

CHAPITRE I

LES LIAISONS HERTZIENNES

1. Notions générales

1.1. Un peu d'histoire

Descartes affirmait que le langage est le propre de l'homme, hors le langage, c'est la communication ! La communication à distance, c'est à dire la transmission à distance de l'information, a toujours été une préoccupation humaine importante. Primitivement, les premiers moyens de communication à distance étaient des signaux de fumée, ou des tam-tam. Plus tard, dans l'Antiquité, avec l'invention de l'écriture, des messagers pouvaient transporter à pied ou à cheval des messages écrits. La vitesse de transmission de l'information était bien plus lente qu'aujourd'hui. Vers 1800, le télégraphe Chappe permettait de transmettre des messages en utilisant des signaux optiques à l'aide de sémaphores. Un réseau de tours espacées de 10 à 30 km permettait de répéter les signaux. Il fallait environ six heures pour transmettre un message de Paris à Lille. En 1832, Samuel Morse invente le télégraphe. C'est le premier système de transmission utilisant des signaux électriques se propageant sur une ligne. On transmet sur la ligne une suite d'impulsions brèves ou longues pour créer des symboles (lettres de l'alphabet). Cette grande invention nécessitait cependant un support physique (une ligne électrique) entre l'émetteur et le récepteur. A la fin du XIX^e siècle, les physiciens mettent en évidence les ondes électromagnétiques : en 1864, Maxwell établit les équations qui prouvent l'existence des ondes électromagnétiques, mais cela reste purement théorique. Plus de vingt ans après, Hertz met en évidence expérimentalement les théories de Maxwell, mais les ondes auxquelles il donne son nom (les ondes hertziennes) restent encore pour beaucoup une curiosité de laboratoire. En 1895, Guglielmo Marconi, un physicien italien réalise la première transmission radio sur une distance de 1,5 km. Six ans après, il réalise la première liaison transatlantique sans fil entre les Cornouailles (Angleterre) et Terre-Neuve (Canada). Au cours du XX^e siècle, les progrès sont spectaculaires avec le développement de la radiodiffusion, de la télévision, de la téléphonie mobile. En 2012, en France, il y a 72 millions de cartes SIM (donc d'abonnés au téléphone mobile) en circulation pour 65 millions d'habitants ! Notre époque est celle des télécommunications !

1.2. Intérêt des liaisons hertziennes

1.2.1 Les supports de transmission

Dans les télécommunications, on distingue trois grandes familles de supports de transmission de l'information :

- les liaisons filaires (ou lignes de transmission),
- les liaisons hertziennes,
- les liaisons optiques.

Il existe deux types de liaisons optiques :

- les liaisons optiques guidées comme les liaisons par fibre optique,
- les liaisons optiques en espace libre, comme par exemple : la liaison infrarouge entre une télécommande et un téléviseur.

1.2.2 Intérêts et inconvénients

L'intérêt principal des liaisons hertziennes et qu'elles ne nécessitent aucun support physique entre l'émetteur et le récepteur de l'information. Elles sont donc le moyen de communication idéal pour les liaisons avec les objets mobiles : piétons, automobiles, bateaux, trains, avions, fusées, satellites, etc..

Les liaisons hertziennes sont intéressantes dans le cas de la diffusion (radio diffusion et télédiffusion), où un seul émetteur transmet la même information à plusieurs récepteurs. En effet, pour couvrir une ville, il est plus simple et moins cher d'installer un émetteur et une antenne chez chaque particulier, plutôt que de relier par câble chaque particulier !

Les inconvénients principaux des liaisons hertziennes (par rapport aux autres supports) sont aussi liés à l'absence de support physique :

Comment faire pour que tout le monde puisse communiquer en même temps ?

Ce problème n'existe pas avec une liaison filaire : chacun son câble ! Dans le cas des liaisons hertziennes, ceci impose une gestion stricte des fréquences : Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée.

Comment garantir la confidentialité de transmission entre l'émetteur et le récepteur ?

N'importe quel «espion» peut intercepter une communication puisque l'information est transmise en «espace libre». Cet inconvénient peut être corrigé en effectuant un cryptage de l'information entre l'émetteur et le récepteur.

1.2.3 Les systèmes utilisant les liaisons hertziennes

Voici quelques exemples de systèmes utilisant les liaisons hertziennes, la liste qui suit n'est, bien sûr, pas exhaustive.

- la radiodiffusion (en modulation d'amplitude ou de fréquence),
- la télédiffusion (analogique ou numérique, terrestre ou par satellite),
- les radiocommunications : talkie-walkie, CB, liaison VHF pour avions ou bateaux, les faisceaux hertziens,
- la téléphonie : téléphone DECT (réseau de téléphones sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise), téléphone mobile,
- Internet : liaison Wi-Fi (réseau Internet sans fil à l'intérieur d'une maison ou d'une petite entreprise).

1.3. La propagation des ondes électromagnétiques

1.3.1 Rappel sur les ondes électromagnétiques

Dans une liaison hertzienne, c'est une onde électromagnétique qui « porte » l'information à transmettre.

Une onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique \vec{E} et d'un champ magnétique \vec{H} , couplés entre eux : les deux champs sont perpendiculaires l'un à l'autre, leurs amplitudes sont en rapport constant et leurs variations sont en phase. L'onde se propage à la vitesse de la lumière.

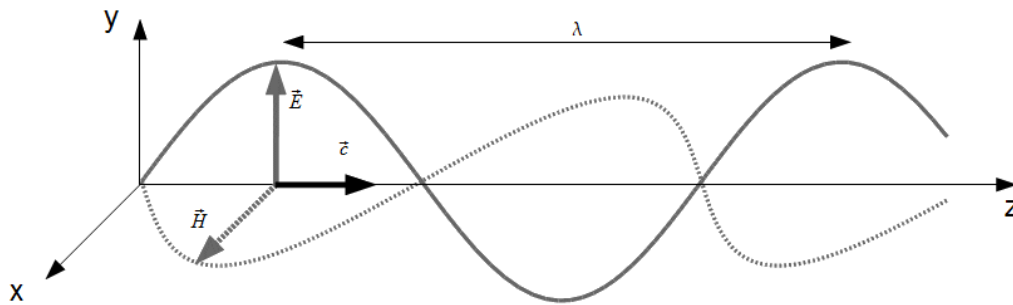


Figure I.1 : Propagation d'une onde électromagnétique

1.3.2 Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Les caractéristiques principales d'une onde électromagnétique sont :

La polarisation : c'est l'orientation du champ électrique par rapport à l'horizontale. Si le champ \vec{E} est parallèle à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation horizontale. Si le champ \vec{E} est perpendiculaire à l'horizontale, on dit que l'onde a une polarisation verticale. Dans le cas général où l'angle du champ \vec{E} est quelconque, on a alors une composante horizontale et une composante verticale.

Certaines antennes génèrent des ondes qui ont une polarisation circulaire ou elliptique : la polarisation varie au cours de la propagation. Cette notion sera revue plus loin, lors de l'étude des antennes.

La vitesse de propagation : dans le vide, une onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière $c = 3.10^8$ m/s.

La fréquence : en un point donné, c'est le nombre de maxima de champ par seconde. Elle est égale à la fréquence du générateur qui a donné naissance à l'onde. L'unité est le Hertz. On la note f .

La longueur d'onde : c'est la distance entre deux maximums consécutifs, mais c'est aussi la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'une période. On la note λ .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{ou} \quad \lambda = c \cdot T$$

avec λ : longueur d'onde (en m), c : vitesse de la lumière = 3.10^8 m/s, f : fréquence (en Hz) et T : période (en s).

Exercice 1.1

Q.1) Pour une onde polarisée horizontalement, indiquer l'orientation du champ magnétique \vec{H} .

France Inter émet en grandes ondes à la fréquence de 162 kHz depuis l'émetteur d'Allouis (Cher). La puissance est de 2000 kW (1000 kW la nuit).

Q.2) Déterminer la longueur d'onde de l'onde émise par l'émetteur de France Inter.

1.4. Comment transmettre par liaison hertzienne?

L'information à transmettre est généralement un signal «basse fréquence» : voix, musique, signal vidéo, informations numériques. Le canal hertzien a une atténuation qui varie fortement avec la fréquence, sa bande passante est forcément réduite. Pour transmettre correctement un message par voie hertzienne, il est nécessaire que la bande de fréquence occupée par le signal soit faible devant la fréquence du signal émis.

Exercice 1.2

Dans le tableau suivant, on a indiqué, pour différents systèmes de radiocommunication, les fréquences porteuses (valeur typique) et la bande passante occupée par le signal à transmettre.

Q.1) A partir des remarques précédentes, justifier les résultats présentés dans le tableau.

Q.2) Calculer, dans chaque cas, le rapport bande passante/fréquence porteuse.

Système de radiodiffusion	Fréquence porteuse	Information transmise	Bande de fréquence occupée
Radio en modulation d'amplitude grandes ondes	150 kHz	Audio (filtré)	100 Hz – 3 kHz
Radio en modulation de fréquence (stéréo)	100 MHz	Audio	10 Hz – 32 kHz
Télévision analogique terrestre	500 MHz	Vidéo	50 Hz à 6 MHz

Pour transmettre correctement un signal par liaison hertzienne, il faut « accrocher » le signal basse fréquence à transmettre à une onde haute fréquence appelée porteuse. C'est l'opération de modulation.

1.5. Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques sont classées en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde. Le spectre électromagnétique s'étend des rayons γ jusqu'aux très basses fréquences.

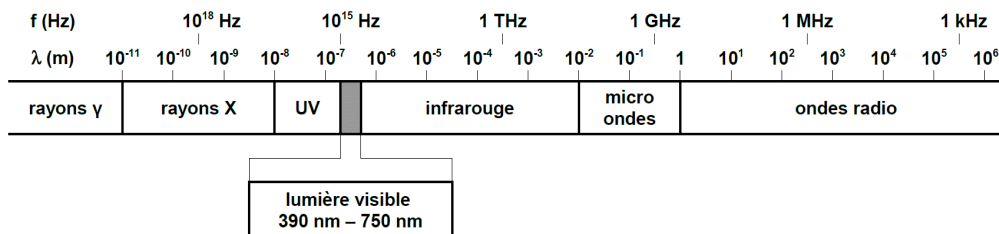


Figure I.2 : Le spectre électromagnétique

Le tableau suivant indique les désignations, les fréquences, les longueurs d'ondes et les applications des ondes radiofréquences et des micro-ondes.

Désignation internationale	Fréquence	Longueur d'onde	Applications
ELF (extremely low frequency)	3 Hz à 30 Hz	100000 km à 10000 km	Détection de phénomènes naturels
SLF (super low frequency)	30 Hz à 300 Hz	10000 km à 1000 km	Communication avec les sous-marins
ULF (ultra low frequency)	300 Hz à 3000 Hz	1000 km à 100 km	Détection de phénomènes naturels
VLF (very low frequency)	3 Hz à 30 kHz	100 km à 10 km	Communication avec les sous-marins, implants médicaux
LF (low frequency)	30 kHz à 300 kHz	10 km à 1 km	Radionavigation, radiodiffusion GO (Grandes Ondes)
MF (medium frequency)	300 kHz à 3 MHz	1 km à 100 m	Radio AM, appareils de recherche de victimes d'avalanches
HF (high frequency)	3 MHz à 30 MHz	100 m à 10 m	CB, radioamateurs...
VHF (very high frequency)	30 MHz à 300 MHz	10 m à 1 m	Radio FM, aéronautique, maritime...
UHF (ultra high frequency)	300 MHz à 3 GHz	1m à 10 cm	Télévision terrestre, GSM, Wi-Fi
SHF (super high frequency)	3 GHz à 30 GHz	10 cm à 1 cm	Télévision par satellite, faisceaux hertziens...
EHF (extremely high frequency)	30 GHz à 300 GHz	1cm à 1mm	Radioastronomie, liaisons par satellites

Le spectre électromagnétique est une ressource rare, son utilisation est réglementée : n'importe qui ne peut pas émettre n'importe comment. Chaque système de transmission radio dispose d'une certaine bande de fréquence qui lui est allouée.

L'attribution des fréquences s'effectue dans le cadre d'organismes internationaux en

particulier la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) et l'Union Internationale des Télécommunications (UIT).

1.6. La propagation dans l'environnement terrestre

Lorsqu'on effectue sur la terre une transmission entre un émetteur et un récepteur, le récepteur reçoit une onde directe émise par l'émetteur mais aussi une onde réfléchie.

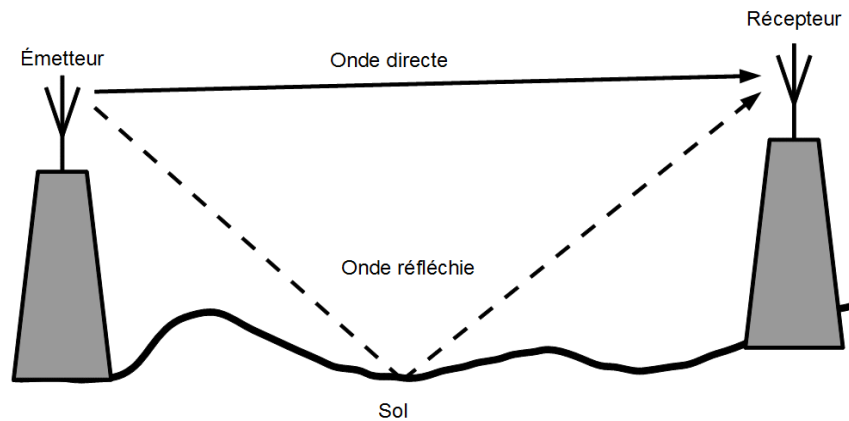


Figure I.3 : Propagation dans l'environnement terrestre

La réflexion peut se faire sur la terre, sur la mer, mais parfois aussi sur les hautes couches de l'atmosphère (ionosphère).

L'onde directe est celle qui parcourt le chemin le plus court (la ligne droite). L'onde réfléchie parcourt toujours une distance plus importante que l'onde directe. Les deux ondes arrivent donc déphasées au récepteur. Si le déphasage est de 180° et les amplitudes égales, les deux ondes se soustraient et la puissance reçue est nulle ! Ce phénomène est appelé **fading** (terme anglais signifiant évanouissement).

Dans le cas d'une réflexion sur le sol ou sur la mer, le niveau du signal reçu sera plus ou moins important en fonction de la fréquence d'émission et de la nature du sol car le sol ou la mer sont plus ou moins conducteurs selon la fréquence du signal.

En basse fréquence, le sol est bon conducteur et l'onde se propage alors par conduction dans le sol. On parle d'onde de sol. C'est essentiellement ainsi que sont diffusées les grandes ondes.

Dans le cas de réflexion sur les couches de l'ionosphère, la réflexion dépend toujours de la fréquence, mais aussi du cycle solaire, de la saison, de l'heure du jour, du champ magnétique terrestre et de beaucoup d'autres facteurs.

Parfois, la réflexion sur le sol et les couches de l'ionosphère peut-être l'effet recherché. Ce phénomène, bien connu des radioamateurs permet d'effectuer des transmissions à très longues distances par réflexions multiples : l'émetteur et le récepteur ne sont même pas en vue directe (n'oublions pas que la terre est ronde). Il n'y a plus d'onde directe

mais uniquement des ondes réfléchies. Les ondes se déplacent alors par bonds successifs entre lesquels se créent des zones de silences, il est alors possible d'entendre une station située à 2000 km mais pas une autre située à 200 km.

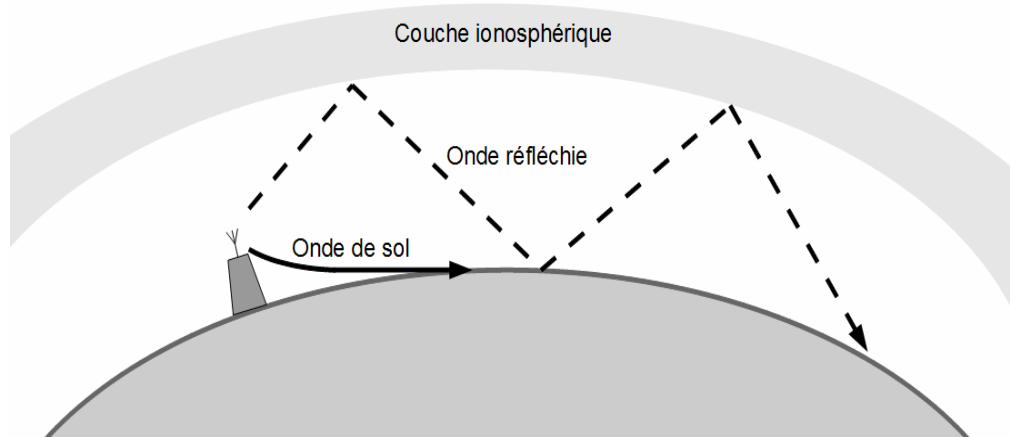


Figure I.4 : Réflexions sur la couche ionosphérique

Ce type de transmission est surtout utilisé par les radioamateurs. Ce sujet, très intéressant mais aussi très complexe, sort du cadre de cet ouvrage. Sur internet, les sites personnels des radioamateurs offrent sur ce sujet, de nombreuses informations.

Certains radioamateurs effectuent des liaisons d'un point à l'autre de la terre en effectuant des réflexions sur la lune ! Toutefois, aujourd'hui, pour communiquer efficacement d'un point à l'autre de la terre, on utilise les satellites de télécommunication.

Pour finir, on donne ici les principaux modes de propagation en fonction de la fréquence :

Entre 3 kHz et 3 MHz : la propagation se fait par onde de sol. C'est le cas des grandes ondes.

Entre 3 MHz et 30 MHz : la propagation se fait par réflexion sur l'ionosphère mais l'onde de sol et l'onde directe existent aussi. La propagation dépend de beaucoup de facteurs. C'est le domaine des ondes courtes, le terrain de jeu favori des radioamateurs.

Entre 30 MHz et 3 GHz : la propagation se fait par onde directe mais aussi par réflexion sur le sol (trajets multiples). C'est le cas de la radiodiffusion FM, de la télévision terrestre, du téléphone mobile.

Entre 3 GHz et 30 GHz : la propagation se fait par onde directe, il y a peu de réflexions sur le sol car les antennes sont très directives (paraboles). C'est le cas des faisceaux hertziens et de la télévision par satellite.

2. Utilisation du décibel

2.1. Intérêt du décibel

Les techniciens et ingénieurs qui travaillent dans les télécommunications et à fortiori dans les radiocommunications utilisent le décibel (dB) très fréquemment et sous toutes ses variantes : dB, dBm, dBi, dB μ V, etc..

Les mauvaises langues racontent que c'est parce qu'il ne savent faire que des additions et pas des multiplications !

Le décibel permet en effet de simplifier les calculs en transformant des produits de grandeurs en somme de leurs logarithmes. Il permettent aussi de représenter plus simplement des grandeurs qui varient dans une très grande dynamique.

2.2. Origine du décibel

Le décibel est une unité initialement introduite en acoustique pour traduire mathématiquement le fait que la sensation auditive est proportionnelle au logarithme de la puissance acoustique (loi de Fechner).

2.3. Rapport de puissance en dB

Si P_2 et P_1 sont deux puissances, le rapport en décibel de P_2 sur P_1 s'écrit :

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

\log_{10} : logarithme décimal ne pas confondre avec \ln : logarithme népérien.
Par la suite, on se contentera de l'écrire \log .

Exemple d'application : gain d'un amplificateur.

Le gain en puissance d'un amplificateur est le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée, on l'exprime souvent en dB.

$$G_{dB} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{SORTIE}}{P_{ENTREE}} \right)$$

Exercice 1.3

Q.1) On injecte à l'entrée d'un amplificateur une puissance $P_1 = 10$ mW, on obtient en sortie une puissance $P_2 = 200$ mW. Calculer le gain en dB de l'amplificateur.

Q.2) Un amplificateur à un gain de 18 dB, calculer P_2 en sortie si $P_1 = 1$ mW.

2.4. Rapport de courant ou de tension en dB

La puissance électrique d'un signal étant proportionnelle au carré de la tension ou du courant, ($P = R \cdot I^2 = V^2/R$), le rapport de deux puissances peut s'exprimer en fonction du rapport des tensions ou des courants :

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2^2}{R} \cdot \frac{R}{V_1^2}\right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 = 20 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Pareillement, on démontre que :