doit amener à de nouvelles technologies dans le domaine du génie électrique.

Notre second exemple d'application présente la transmission électromagnétique longue distance qui se fait soit par des constellations de satellites, soit par des structures filaires conductrices dites : onde basse fréquence. Ces deux exemples encadrent le vaste champ d'application du spectre électromagnétique du domaine de la basse fréquence SLF, au domaine des hyperfréquences SHF. On comprend alors que les ondes électromagnétiques couvrent toutes les dimensions de notre globe terrestre (figure I-3). Cette figure illustre bien les deux types d'applications des communications électromagnétiques en s'appuyant sur une représentation très simplifiée d'une vue de coupe de notre globe terrestre ; on peut y voir un satellite situé en orbite basse (altitude proche de 300 km) qui émet en direction de la Terre, l'onde émise doit traverser les couches atmosphériques successives des plus hautes au plus basses dont certaines peuvent être ionisées et ainsi engendrées des phénomènes de réflexion dits ionosphériques. Les calculs de transmission d'onde à travers les couches ionosphériques requièrent d'introduire des notions dites de bande passante. Cette onde reçue sur Terre

peut alors être soit traitée, soit réémise et ainsi se propager dans le réseau internet par exemple. D'autre part, des stations d'émission/réception dites radio-amateurs peuvent aussi émettre des ondes qui couvrent à leur tour de grandes distances pour être reçues sur d'autres continents. On retrouve ainsi les notions de réflexion et de polarisation d'onde qui y sont associées à chaque type d'émission.

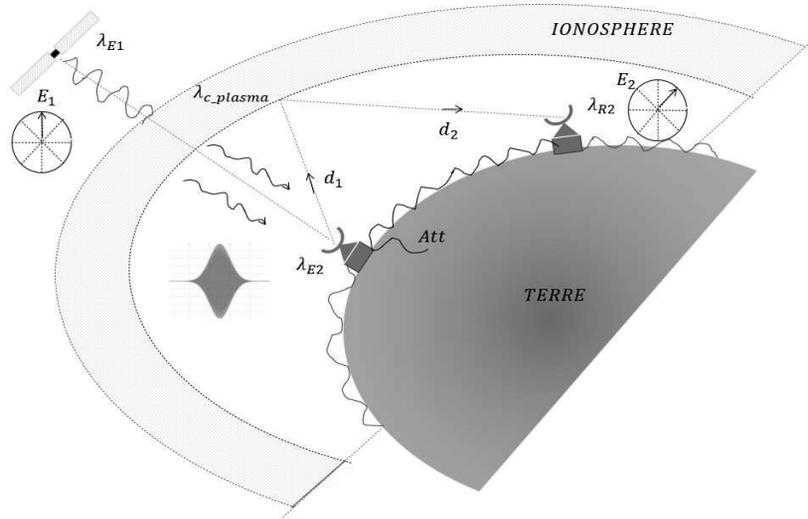


Figure I-3 : schéma de la propagation d'onde dans les domaines spatiaux et terrestres

Cette illustration montre que les conditions de propagation sur Terre peuvent varier selon les bandes d'émission du spectre électromagnétique. On rappelle que l'onde électromagnétique se définit par une direction de propagation portée par le nombre d'ondes \vec{k} (notion vectorielle) perpendiculaires à la direction de vibration du champ électrique et magnétique.

Les ondes acoustiques quant à elles se définissent par une direction de propagation dite d'ébranlement longitudinale dans le même plan de vibration. C'est le champ électrique qui nous donne les principaux types de polarisation horizontale (émission TNT), perpendiculaire, et circulaire, elliptique (gauche ou droite). Pour les basses fréquences, les propriétés intrinsèques du milieu physique définies par les constantes diélectrique et magnétique déterminent les distances d'élongation possibles selon les conditions de propagation directe (LOS), et les propagations indirectes (NLOS) selon l'ellipsoïde de Fresnel. Il est important de considérer les fréquences de coupure de chaque couche, en particulier celle de la couche ionosphérique pour laquelle il est possible de calculer la fréquence de coupure (voir exercice II-2).

Au-dessus des fréquences de coupure, les niveaux d'atténuation sont plus faibles, tandis qu'au-dessous de cette fréquence, il existe une profondeur de peau, une réflexion parfaite qui est observée : on peut ainsi appliquer la méthode des images. Cette méthode est utilisée pour l'analyse des conducteurs au-dessus d'un plan de masse et permet de réduire la complexité d'analyse pour des réseaux multiconducteurs. Si on s'intéresse à la configuration d'un fil conducteur émettant une onde électromagnétique au-dessus

d'un plan de sol ; la méthode des images suppose que le fil au-dessus d'un plan de masse parfaitement conducteur est équivalent à deux fils (fil source) et un fil image parcouru par deux courants en opposition de phase et situés à deux fois la hauteur du fil source par rapport au plan miroir. On peut donc calculer les niveaux de champ émis ou reçu par un fil d'antenne en supposant que cette méthode d'analyse est universelle.

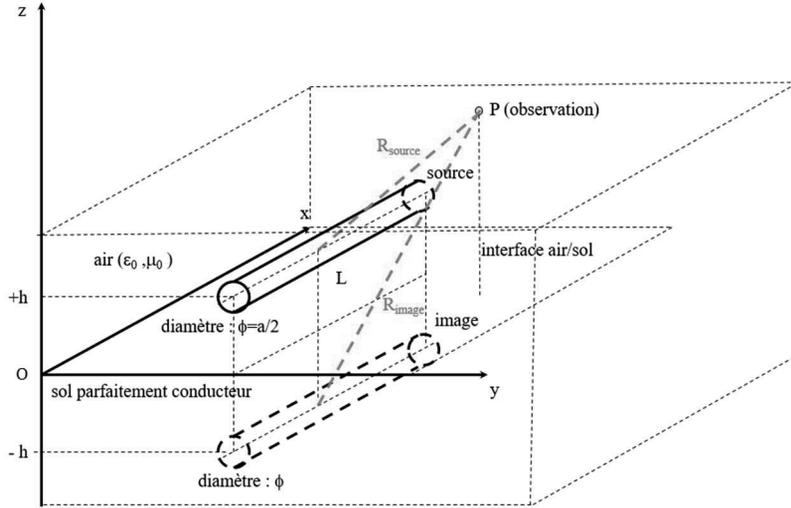


Figure I-4 : schéma de la méthode des images appliquées à un conducteur cylindrique pour tout type de rayonnement

Les seules limites à considérer dans cette approche analytique du conducteur filaire au-dessus du plan miroir sont les conditions de validité de la réflexion de l'onde. Au début du XX^e siècle, de nombreux travaux précurseurs portés par des noms comme Sommerfeld, Norton, Van Der Pol... ont étudié la propagation électromagnétique à l'interface air/sol, ce domaine est devenu un domaine spécifique des « ondes de sol ». Ce sujet scientifique se situe dans la continuité des travaux sur les modes de propagation des ondes électromagnétiques pour l'étude des réflexions ionosphériques. Sommerfeld, Carson, Sunde, Vance furent les pionniers pour leurs travaux qui permirent de modéliser les interactions de l'onde électromagnétique avec un sol réel diélectrique au moyen des deux intégrales selon les deux modes de polarisation de l'onde ; pour la polarisation verticale, nous avons l'expression pour le potentiel de Hertz : (Dorado, 2007), (Degauque, 2007), (Sevgi, 2002), (Tesche, 1997), (Vance, 1978), (Jordan, 1968), (Norton, 1937).

$$V_{Sommerfeld} = \int_0^{+\infty} \frac{2}{l + u_p^2 m} \cdot J_0(\lambda \cdot r) \cdot e^{-(h+z) \cdot L_l} \cdot \lambda \cdot d\lambda \quad (I-1)$$

$$\text{Avec } l^2 = \lambda^2 - k^2, m^2 = \lambda^2 - k_{sol}^2, \text{ et } u_p = k/k_{sol} \quad (I-2)$$

Et $u_p = 1$ pour la polarisation horizontale

Ces intégrales prennent en compte l'effet des courants de conduction et de déplacement générés à l'interface air/sol. En 1937, Norton proposa de modéliser la propagation en introduisant des ondes de sol ce qui a été mis aussi en évidence par Zenneck en 1907 (Leipzig). Le potentiel de Hertz s'exprime pour la polarisation verticale :

$$II_Z^V = \frac{e^{jk.R_{source}}}{R_{source}} - \frac{e^{jk.R_{image}}}{R_{image}} + V_{Sommerfeld} \quad (I-3)$$

Les deux premiers termes de ces équations correspondent aux expressions du champ pour un sol parfait. Le troisième terme considère les pertes du sol (conducteur et diélectrique). J.R. Wait (1950-1970) apporta des contributions significatives dans ce domaine pour consolider le socle théorique de la modélisation des ondes de sol dite : « onde Zenneck ». Ces travaux se poursuivirent par Bridge à l'Université du Canada (1990) (Bridges, 1992). L'étude de ce domaine qui intègre les pertes diélectriques du sol conducteur nécessite de construire le diagramme de dispersion de rétrodiffusion d'un conducteur cylindrique selon la variable fréquentielle k_x utilisée pour décrire la répartition des modes normaux générés par le couplage d'un fil conducteur au-dessus d'un plan de sol diélectrique. Nous rappelons les deux paramètres fondamentaux, à savoir en introduisant la notion de conductivité de sol :

$$k_{air} = \sqrt{\omega^2 \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_0} \quad (I-4)$$

$$k_{sol} = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot (\sigma_{sol} + j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r)} \quad (I-5)$$

Un diagramme de dispersion peut alors être construit pour montrer la répartition des modes d'émission générés par un conducteur cylindriques au-dessus d'un plan de sol. On distingue clairement « la coupure dans le plan complexe » donnée par le réel :

$(k_x/k_{air}) = 1$.

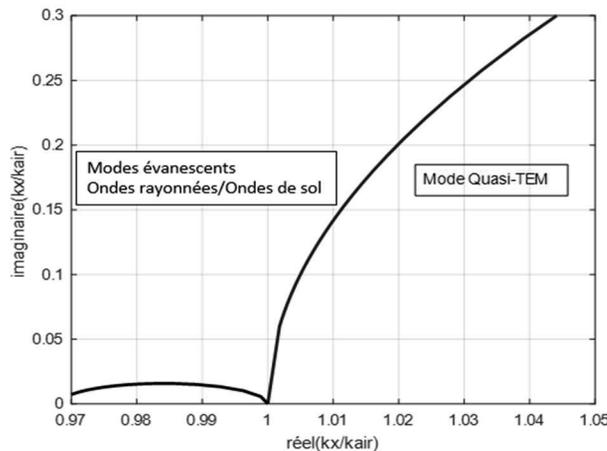


Figure I-5 : répartition des modes d'émission de conducteur cylindrique au-dessus du sol

- $k_x/k_{\text{air}} > 1$: cette condition correspond au cas classique de propagation avec $v < c$ pour des modes quasi-TEM. La rétrodiffusion se fait en empruntant le chemin inverse du champ incident.
- $k_x/k_{\text{air}} < 1$: cette condition correspond à une vitesse apparente supérieure à la vitesse de la lumière, il y a apparition d'ondes évanescentes liées à l'interface air/sol, ces ondes sont guidées par le sol.

2. Discussion des évolutions technologiques

Ce paragraphe regroupe plusieurs applications liées aux transmissions d'onde électromagnétiques rencontrées dans notre quotidien. Ces modes de transmission peuvent cohabiter dans un même environnement proche ou lointain. On rappelle que plus les longueurs d'onde sont courtes, plus le phénomène d'atténuation devient élevé, ce qui peut être le cas pour des ondes aux fréquences micro-ondes proches de quelques centimètres, tandis que les ondes hectométriques sont très faiblement atténuées, on parle plutôt d'une analyse quasi-statique des champs électromagnétiques. C'est la raison pour laquelle les concepts électriques à constantes localisées sont adaptés à ce type d'analyse. L'une des premières applications grand public est l'utilisation des étiquettes RFID couramment utilisés dans les domaines de la logistique, et du commerce. La mise en œuvre de cette technologie RFID est apparue dans les années 1990. Elles reposent principalement sur le couplage inductif à courte distance. Leurs modes de fonctionnement se fait en basse fréquence autour de la dizaine de Kilohertz, jusqu'au Mégahertz. À contrario, les applications dite Bluetooth (BLE) sont quant à elle plus haute fréquence, autour de 2,4 GHz. Elles sont utilisées dans les kits mains libres, les écouteurs, ...

Ces deux types d'application de couplages électromagnétiques sont répartis selon le spectre électromagnétique à deux fréquences différentes, ce sont deux applications dites sans contact. Il est important de repositionner chaque source dite de rayonnement électromagnétique en fonction de sa fréquence et de sa puissance d'émission. Dans ce cas, on observe une montée en fréquence du réseau GSM pour Global System for Mobile Communication ; les protocoles 4G, 5G présentent des intérêts avec une augmentation significative du débit pour le traitement de gros volume de données. Dans l'ouvrage de D. Paret, il est aussi décrit l'exemple de véhicules communicants avec l'utilisation de plusieurs 100 Go à l'intérieur du véhicule (Paret, 2019). La contrepartie à cette augmentation des débits de liaison sans fils est de maintenir des portées suffisantes sans dégrader la propagation des signaux. Cette étape technologique nécessite la caractérisation du canal de propagation et la mise en œuvre de technologie de diversité pour réduire les problématiques d'évanouissement liées aux multi-trajets.

Un autre axe d'amélioration est aussi la mise au point de nouvelles technologies d'antenne magnétique pour l'amélioration considérable de la réception. On peut aussi rappeler que ce sont les turbo-codes dans le traitement des signaux fortement bruités qui a permis de faire des avancées majeures dans le domaine des télécommunications. Au cours de l'année 2022, le réseau 5G a émergé progressivement en Europe conjugué, au