

2

Une introduction à la physique des ondes radio

Les communications sans fil font usage d'ondes électromagnétiques pour envoyer des signaux sur de longues distances. Du point de vue de l'utilisateur, les connexions sans fil ne sont pas particulièrement différentes de celles d'autres connexions de réseau: votre navigateur Internet, courriel et autres applications fonctionnent toutes de la même façon. Mais les ondes radio ont certaines propriétés inattendues comparées au câble Ethernet. Par exemple, il est très facile de voir le chemin pris par le câble Ethernet: localisez la prise sortant de votre ordinateur, suivez le câble jusqu'à l'autre extrémité, et vous l'aurez trouvé! Vous pouvez aussi être certain que de faire fonctionner plusieurs câbles Ethernet à côté les uns des autres ne causera pas de problèmes, puisque les câbles conservent efficacement leurs signaux au sein du fil lui-même.

Mais comment pouvez-vous savoir où vont les ondes émanant de votre carte sans fil? Que se produit-il quand ces ondes rebondissent sur des objets dans la salle ou sur d'autres bâtiments s'il s'agit d'un lien extérieur? Comment plusieurs cartes sans fil peuvent-elles être employées dans le même secteur sans interférer les unes avec les autres?

Afin de construire des liens sans fil stable et à haute vitesse, il est important de comprendre comment les ondes radio se comportent dans le monde réel.

Qu'est qu'une onde?

Nous connaissons tous des vibrations ou des oscillations prenant diverses formes: un pendule, un arbre balançant dans le vent, la corde d'une guitare sont tous des exemples d'oscillations.

Ce qu'ils ont en commun est que quelque chose, un certain milieu ou un objet, se balance d'une façon périodique, avec un certain nombre de cycles par unité de temps. Ce genre d'onde est parfois appelé une onde **mécanique**, puisqu'elle est définie par le mouvement d'un objet ou de son milieu de propagation.

Quand de telles oscillations voyagent (c'est-à-dire, quand l'oscillation ne reste pas attachée à un endroit) nous parlons alors d'ondes se *propageant dans l'espace*. Par exemple, un chanteur crée des oscillations périodiques dans ses cordes vocales. Ces oscillations compriment et décompressent périodiquement l'air, et ce changement périodique de pression atmosphérique abandonne alors les lèvres du chanteur pour entreprendre un voyage, à la vitesse du son. Une pierre plongeant dans un lac cause une perturbation, qui voyage alors à travers le lac comme une **onde**.

Une onde a une certaine **vitesse**, **fréquence** et **longueur**. Celles-ci sont unies par une simple relation:

$$\text{Vitesse} = \text{Fréquence} * \text{Longueur d'onde}$$

La longueur d'onde (parfois nommé **lambda**, λ) est la distance séparant deux crêtes successives d'une onde périodique. La fréquence est le nombre d'ondes entières qui passent par un point fixe en une seconde. La vitesse est mesurée en mètres/secondes, la fréquence est mesurée en cycles par seconde (ou Hertz, abrégé **Hz**), et la longueur d'onde est mesurée en mètres.

Par exemple, si une onde voyage sur l'eau à un mètre par seconde, et oscille cinq fois par seconde, alors chaque onde aura une longueur de vingt centimètres:

$$\begin{aligned} 1 \text{ mètre/seconde} &= 5 \text{ cycles/seconde} * \lambda \\ 0 &= 1/5 \text{ mètres} \\ 0 &= 0,2 \text{ mètres} = 20 \text{ cm} \end{aligned}$$

Les ondes ont également une caractéristique nommée **amplitude**. Celle-ci est la distance entre le centre d'une onde et l'extrémité d'une de ses crêtes, pouvant être illustrée comme étant la « hauteur » d'une vague d'eau. La relation entre fréquence, longueur d'onde et amplitude est illustrée par la Figure 2.1.

Il est facile d'apercevoir des ondes sur l'eau. Laissez simplement tomber une pierre dans un lac et vous pouvez voir les vagues pendant qu'elles se déplacent sur l'eau avec le temps. Dans le cas des ondes électromagnétiques, ce qui pourrait être plus difficile à comprendre est: « qu'est ce qui est en train d'osciller? ».

Afin de comprendre ceci, nous devons en premier lieu comprendre les forces électromagnétiques.

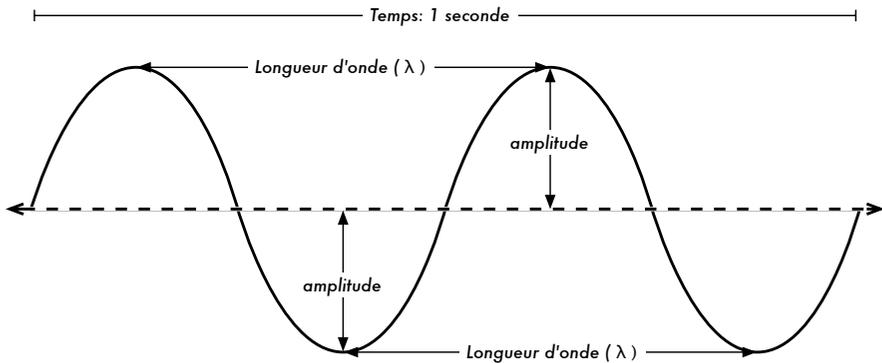


Figure 2.1: Longueur d'onde, amplitude, et fréquence. Pour cette onde, la fréquence est de 2 cycles par seconde, ou 2 Hz.

Forces électromagnétiques

Les forces électromagnétiques sont les forces entre les charges électriques et les courants. Nous y sommes déjà habitués par exemple lorsque notre main touche une poignée de porte après avoir marché sur un tapis synthétique, ou lorsque nous frôlons une barrière électrique. Un exemple plus fort des forces électromagnétiques est la foudre que nous voyons pendant les orages. La **force électrique** est la force entre les charges électriques. La **force magnétique** est la force entre les courants électriques.

Les électrons sont des particules qui portent une charge électrique négative. Il existe aussi d'autres particules, mais les électrons sont responsables de l'essentiel de ce que nous devons connaître sur la façon dont les ondes radio se comportent.

Regardons ce qui se produit sur un morceau de fil de fer droit dans lequel nous enfonçons les électrons d'un côté puis de l'autre, périodiquement. À un instant donné, le dessus du fil est chargé négativement - tous les électrons y sont recueillis. Ceci crée un champ électrique du positif au négatif le long du fil. À l'instant suivant, les électrons ont tous été conduits à l'autre extrémité, et le champ électrique va dans l'autre sens. Lorsque ceci se produit à plusieurs reprises, les vecteurs de champ électrique (flèches du positif au négatif) abandonnent le fil de fer, pour ainsi dire, et sont irradiés en-dehors, dans l'espace autour du fil.

Ce que nous venons de décrire est connu sous le nom de dipôle (en raison des deux pôles, le plus et le moins), ou plus communément **antenne dipôle**.

C'est la forme la plus simple d'antenne omnidirectionnelle. Le mouvement du champ électrique est généralement nommé **onde électromagnétique**.

Revenons à la relation:

$$\text{Vitesse} = \text{Fréquence} * \text{Longueur d'onde}$$

Dans le cas d'ondes électromagnétiques, la vitesse est la vitesse de la lumière, notée **c**.

$$c = 300\ 000\ \text{km/s} = 300\ 000\ 000\ \text{m/s} = 3 * 10^8\ \text{m/s}$$

$$c = f * \lambda$$

Les ondes électromagnétiques sont différentes des ondes mécaniques en ce qu'elles ne requièrent aucun medium pour se propager. Les ondes électromagnétiques peuvent même se propager à travers le vide de l'espace.

Puissances de dix

En physique et en mathématiques, il est souvent question de puissances de dix pour exprimer les nombres. Nous utiliserons également ces termes, par exemple dans le gigahertz (GHz), les centimètres (cm), les microsecondes (μs), et ainsi de suite. Voici un petit rappel sur les puissances de dix:

Puissances de dix			
Nano-	10^{-9}	1/1000000000	n
Micro-	10^{-6}	1/1000000	μ
Milli-	10^{-3}	1/1000	m
Centi-	10^{-2}	1/100	c
Kilo-	10^3	1 000	k
Mega-	10^6	1 000 000	M
Giga-	10^9	1 000 000 000	G

En connaissant la vitesse de la lumière, nous pouvons calculer la longueur d'onde pour une fréquence donnée. Prenons par exemple la fréquence du protocole de réseautage sans fil 802.11b, qui est:

$$\begin{aligned}
 f &= 2,4 \text{ GHz} \\
 &= 2\,400\,000\,000 \text{ cycles / seconde}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Longueur d'onde } \lambda &= c / f \\
 &= 3 \cdot 10^8 / 2,4 \cdot 10^9 \\
 &= 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ m} \\
 &= 12,5 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

La fréquence et la longueur d'onde déterminent globalement le comportement d'une onde électromagnétique: des antennes que nous construisons aux objets qui se trouvent dans le chemin des réseaux que nous voulons installer. Elles auront un impact sur les différents standards que nous pouvons choisir. Il est donc très utile de comprendre les idées de base concernant la fréquence et la longueur d'onde pour entreprendre le travail dans le domaine du sans fil.

Polarisation

Une autre caractéristique importante des ondes électromagnétiques est la **polarisation**. La polarisation décrit la direction du vecteur de champ électrique.

Si vous imaginez une antenne dipôle alignée verticalement (le morceau droit du fil), les électrons se déplacent seulement vers le haut et vers le bas, mais non vers les côtés (parce qu'il n'y a aucun espace pour se déplacer) et les champs électriques pointent donc uniquement vers le haut ou vers le bas, verticalement. Le champ abandonnant le fil et voyageant comme une onde a une polarisation strictement linéaire (et dans ce cas-ci, verticale). Si nous mettions l'antenne à plat sur le sol (de façon horizontale), nous trouverions une polarisation linéaire horizontale.

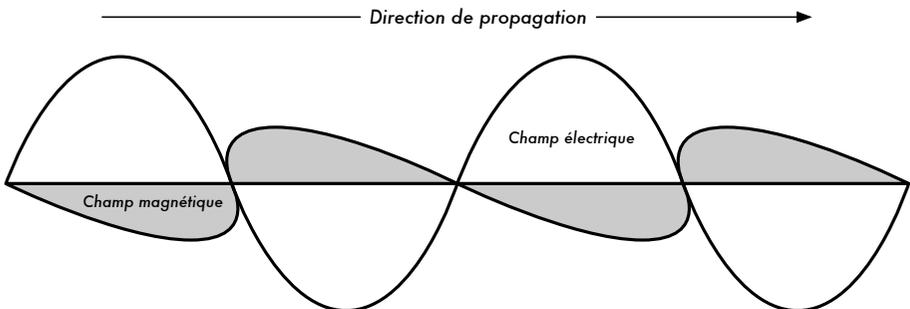


Figure 2.2: Les deux composantes complémentaires d'une onde électromagnétique: son champ électrique son champ magnétique. La polarisation décrit l'orientation du champ électrique.

La polarisation linéaire n'est qu'un cas particulier, et n'est jamais aussi parfaite: en général, il y aura toujours certaines composantes du champ pointant aussi vers d'autres directions. Le cas le plus typique est la polarisation elliptique, avec les extrêmes des polarisations linéaires (seulement une direction) et circulaires (les deux directions à force égale).

Comme nous pouvons l'imaginer, la polarisation devient importante au moment d'aligner les antennes. Si vous ignorez tout de la polarisation, vous courrez le risque d'obtenir un très faible signal même avec la plus puissante des antennes. On dit alors que cette polarisation est en déséquilibre (*mis-match polarization* en anglais).

Le spectre électromagnétique

Les ondes électromagnétiques utilisent un large éventail de fréquences (et, en conséquence, de longueurs d'ondes). Nous nommons cette gamme de fréquences et de longueurs d'ondes, le **spectre électromagnétique**. La partie du spectre la plus connue par les humains est probablement la lumière, la partie visible du spectre électromagnétique. La lumière se trouve approximativement entre les fréquences de $7,5 \cdot 10^{14}$ hertz et $3,8 \cdot 10^{14}$ hertz, correspondant aux longueurs d'ondes comprises entre 400 nm (violet/bleu) à 800 nm (rouge).

Nous sommes également régulièrement exposés à d'autres régions du spectre électromagnétique, y compris le **CA** (courant alternatif) ou réseau électrique à 50/60 hertz, rayons X, rayonnement Roentgen, ultraviolet (du côté des fréquences plus élevées de la lumière visible), infrarouge (du côté des plus basses fréquences de la lumière visible) et plusieurs autres. La **radio** est le terme utilisé pour la partie du spectre électromagnétique dans lequel des ondes peuvent être produites en appliquant le courant alternatif à une antenne soit une plage allant de 3 hertz à 300 gigahertz, mais dans un sens plus étroit du terme, la limite supérieure de fréquence serait 1 gigahertz.

Lorsque nous parlons de radio, la plupart des gens pensent à la radio FM, qui utilise une fréquence d'autour de 100 MHz. Entre la radio et l'infrarouge, nous trouvons une région de micro-ondes – avec des fréquences d'environ 1 GHz à 300 GHz, et des longueurs d'ondes de 30 cm à 1 mm.

L'usage le plus populaire des micro-ondes est indubitablement le four à micro-ondes, qui de fait fonctionne exactement dans la même plage d'ondes que les standards sans fil dont il est question dans cet ouvrage. Ces plages se retrouvent au sein des bandes ouvertes pour usage général sans licence. Cette région est nommée **bande ISM**, pour Industriel, Scientifique et Médical. La plupart des autres parties du spectre électromagnétique sont fortement contrôlées par les législations et licences, ces dernières constituant un

important facteur économique. Ceci est particulièrement vrai pour les parties du spectre qui sont utilisées dans les émissions de télévision et de radio, ainsi que pour les communications vocales et le transport des données. Dans la plupart des pays, les bandes ISM ont été réservées pour un usage sans licence.

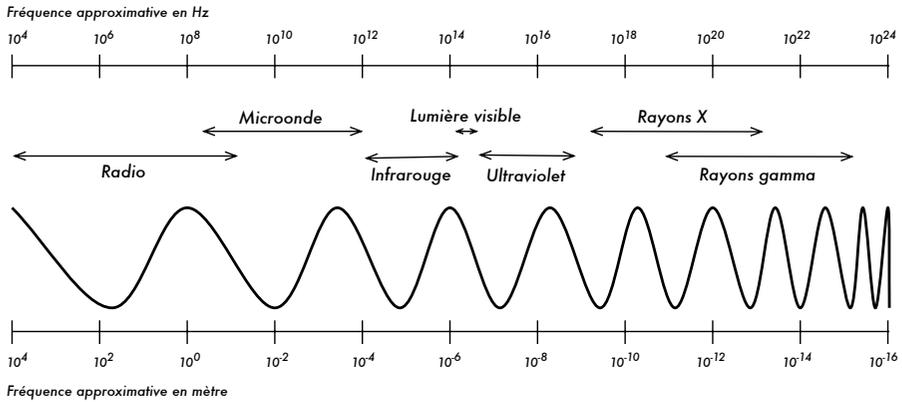


Figure 2.3: Le spectre électromagnétique.

Les fréquences les plus intéressantes pour nous sont les 2400-2484 GHz, utilisées par les standards de radio 802.11b et 802.11g (ce qui correspond à des longueurs d'ondes d'environ 12,5 cm). D'autres équipements habituellement disponibles utilisent le standard 802.11a, qui fonctionne à 5150-5850 GHz (avec des longueurs d'ondes d'environ 5 à 6 cm).

Largeur de bande

Un terme que vous retrouverez souvent en physique de radio est la **largeur de bande** aussi appelée de manière impropre mais fort commune la **bande passante**. La largeur de bande est simplement une mesure de gamme de fréquences. Si une gamme de fréquences de 2,40 GHz à 2,48 GHz est utilisée par un dispositif quelconque, la largeur de bande sera alors 0,08 GHz (ou plus communément 80MHz).

Il est donc facile de comprendre que la largeur de bande est intimement en rapport avec la quantité de données que vous pouvez y transmettre –plus il y a d'espace de fréquence, plus de données vous pourrez y inclure à un certain moment. Le terme largeur de bande ou bande passante est souvent utilisé pour faire référence à quelque chose que nous devrions nommer taux de transmission de données, par exemple lorsque nous disons « ma connexion Internet a une bande passante de 1 Mbps », nous voulons dire « je peux transmettre des données à 1 mégabit par seconde ».

Fréquences et canaux

Regardons de plus près comment la bande 2,4GHz est utilisée au sein du standard 802.11b. Le spectre est divisé en parties égales distribuées sur la largeur de bande appelées des canaux. Notez que les canaux ont une largeur de 22 MHz mais sont séparés seulement de 5 MHz. Ceci signifie que les canaux adjacents se superposent et peuvent interférer les uns avec les autres. Ceci est illustré par la figure 2,4.

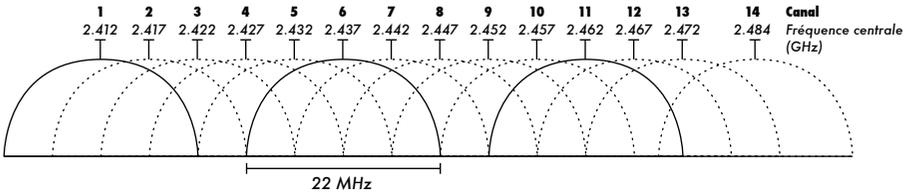


Figure 2.4: Canaux et centre de fréquences pour le standard 802.11b. Notez que les chaînes 1,6 et 11 ne se superposent pas.

Pour une liste complète des canaux et de leur centre de fréquences pour le standard 802.11b/g et 802.11a, voir l'Appendice A.

Comportement des ondes radio

Il y a quelques règles simples qui peuvent être très utiles pour concevoir un réseau sans fil:

- Plus la longueur d'onde est grande, plus loin celle-ci ira.
- Plus la longueur d'onde est grande, mieux celle-ci voyagera à travers et autour des choses.
- À plus courte longueur d'onde, plus de données pourront être transportées.

Même si ces règles semblent très simples, il est plus facile de les comprendre grâce à des exemples.

Les ondes plus longues voyagent plus loin

À niveaux égaux de puissances, les ondes avec une plus grande longueur d'onde tendent à voyager plus loin que les ondes avec des longueurs d'onde plus courtes. Cet effet est souvent observé dans la radio FM lorsque nous comparons la gamme d'un émetteur FM à 88MHz à la gamme à 108MHz. À la même puissance, les émetteurs avec une fréquence plus basse (donc une longueur d'onde plus élevée) tendent à atteindre des distances beaucoup plus grandes que les émetteurs à fréquence plus élevée.

Les ondes plus longues contournent les obstacles

Une vague sur l'eau qui a une longueur de 5 mètres ne sera pas arrêtée par un morceau de 5 millimètres de bois sortant en dehors de l'eau. À l'inverse, si le morceau de bois avait une longueur de 50 mètres (par exemple un bateau), celui-ci s'interposerait dans le chemin de la vague. La distance qu'une onde peut parcourir dépend du rapport entre la longueur de l'onde et la taille des obstacles qui se trouvent dans son chemin de propagation.

Il est plus difficile de visualiser des ondes se déplaçant à travers des objets solides, mais tel est le cas des ondes électromagnétiques. De plus les grandes longueurs d'ondes (et donc à plus basse fréquence) tendent à mieux pénétrer les objets que les plus courtes longueurs d'onde (et donc à fréquence plus élevée). Par exemple, la radio FM (88-108MHz) peut voyager à travers des bâtiments et d'autres obstacles facilement, alors que des ondes plus courtes (tels les téléphones GSM fonctionnant à 900MHz ou à 1800MHz) ont plus de difficultés pour faire de même. Cet effet est partiellement dû à la différence dans les niveaux de puissance utilisés par la radio FM et les téléphones GSM, mais également à la longueur d'onde plus courte des signaux GSM.

Les ondes plus courtes peuvent transporter plus de données

Plus rapide est l'oscillation ou cycle d'une onde, plus d'information celle-ci pourra transporter- chaque oscillation ou cycle peut être par exemple utilisé pour transporter un bit digital, un « 0 » ou un « 1 », un « oui » ou un « non ».

Il y a un autre principe qui peut être appliqué à tous les types d'ondes et qui peut s'avérer extrêmement utile à l'heure de comprendre la propagation des ondes radio. Le principe est connu sous le nom de **Principe de Huygens**, en hommage à Christiaan Huygens (1629-1695), un mathématicien, physicien et astronome hollandais.

Imaginez que vous preniez un petit bâton et le plongiez verticalement dans la surface d'un lac immobile, faisant que l'eau se balance et danse. Les vagues abandonneront le centre du bâton - l'endroit où vous l'avez plongé- en faisant des cercles. Maintenant, partout où les particules de l'eau se balancent et dansent, elles feront faire la même chose aux particules voisines: à partir de chaque point de perturbation, une nouvelle vague circulaire prendra naissance. Ceci explique de façon très simple le Principe de Huygens. Dans les mots de wikipedia.org:

« Le principe du Huygens est une méthode d'analyse appliquée aux problèmes de la propagation d'onde dans la limite lointaine de ce champ. Il

reconnaît que chaque point d'une onde avançant de manière frontale est en fait le centre d'une nouvelle perturbation et la source d'une nouvelle série d'ondes ; et que, prise dans son ensemble, l'onde qui avance peut être considérée comme la somme de toutes les ondes secondaires qui surgissent des points dont le milieu a déjà été traversé. Cette vision de la propagation d'onde aide à mieux comprendre une variété de phénomènes d'ondes, tels que la diffraction. »

Ce principe est vrai tant pour les ondes radio que pour les vagues sur l'eau, pour le son comme pour la lumière –même si pour la lumière, la longueur d'onde est bien trop courte pour que ses effets puissent directement être appréciés par l'œil humain.

Ce principe nous aidera à comprendre la diffraction et les zones Fresnel, le besoin d'établir des lignes de vue ainsi que le fait que parfois nous puissions tourner les coins de rues, sans avoir besoin de ligne de vue.

Observons maintenant ce qui arrive aux ondes électromagnétiques tandis qu'elles voyagent.

Absorption

Lorsque les ondes électromagnétiques passent à travers un matériel quelconque, elles en sortent généralement affaiblies ou amorties. La puissance qu'elles vont perdre va dépendre de leur fréquence et naturellement du matériel. Une fenêtre de verre clair est évidemment transparente pour la lumière, alors que le verre utilisé dans les lunettes de soleil élimine une partie de l'intensité de la lumière ainsi que la radiation ultraviolette.

Souvent, un coefficient d'absorption est employé pour décrire l'impact d'un matériel sur la radiation. Pour les micro-ondes, les deux matériaux absorbants principaux sont:

- Le **Métal**. Les électrons peuvent bouger librement dans les métaux, et peuvent aisément balancer et absorber ainsi l'énergie d'une onde qui passe.
- L'**eau**. Les micro-ondes font que les molécules d'eau se bousculent, capturant de ce fait une partie de l'énergie de l'onde¹.

1. Un mythe généralement répandu est que l'eau "résonne" à 2,4GHz, ce qui explique pourquoi cette fréquence est employée dans les fours à micro-ondes. En fait, l'eau ne semble pas avoir une fréquence de résonance particulière. L'eau tourne et bouscule autour d'une source radio proche, et se réchauffe lorsqu'elle se trouve en présence d'ondes radio de puissance élevée à n'importe quelle fréquence. 2,4GHz est une fréquence ISM sans licence, ce qui en fait un bon choix politique pour une utilisation dans les fours à micro-ondes.

Pour les fins pratiques du réseautage sans fil, nous pouvons considérer le métal et l'eau comme des matériaux absorbants parfaits: nous ne pourrions pas passer à travers eux (bien que des couches minces d'eau permettent le passage d'une certaine puissance). Ces matériaux sont à la micro-onde ce qu'est un mur de brique à la lumière. Si nous parlons d'eau, nous devons nous rappeler qu'elle se présente sous différentes formes: la pluie, le brouillard et la brume, des nuages bas et ainsi de suite. L'eau sous toutes ses formes se présentera dans le chemin des liens de radio. Elles ont une forte influence, et dans plusieurs circonstances, elles peuvent faire en sorte qu'un changement climatique rompe un lien radio.

Il y a d'autres matériaux qui ont un effet plus complexe sur l'absorption radio.

Pour les **arbres** et le **bois**, la quantité d'absorption dépend de la quantité d'eau qu'ils contiennent. Un morceau de bois mort et sec est plus ou moins transparent pour les ondes radio, un morceau de bois frais et humide absorbera, au contraire, beaucoup l'onde.

Les plastiques et matériaux similaires n'absorbent généralement pas beaucoup d'énergie de radio, mais ceci varie dépendamment de la fréquence et du type de matériel. Avant de construire une composante avec du plastique (par exemple une protection climatique pour un dispositif de radio et ses antennes), il est toujours mieux de mesurer et vérifier que le matériel en question n'absorbe pas l'énergie de radio autour de 2,4GHz. Une façon simple de mesurer l'absorption du plastique à 2,4GHz est de mettre un échantillon dans le four à micro-ondes pour quelques minutes. Si le plastique se réchauffe, c'est qu'il absorbe alors l'énergie de radio et ne devrait donc pas être utilisé.

Pour terminer, parlons de nous-mêmes: les humains. Nous (ainsi que les autres animaux) sommes surtout constitués d'eau. En ce qui a trait au réseautage radio, nous pouvons être décrits comme des grands sacs d'eau, avec une absorption également forte. Orienter un point d'accès dans un bureau de manière telle que son signal doit passer à travers plusieurs personnes, est une erreur importante lors de la conception des réseaux dans les bureaux. Ceci est également vrai pour les hotspots, les installations dans les cafés et les bibliothèques et autres installations extérieures.

Réflexion

Tout comme la lumière visible, les ondes radio sont réfléchies lorsqu'elles entrent en contact avec des matériaux qui sont appropriés pour cela: pour les ondes radio, les sources principales de réflexion sont le métal et les surfaces d'eau. Les règles pour la réflexion sont assez simples: l'angle sur lequel une onde frappe une surface est le même angle sur lequel elle sera déviée. Notez qu'aux yeux d'une onde radio, une grille dense de métal agit

de la même façon qu'une surface solide, tant et aussi longtemps que la distance entre les barreaux est petite en comparaison à la longueur d'onde. À 2,4GHz, une grille de métal avec une maille d'un centimètre agira de la même façon qu'une plaque de métal.

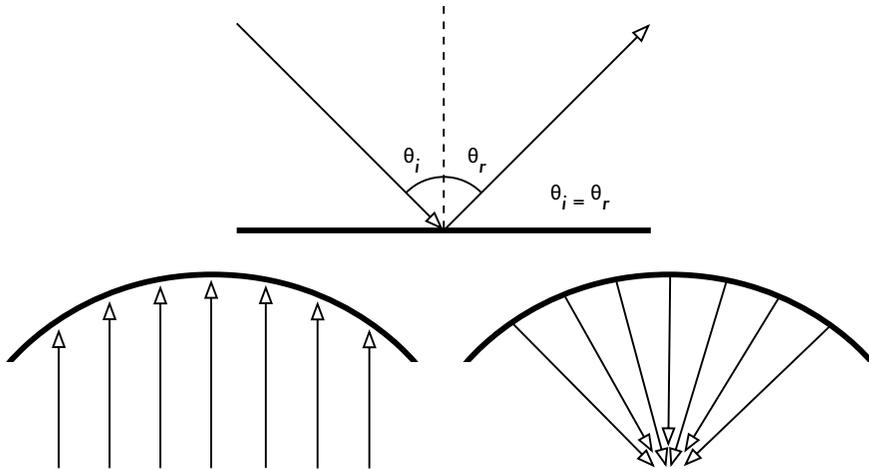


Figure 2.5: Réflexion d'ondes radio. L'angle d'incidence est toujours égal à l'angle de réflexion. Une antenne parabolique utilise cet effet afin de conduire dans une même direction les ondes radio éparpillées sur sa surface.

Bien que les règles de la réflexion soient tout à fait simples, les choses peuvent devenir très compliquées lorsque vous imaginez l'intérieur d'un bureau avec beaucoup de petits objets en métal de formes variées et compliquées. Il en va de même pour des situations urbaines: regardez autour de vous dans votre ville et essayez de repérer tous les objets en métal. Ceci explique pourquoi les **effets par trajets multiples** (c.-à-d. des signaux atteignant leur cible le long de différents chemins, et donc à des temps différents) jouent un rôle si important dans le domaine du réseautage sans fil. La surface de l'eau, avec des vagues et une ondulation changeant tout le temps, la rend un objet de réflexion très compliqué et donc très difficile à prévoir et à calculer avec précision.

Nous devrions également ajouter que la polarisation a un impact: en général, des ondes avec des polarisations différentes seront réfléchies différemment.

Nous employons la réflexion à notre avantage dans la construction d'une antenne: par exemple nous installons des antennes paraboliques énormes derrière notre émetteur de radio pour rassembler les signaux de radio et concentrer notre signal dans un point ou une direction particulière.

Diffraction

La diffraction est le repli apparent des vagues en frappant un objet. C'est l'effet des « ondes tournant les coins ».

Imaginez une vague sur l'eau voyageant dans un front d'onde droit, exactement comme une vague qui se forme sur une plage océanique. Maintenant nous plaçons une barrière solide, disons une barrière solide en bois, de manière à la bloquer. Nous avons coupé une ouverture étroite dans le mur, telle une petite porte. À partir de cette ouverture, une vague circulaire naîtra, et elle atteindra naturellement des points qui ne sont pas alignés en ligne droite avec cette ouverture mais se dispersera sur chacun de ses côtés. Si vous regardez ce front de vagues – qui pourrait aussi bien être une onde électromagnétique – comme étant un faisceau de lumière (une ligne droite), il peut sembler difficile d'expliquer comment il peut atteindre des points qui devraient être cachés par une barrière. Si nous le modélisons un front d'ondes, le phénomène prend tout son sens.

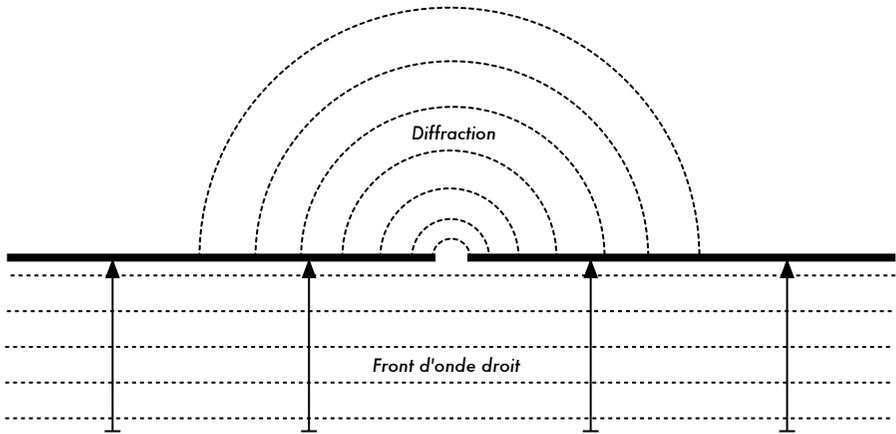


Figure 2.6: Diffraction à travers une ouverture étroite.

Le principe de Huygens fournit un modèle pour comprendre ce comportement. Imaginez qu'à n'importe quel moment, chaque point sur un front d'ondes peut être considéré le point de départ pour une "ondelette" sphérique. Cette idée a été travaillée plus tard par Fresnel, et même si elle décrit adéquatement le phénomène, celui-ci est toujours matière à discussion. Mais pour les fins de ce livre, le modèle de Huygens décrit assez bien le phénomène en question.

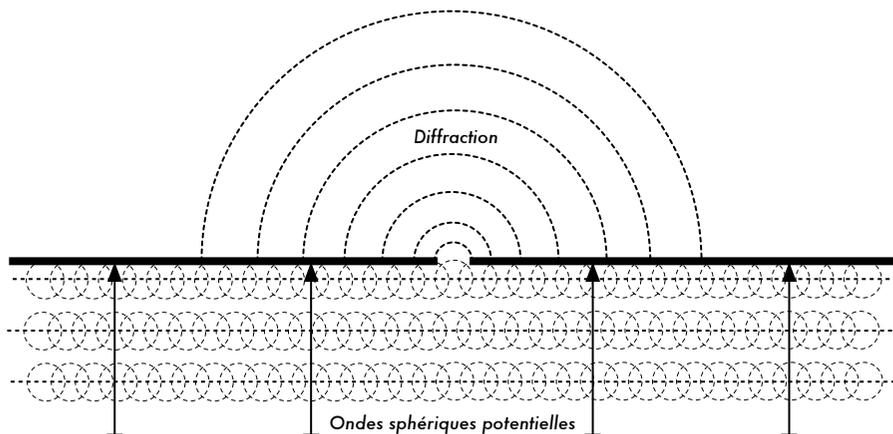


Figure 2.7: Le principe Huygens.

Par l'effet de la diffraction, les ondes vont se replier autour des coins ou par une ouverture dans une barrière. Les longueurs d'onde de la lumière visible sont trop petites pour que les humains puissent observer leurs effets directement. Les micro-ondes, avec une longueur d'onde de plusieurs centimètres, montreront les effets de la diffraction lorsque les ondes frappent des murs, des sommets de montagne, et d'autres obstacles. Une obstruction semble faire changer la direction de l'onde en la faisant « tourner » les coins.

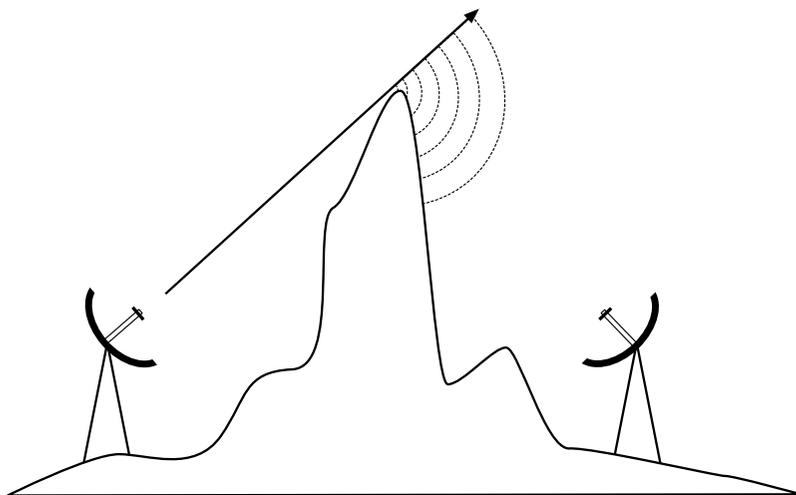


Figure 2.8: Diffraction sur le sommet d'une montagne.

Notez qu'avec la diffraction il y a perte de puissance: l'énergie de l'onde diffractée est significativement plus faible que celle du front d'ondes qui l'a causé. Mais dans quelques applications très spécifiques, vous pouvez tirer profit de l'effet de la diffraction pour éviter des obstacles.

Interférence

En travaillant avec des ondes, un plus un n'est pas nécessairement égal à deux. Le résultat peut tout aussi bien être zéro.

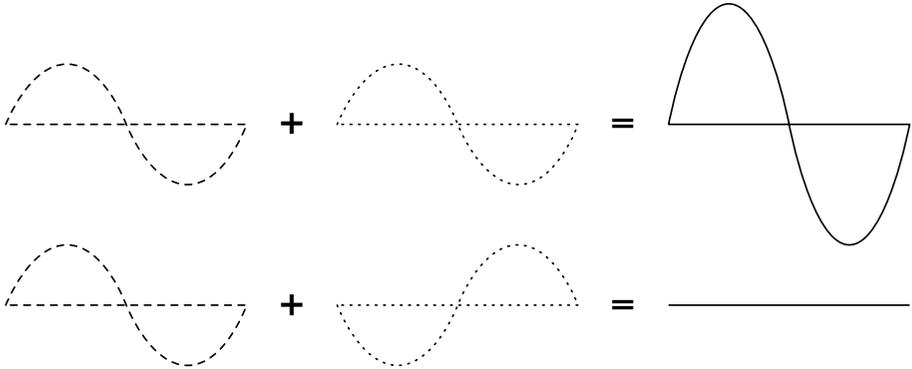


Figure 2.9: Interférence constructive et destructive.

Ceci est plus facile à comprendre lorsque vous dessinez deux ondes sinusoïdales et ajoutez les amplitudes. Lorsqu'une pointe coïncide avec une autre pointe, vous obtenez les résultats maximum ($1 + 1 = 2$). Ceci s'appelle **l'interférence constructive**. Lorsqu'une pointe coïncide avec une vallée, vous obtenez une annihilation complète ($(1 + (-)1 = 0$), appelée une **interférence destructive**.

Vous pouvez essayer ceci avec des vagues sur l'eau et deux petits bâtons pour créer des vagues circulaires - vous verrez que là où deux vagues se croisent, il y aura des secteurs avec des pointes plus élevées et d'autres qui demeurent presque plats et calmes.

Afin que toutes les séries d'ondes s'ajoutent ou s'annulent parfaitement les unes aux autres, elles doivent exactement avoir la même longueur d'onde et leurs phases doivent être en relation, ceci implique une relation entre les positions des crêtes d'es ondes.

Dans le domaine de la technologie sans fil, le mot interférence est typiquement employé dans un sens plus large, pour la perturbation par d'autres sources de radio fréquence, par exemple des canaux adjacents. Ainsi, lorsque les réseauteurs sans fil parlent d'interférence, ils parlent généralement de toutes sortes de perturbations par d'autres réseaux, et d'autres sources de micro-ondes. L'interférence est l'une des sources principales de difficulté dans la construction de liens sans fil, particulièrement dans les environnements urbains ou les espaces fermés (telle qu'une salle de conférence) où plusieurs réseaux peuvent se faire concurrence dans un même spectre.

Toutes les fois que des ondes d'amplitudes égales et de phases opposées se croisent, l'onde est annihilée et aucun signal ne peut être reçu. Plus couramment, les ondes se combineront pour donner une onde complètement déformée qui ne pourra pas être employée efficacement pour la communication. Les techniques de modulation et l'utilisation de canaux multiples aident à résoudre les problèmes d'interférence, mais ne l'éliminent pas complètement.

Ligne de vue

Le terme *ligne de vue* (dont l'abréviation est **LOS** en anglais pour **Line Of Sight**), est assez facile à comprendre lorsque nous parlons de lumière visible: si nous pouvons apercevoir un point B à partir du point A où nous sommes situés, nous avons une ligne de vue. Vous n'avez qu'à dessiner une ligne du point A au point B et, si rien ne croise le chemin, vous avez une ligne de vue.

Les choses deviennent un peu plus compliquées lorsque nous traitons de micro-ondes. Rappelez-vous que la plupart des caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques vont s'accroître dépendamment de leur longueur d'onde. Ceci est également le cas pour l'élargissement des ondes lorsqu'elles voyagent. La lumière a une longueur d'onde d'environ 0,5 micromètre, les micro-ondes utilisées en réseaux sans fil ont une longueur d'onde de quelques centimètres. En conséquence, leurs faisceaux sont beaucoup plus larges - ils ont, pour ainsi dire, besoin de plus d'espace pour voyager.

Notez que les faisceaux lumineux s'élargissent de la même façon, et si vous les laissez voyager assez longtemps, vous pouvez voir les résultats malgré leur courte longueur d'onde. Lorsque nous pointons un laser bien focalisé à la lune, son faisceau s'élargira à plus de 100 mètres de rayon avant qu'il n'atteigne la surface. Par une nuit claire, vous pouvez voir cet effet par vous-même en utilisant un pointeur laser peu coûteux et des jumelles. Plutôt que de pointer la lune, pointez une montagne éloignée ou une structure inoccupée (telle qu'une tour d'eau). Le rayon de votre faisceau augmentera à mesure que la distance augmente.

La ligne de vue dont nous avons besoin afin d'avoir une connexion sans fil optimale entre deux points A à B doit donc être plus large qu'une simple ligne entre ces points- sa forme ressemble plus à celle d'un cigare, d'une saucisse ou plus mathématiquement d'une ellipse. Sa largeur peut être décrite par le concept des zones de Fresnel.

Comprendre les zones de Fresnel

La théorie exacte des zones de Fresnel est assez compliquée. Cependant, il est tout à fait facile de comprendre le concept: grâce au principe de Huygens, nous savons qu'à chaque point d'un front d'ondes une onde circulaire prend naissance. Nous savons que les faisceaux de micro-ondes s'élargissent. Nous savons que les ondes d'une fréquence peuvent interférer les unes sur les autres. La théorie des zones de Fresnel examine simplement une ligne de A à B, et puis l'espace autour de cette ligne qui contribue à ce qui arrive au point B. Quelques ondes voyagent directement de A à B, alors que d'autres voyagent sur des chemins en dehors de cet axe. En conséquence, leur chemin est plus long, introduisant un déphasage entre le faisceau direct et indirect. Toutes les fois que le déphasage est d'une longueur d'onde complète, vous obtenez l'interférence constructive: les signaux s'ajoutent de façon optimale. En adoptant cette approche et en calculant bien, vous trouvez des zones circulaires autour de la ligne droite de A à B qui contribuent à ce que le signal arrive au point B, d'autres au contraire vont diminuer le signal reçu en B.

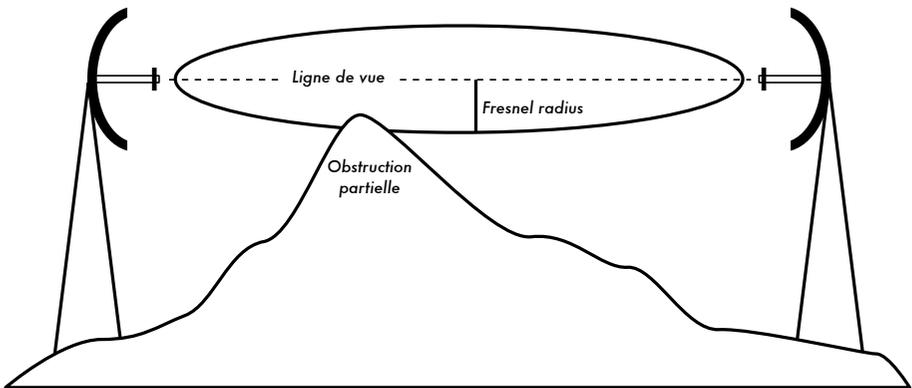


Figure 2.10: La zone Fresnel est partiellement bloquée sur ce lien, même si la ligne de vue apparaît clairement.

Notez qu'il y a beaucoup de zones Fresnel possibles, mais nous sommes principalement concernés par la zone 1. Si ce secteur est bloqué par un obstacle, par exemple un arbre ou un bâtiment, le signal arrivant à l'extrémité B serait diminué. En établissant des liens sans fil, nous devons donc être sûrs que ces zones soient exemptes d'obstacles. Naturellement rien n'est jamais parfait, ce qui, dans le domaine du réseautage sans fil, nous amène à vérifier que le secteur contenant environ 60 pour cent de la première zone de Fresnel devrait être maintenu libre d'obstacles.

Voici la formule pour calculer la première zone Fresnel:

$$r = 17,31 * \sqrt{(N(d1*d2) / (f*d))}$$

...où r est rayon de la zone en mètres, N est la zone à calculer, $d1$ et $d2$ sont les distances de l'obstacle par rapport aux extrémités lien en mètres, d est la distance totale du lien en mètres, et f est la fréquence en MHz. Notez que ceci vous donne le rayon de la zone en son centre. Dans le cas où vous installez vos antennes en hauteur, pour calculer la hauteur nécessaire par rapport le sol, vous devrez vous assurez que le sol ne rencontre pas la zone de Fresnel entre vos deux points.

Par exemple, calculons la taille de la première zone Fresnel au milieu d'un lien de 2km, transmettant à 2,437 GHz (802.11b chaîne 6):

$$\begin{aligned} r &= 17,31 \sqrt{(1 * (1000 * 1000) / (2437 * 2000))} \\ r &= 17,31 \sqrt{(1000000 / 4874000)} \\ r &= 7,84 \text{ mètres} \end{aligned}$$

Supposons que nos deux tours en A et B ont une hauteur de dix mètres, la première zone de Fresnel passerait juste à 2.16 mètres au-dessus du niveau du sol au milieu du lien. Mais de quelle hauteur devrait être une structure à ce point pour libérer 60% de la première zone?

$$\begin{aligned} r &= 17,31 \sqrt{(0,6 * (1000 * 1000) / (2437 * 2000))} \\ r &= 17,31 \sqrt{(600000 / 4874000)} \\ r &= 6,07 \text{ mètres} \end{aligned}$$

En soustrayant 10 m au résultat, nous pouvons voir qu'une structure d'une hauteur de 5,30 mètres au centre du lien bloquerait jusqu'à 60% de la première zone de Fresnel. Pour améliorer la situation, nous devrions placer nos antennes plus haut, ou changer la direction du lien pour éviter l'obstacle.

Énergie

N'importe quelle onde électromagnétique transporte de l'énergie ou de la puissance: nous pouvons le sentir lorsque nous profitons (ou souffrons) de la chaleur du soleil. La puissance P est d'une importance cruciale pour le fonctionnement des liens sans fil: vous aurez besoin d'un minimum de puissance afin que le récepteur puisse donner un sens au signal reçu.

Dans le troisième chapitre, nous reviendrons sur les détails de la puissance de transmission, des pertes, des gains et de la sensibilité de la radio. Ici nous discutons brièvement de comment la puissance P est définie et mesurée.

Le champ électrique est mesuré en V/m (différence potentielle par mètre), la puissance contenue en son sein est proportionnelle au carré du champ électrique.

$$P \sim E^2$$

De façon pratique, nous mesurons la puissance au moyen d'une certaine forme de récepteur, par exemple une antenne et un voltmètre, wattmètre, oscilloscope, ou même une carte radio et un ordinateur portatif. Observer la puissance d'un signal revient à observer le carré du signal exprimé en Volts.

Calculer avec des dBs

De loin, la technique la plus importante pour calculer la puissance est d'utiliser les **décibels (dB)**. Il n'y a pas de nouvelle physique cachée dans ceci – ce n'est qu'une méthode pratique pour simplifier les calculs.

Le décibel est une unité sans dimensions², c.-à-d., qu'il définit un rapport entre deux mesures de puissance. Il est défini par:

$$dB = 10 * \text{Log} (P1 / P0)$$

Où **P1** et **P0** peuvent être n'importe quelle valeur que vous voulez comparer. Généralement, dans notre cas, elles représenteront une certaine quantité de puissance.

Pourquoi les décibels sont-ils si maniables? Beaucoup de phénomènes de la nature se comportent d'une manière que nous appelons exponentielle. Par exemple, l'oreille humaine peut percevoir un bruit deux fois plus fort qu'un autre si celui-ci a un signal physique dix fois plus fort.

Un autre exemple, tout à fait pertinent à notre champ d'intérêt, est l'absorption. Supposez qu'un mur se trouve dans le chemin de notre lien sans fil, et que chaque mètre de mur enlève la moitié du signal disponible. Le résultat serait:

0 mètres	=	1 (signal complet)
1 mètre	=	1/2
2 mètres	=	1/4
3 mètres	=	1/8
4 mètres	=	1/16
n mètres	=	1/2 ⁿ = 2 ⁻ⁿ

2. Un autre exemple d'unité sans dimension est le pourcentage (%) qui peut également être utilisé avec toutes sortes de quantités ou chiffres. Tandis que des mesures comme les pieds ou les grammes sont fixes, les unités sans dimensions représentent une relation.

Ceci est un comportement exponentiel.

Mais une fois que nous avons employée l'astuce d'appliquer le logarithme (log), les choses deviennent beaucoup plus faciles: au lieu de prendre une valeur à la nième puissance, nous multiplions simplement par n. Au lieu de multiplier des valeurs, nous les additionnerons.

Voici quelques valeurs couramment utilisées qu'il est important de mémoriser:

- +3 dB = double puissance
- 3 dB = moitié de puissance
- 10 dB = ordre de magnitude (dix fois la puissance)
- 10 dB = un dixième de puissance

En plus des mesures sans dimensions comme les dBs, il y a un certain nombre de définitions relatives à une certaine base de valeur P_0 . Les plus pertinentes pour nous sont les suivantes:

- dBm relatif à $P_0 = 1 \text{ mW}$
- dB*i* relatif à une antenne isotrope idéale

Une **antenne isotrope** est une antenne hypothétique qui distribue également la puissance dans toutes les directions. L'antenne qui y ressemble le plus est l'antenne dipôle, bien qu'il faille souligner qu'une antenne isotrope parfaite ne peut être construite en réalité. Le modèle isotrope est cependant utile pour décrire le gain relatif de puissance d'une antenne existant dans le vrai monde.

Une autre convention commune (mais moins pratique) pour exprimer la puissance est le **milliwatts**. Voici les niveaux de puissance équivalents exprimés en milliwatts et dBm:

- 1 mW = 0 dBm
- 2 mW = 3 dBm
- 100 mW = 20 dBm
- 1 W = 30 dBm

Physique dans le monde réel

Ne vous inquiétez pas si les concepts de ce chapitre représentent un véritable défi. Comprendre comment les ondes radio se propagent et interagissent avec l'environnement est un champ d'étude complexe en soi. La plupart des personnes trouvent difficile de comprendre un phénomène qu'elles ne peuvent pas observer avec leurs propres yeux. À présent, vous devriez comprendre que les ondes radio ne voyagent pas selon un chemin droit et

prévisible. Pour construire des réseaux de transmission fiables, vous devrez pouvoir calculer combien vous avez besoin de puissance pour parcourir une distance donnée, et prévoir comment les ondes voyageront le long du trajet.

Il y a beaucoup plus à apprendre sur la physique de radio, malheureusement nous n'avons pas assez d'espace pour ce faire au sein de cet ouvrage. Pour plus d'informations sur ce champ en évolution, consultez les ressources énumérées dans l'Annexe A. Maintenant que vous avez une bonne idée de la façon dont les ondes radio interagissent dans le monde réel, vous êtes prêts à les utiliser pour communiquer.