

Antennes et ondes téléphoniques : c'est plus simple que vous ne le pensez !

Avertissement

Dans le cadre des actions d'information du public conduites par Robin des Toits, il nous a semblé indispensable de mettre à sa disposition un document qui résume les notions de base nécessaires pour comprendre à la fois le phénomène « ondes électromagnétiques », en particulier les ondes qui sont mises en jeu dans la téléphonie mobile, et le fonctionnement des installations qui les produisent ou les utilisent: les antennes-relais et les téléphones mobiles. Nous savons que beaucoup de lecteurs ne sont pas très à l'aise avec les sciences dites « dures », et nous avons donc cherché à restituer la réalité sans l'aide d'équations compliquées. Néanmoins, à l'intention des lecteurs qui le désirent, nous avons ajouté des encarts en rouge qui approfondissent les phénomènes, mais on peut aisément sauter ces compléments sans perdre le fil du sujet.

Nous nous devons de mentionner ici le développement exponentiel des objets connectés, leur utilité mais aussi les dangers indéniables et les dérives sociétales auxquelles ils nous exposent déjà.

Que les spécialistes des diverses sciences et technologies abordées ici veuillent bien excuser la brièveté de certaines explications : un développement complet nécessiterait une grosse bibliothèque. Par contre, nous sommes preneurs de toute suggestion et correction.

(Un second document fera le point sur les questions d'impacts biologiques et sanitaires, que nous ne faisons qu'effleurer ici)

A – Notions de base sur l'électromagnétisme

1) Dans les documents sur les antennes-relais, certains mots peuvent paraître obscurs: onde électromagnétique, champ, densité de puissance,

Quand on lit un article ou que l'on assiste à une émission ou une conférence sur les ondes électromagnétiques issues des antennes-relais téléphoniques, si l'on n'est pas habitué au langage des scientifiques (ce qui est le cas de la majorité de nos concitoyens, quel que soit le niveau d'études¹), on peut être rapidement rebuté par les termes utilisés. *Ondes électromagnétiques, champ électromagnétique, fréquence, longueur d'onde, mégahertz, gigahertz, antennes-relais, densité de puissance électromagnétique, effets biologiques, objets connectés, volts par mètre, ...* Tous ces termes, nous allons les découvrir au fil des pages - car, nous l'affirmons, quelques explications peuvent venir à bout de ces difficultés. Nous invitons le lecteur (la lectrice) à prendre un peu de son temps pour suivre le présent guide à travers ce qui peut s'apparenter au départ à une vraie jungle. Chère lectrice, cher lecteur, croyez que cet effort sera payant, car, vous vous en doutez, sur cette question comme sur beaucoup d'autres, « certains » tablent sur l'ignorance des citoyens pour faire passer des décisions sans les en informer. *Or, la démocratie meurt quand l'ignorance est entretenue.* Alors, nous allons commencer par définir quelques termes et quelques phénomènes qui semblent, pour le moment, mystérieux. Ensuite, nous décrirons le fonctionnement d'une antenne-relais, et

¹ ...et on ne dit pas bravo aux responsables des programmes scolaires, car des notions scientifiques de base ne seraient pas difficiles à enseigner si on y accordait quelque importance en haut lieu ! Les professeurs, eux, ne demandent que ça...

nous verrons, en particulier, que le calcul de l'exposition aux ondes est vraiment accessible...et assez souvent, les résultats sont inquiétants ! Une attention spéciale sera accordée à la 5G, dont on nous vante les bienfaits sans en imaginer l'impact réel sur nos vies présentes et futures... Enfin, nous esquisserons une brève description de la multitude d'objets dits « connectés ». Malgré tout, il faut se convaincre que le pire n'est pas sûr, et qu'il serait aisé d'appivoiser au moins une partie de cette technologie pour que tout le monde y trouve son compte... mais cela est une autre histoire !

Nous aurons à revenir, dans un autre document, sur certaines notions de biologie, et ce sera également sans douleur !

2) Les ondes

Commençons par définir ce qu'est une *onde*, en débutant par la notion plus familière d'*ondes mécaniques*. Dérivé du latin « unda », le mot « onde » désigne, dans le style poétique, l'eau, généralement celle qui s'écoule dans un ruisseau, une rivière ou un fleuve, ou qui s'agite dans la mer. Dans un langage plus courant, si nous lançons un caillou dans une mare ou un lac, cela provoque des « ronds dans l'eau », c'est-à-dire des cercles concentriques qui se propagent dans toutes les directions. Ce sont des ondes, et on parle d'ondulations circulaires. Notons que l'eau elle-même ne se déplace pas vers les bords, c'est juste l'**ébranlement** qui se propage (les pêcheurs à la ligne le savent bien : le bouchon oscille dans le sens vertical, c'est-à-dire de haut en bas et inversement, mais il ne se déplace pas, sauf si un poisson saisit l'asticot, mais çà, c'est une autre histoire). On dit que ce sont des **ondes transversales** : le mouvement de propagation des ondes (elles vont vers le bord, dans le plan horizontal) est perpendiculaire au mouvement de l'eau (qui se produit dans le sens vertical). Là, l'ondulation se voit, mais si l'on parle, si l'on enfonce une touche de piano, ou si l'on fait exploser un pétard, cela provoque un **son**. Ce son, on ne le voit pas, mais on l'entend. Il y a là aussi un **ébranlement** qui se propage. L'ébranlement est provoqué par la parole, la corde du piano frappée, l'explosion, car tout cela provoque une *compression* de l'air. Imaginons une personne placée à 300 m du pétard qui explose. Le long de la ligne qui va du pétard à ses oreilles, l'ébranlement se propage, il se produit des phénomènes de compression et de détente rapides qui, au bout d'environ une seconde, vont frapper ses tympans : le mouvement de compression/détente de l'air est parallèle à la ligne pétard-oreille. Les mouvements rapides de compression et de détente sont, cette fois, parallèles à la propagation du son. On appelle cela une **onde longitudinale**. On a ici une onde sonore, qui se déplace à plus de 300 m à la seconde (alors que les ondes sur le lac se propagent à quelques dizaines de centimètres par seconde).

Qu'elles soient transversales ou longitudinales, ces ondes sont dites « *progressives* », car elles se déplacent dans l'espace. Nous allons tout de suite définir les termes de *cycle*, de *période*, de *fréquence*, d'*amplitude*, de *crête* et de *longueur d'onde*

Cycle : Prenons l'exemple du bouchon qui flotte sur l'eau et oscille de haut en bas et inversement, quand on a jeté un caillou. Quand, partant du haut, il descend puis remonte, on dit qu'il a accompli un *cycle*. Un cycle, c'est plus généralement le mouvement complet accompli par la grandeur qui oscille, qui vibre.

Période de l'onde : c'est le temps mis pour effectuer un cycle complet. On la note T, et on la compte en secondes.

Fréquence de l'onde : c'est le nombre de cycles par seconde qui s'effectuent. Si T est la période, il est facile de vérifier que la fréquence f de l'onde est égale à l'inverse de T , donc $f = \frac{1}{T}$. Exemple : si la période de l'onde est d'un quart de seconde (0,25 s), en une seconde, il y aura eu 4 cycles. En effet, $\frac{1}{0,25} = 4$. La fréquence se compte en hertz (abréviation : Hz). Ici, $f = 4$ Hz.

Amplitude de l'onde : une grosse pierre fera de plus grosses vagues qu'un petit caillou. Le bouchon peut monter plus haut dans le cas de la grosse pierre. On dira que l'*amplitude* de l'onde est plus importante. L'*amplitude* est donc la différence de hauteur entre l'état de repos (on n'a pas encore lancé de pierre) et la hauteur maximum atteinte par la vague.

Crête : la crête désigne le point le plus haut atteint par le bouchon (la valeur maximum de la grandeur qui oscille).

La figure 1-a illustre ces définitions, dans le cas d'un bouchon oscillant sur l'eau quand une pierre a été lancée. Evidemment, ces définitions s'appliquent à tous les types d'onde, y compris aux ondes électromagnétiques que nous allons aborder ensuite.

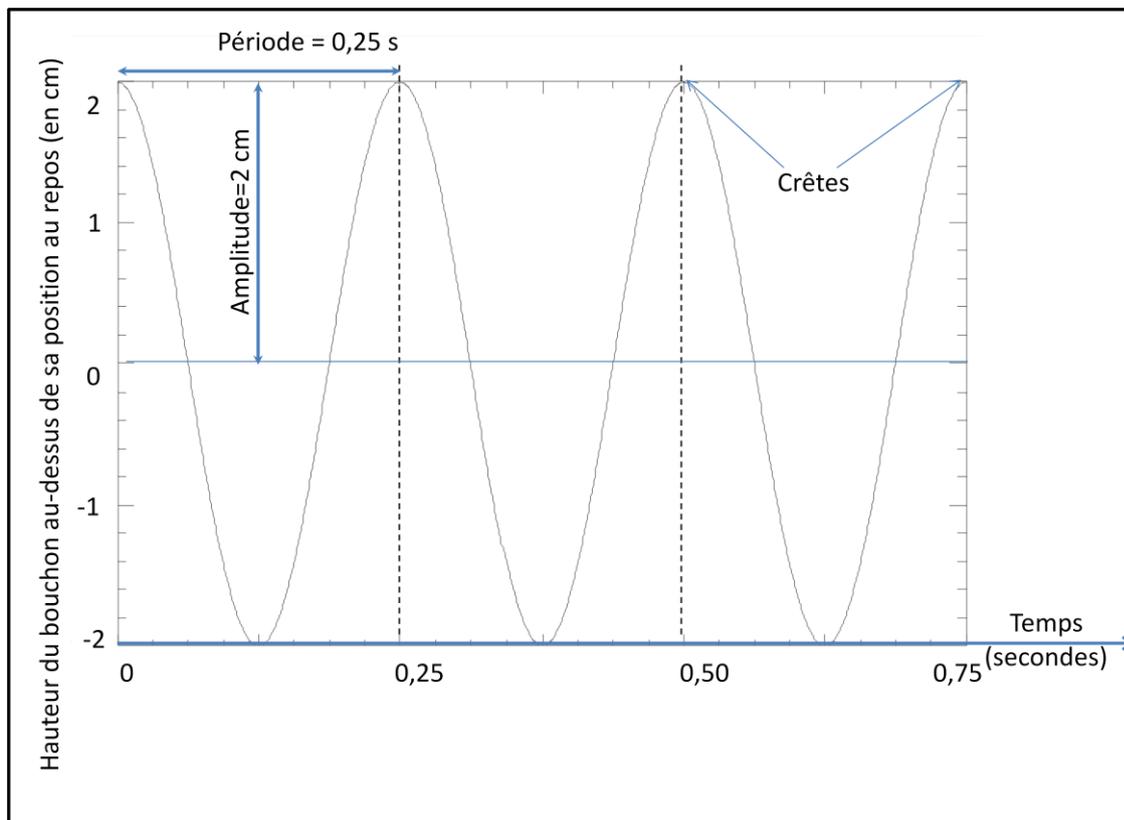


Figure 1-a : Exemple d'une onde (sinusoïde) avec définitions.

Longueur d'onde : une manière complémentaire de voir les choses est de considérer la *longueur d'onde*. La longueur d'onde (représentée souvent par la lettre grecque *lambda* : λ) est la distance qui sépare deux crêtes voisines (Figure 1-b).

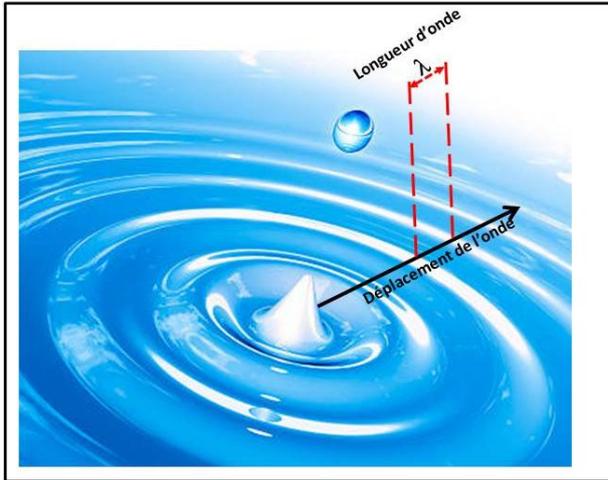


Figure 1-b : La longueur d'onde λ est la distance qui sépare deux crêtes voisines.

Si les ronds dans l'eau se propagent vers le bord de la mare à la vitesse v de 2 m par seconde (2 m/s), par exemple, et si la période T est de 0,25 secondes, la distance λ entre deux crêtes est égale au produit de la vitesse par la période, soit $\lambda = v \times T$. Donc : $\lambda = 2 \times 0,25 = 0,50$ m (50 cm). Comme $f = \frac{1}{T}$, alors inversement $T = \frac{1}{f}$ et la formule devient $\lambda = \frac{v}{f}$

A retenir donc : $\lambda = v \times T = \frac{v}{f}$. Malgré leurs différences, le son et les ronds dans l'eau sont deux exemples d'ondes dites **ondes mécaniques**. D'autres types d'ondes existent, comme *les ondes électromagnétiques* qui vont nous occuper beaucoup dans ce document. Alors que les ondes mécaniques ont besoin d'un support matériel pour voyager (l'air, l'eau, ...), les ondes électromagnétiques (lumière solaire ou ondes radio, par exemple) se propagent sans problème dans le vide (ou dans l'air). Mais, patience : avant cela, nous allons prendre un moment pour définir **l'électromagnétisme**.

3) L'électromagnétisme.

Pendant longtemps, on a considéré séparément l'étude de *l'électricité* et celle du *magnétisme*. *L'électricité*, dont le nom vient du mot grec *elektron*, qui signifie « ambre jaune » (une résine fossile de couleur dorée), est connue depuis des millénaires, même si, évidemment, aucune théorie mathématique ne la décrivait (et aucun courant électrique généré par l'homme n'existait alors, bien sûr). Quel est le lien entre électricité et ambre jaune ? Tout simplement ceci : les anciens avaient remarqué qu'un bâton (frotté) de cette résine fossile attirait des petites poussières. De nos jours, nous savons qu'il s'agit là d'un phénomène d'*électricité statique* : le frottement de la résine déplace des *charges électriques* et cela génère ce que nous appelons à présent une *force électrostatique*, que nous allons définir plus loin. Bien sûr, nos ancêtres n'avaient guère la notion de charge électrique, et aucune théorie pour expliquer cette attraction. Quant au *magnétisme*, il est également connu depuis fort longtemps. Les anciens grecs connaissaient les « *pierres d'aimant* », particulièrement abondantes dans le massif nommé « Magnetos » (au nord de la Grèce), qui avaient la bizarre faculté d'attirer certains objets en métal. Ils appelaient « *magnes* » (mot que l'on traduit tout simplement par *aimant*) les pierres issues de cette zone. On sait maintenant que ces pierres, composées de

magnétite, sont riches en oxyde de fer (en fait, il s'agit de divers oxydes de fer et d'autres matériaux en trace). Les Chinois connaissaient évidemment eux aussi ces « aimants », qui s'orientent toujours dans une certaine direction quand ils sont libres de flotter sans frottement dans une cuve sur un liquide : c'est d'ailleurs l'origine de la *boussole*. Cependant, électricité et magnétisme étaient toujours considérés séparément. Il a fallu attendre la seconde partie du XIX^e siècle, avec les travaux du physicien anglais James Clerk Maxwell, pour qu'électricité et magnétisme fusionnent en une science nommée « *électromagnétisme* ». Evidemment, Maxwell avait eu des prédécesseurs : l'italien Alessandro Volta avait fabriqué la première *pile électrique* en 1800 et démontré l'existence du *courant électrique*. Il avait aussi montré (et son ennemi intime, l'italien Luigi Galvani, en avait fait autant) que les muscles de la pauvre grenouille de laboratoire se contractaient sous l'effet de ce courant : il y aurait donc de l'électricité dans les organismes vivants, et pas seulement dans une grenouille morte. Notons déjà qu'il est fort inquiétant que des inconscients nous bombardent d'ondes électromagnétiques en prétendant qu'il n'y a pas de danger, mais nous allons en reparler... Continuons l'histoire. Les travaux du physicien danois Hans Christian Ørsted avaient prouvé (vers 1820) que le courant électrique déviait une boussole : électricité et magnétisme devaient donc avoir une certaine parenté. Citons aussi le français Ampère et l'anglais Faraday, qui avaient réalisé sur ce sujet des expériences fécondes (Faraday avait même, en passant, inventé le générateur de courant électrique !), mais c'est bien Maxwell qui a fusionné ces sciences, et établi la théorie de l'*électromagnétisme*, laquelle se traduit par les quatre « *équations de Maxwell* ». Le point important est que cette théorie puissante unifiait les anciennes notions : électrostatique (attraction de petites poussières par l'ambre jaune), magnétostatique (attraction de particules de métal par la pierre d'aimant), théorie des courants électriques... et allait même aboutir à la découverte et la description scientifique des *ondes électromagnétiques*. Patience, nous allons détailler tout cela.

a) Charge électrique et champ électrique.

Les anciens, avons-nous dit, constataient qu'un bâton d'ambre jaune frotté attirait des poussières, mais ils ne savaient pas pourquoi. Aujourd'hui, on le sait, grâce à la notion de *charge électrique*. La charge électrique est une propriété de la matière qui permet, par exemple, d'expliquer le comportement des poussières ou des minuscules morceaux de papier attirés par le bâton d'ambre. L'ambre frottée possédait donc une propriété que l'on a appelée *charge électrique* sans en connaître la nature. On avait aussi remarqué qu'une tige de **verre** frottée est, elle aussi, capable d'attirer des poussières et des petits bouts de papier, tout comme la tige d'ambre. Plus intrigant, voici une petite expérience : frottons (donc, électrisons) deux baguettes de verre identiques. On les suspend par le milieu avec un fil de coton ou de lin, et on les approche l'une de l'autre : elles se repoussent. Si nous faisons la même chose avec deux baguettes d'ambre, elles se repoussent aussi. Par contre, si nous remplaçons une des deux baguettes d'ambre par une baguette de verre, les baguettes s'attirent ! Il y aurait donc *deux types de charge électrique* : à ce stade, on ne sait toujours pas ce qu'est la charge électrique, mais on sait déjà qu'il en existe deux sortes, que l'on a *appelées arbitrairement l'une positive, l'autre négative*.

Avançons : dès 1840, on soupçonne déjà l'existence de charges électriques élémentaires indivisibles, toute charge étant constituée par un nombre entier de charges élémentaires. A cette époque, même si on en a l'intuition, on ne connaît pas encore les *électrons*. Quant à l'*atome* (assemblage de *protons*, de *neutrons* et d'*électrons*), il n'a pas encore été mis en évidence, car sa véritable découverte, en 1910, est due au physicien néo-zélandais Ernest Rutherford. Peu après, en 1911, le physicien

américain Robert Millikan a pu prouver que la *charge élémentaire* était portée par une particule qu'on appelait déjà *électron* (et dont l'existence avait été mise en évidence par le physicien anglais Joseph John Thomson vers 1897), et que cette charge, en effet, n'était pas divisible. L'électron porte une *charge élémentaire, charge dite négative, par convention, car rien chez cette particule ne mérite ce qualificatif* (notons que l'électron a un jumeau opposé, le *positron*, de charge positive, mais qui ne sera découvert qu'en 1932 et ne se trouve pas à l'état naturel sur Terre : c'est une particule *d'antimatière*, et son espérance de vie est très faible !). L'unité de charge électrique, dans le système d'unités international actuel, est le *coulomb* (symbole C, en hommage au scientifique français Charles Coulomb). Par définition, une charge électrique de 1 coulomb (1C) est la quantité d'électricité qui traverse une section d'un fil conducteur pendant une seconde si l'intensité est de 1 ampère. Tous calculs faits, cela revient à un nombre de charges élémentaires assez fantastique : ce nombre est égal à $6,24 \cdot 10^{18}$ soit 6,24 milliards de milliards² ! L'électron porte donc une charge électrique élémentaire, et cette charge vaut environ -0,16 milliardième de milliardième de coulomb (soit $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Le signe *moins* « - » rappelle que *par convention*, la charge de l'électron est *négative*.

Ici, on va introduire la notion de *champ électrique*. En effet, qu'est-ce qui attire le minuscule morceau de papier vers la tige (d'ambre ou de verre) ? Depuis Isaac Newton, on savait que deux masses s'attirent par gravitation, alors qu'il n'y a que du vide entre les deux (comme par exemple entre la Lune et la Terre). Newton avait démontré que la force mutuelle d'attraction dépendait des masses en présence et variaient à l'inverse du carré de la distance. Il n'avait pas cherché à définir la nature de ce qu'on appelle maintenant un *champ de gravitation*, mais il avait proposé une formule qui allait révolutionner la physique et surtout l'astronomie. On savait donc que les forces à distance existaient. Pour l'attraction électrique, quelque chose de semblable devait exister : la baguette (ambre ou verre) génère, de par la présence de charges (quelle que soit la chose qui se cache sous ce nom!) sur sa surface, une *cause* qui transmet une *force* sur le petit morceau de papier. Cette cause, Michael Faraday lui a donné le nom de *champ électrique* (tout comme il existe un *champ de gravitation*). L'unité de champ électrique est le *volt par mètre (V/m)*, que nous retrouverons souvent dans la suite de ce document. Un champ électrique existe aussi entre les plaques d'un condensateur plan constitué par deux plaques métalliques parallèles et proches l'une de l'autre, quand l'une des deux plaques est reliée au pôle *plus* d'une batterie électrique, l'autre étant reliée au pôle *moins*. Ici, le champ électrique est constant : il ne varie pas avec le temps si nous ne faisons pas varier les conditions de l'expérience. Ce qui différencie le champ électrique et le champ de gravitation, c'est qu'on ne connaît pas d'exemple où deux masses se repoussent par gravité : elles s'attirent toujours. Pour les charges électriques, elles ne s'attirent que si leurs signes sont opposés, sinon, elles se repoussent. Enfin, précisons que pour expliquer l'attraction du petit morceau de papier ou de la poussière, on évoque *l'électrisation par influence* : quand on approche la baguette vers le papier, si l'extrémité de la baguette est chargée positivement, le morceau de papier voit ses électrons (charges négatives) migrer par attraction vers la charge positive de la baguette, et il y a attraction du petit morceau de papier.

² On rappelle que les notations du genre 10^{18} ou 10^{-19} , que l'on appelle *notations en puissance de dix*, sont utilisées pour éviter les longues phrases et les zéros interminables. Ainsi, 10^3 , c'est un 1 suivi de trois zéros, donc c'est mille. Avec le signe moins, 10^{-3} , c'est 1 divisé par mille, soit un millième. Là, ça n'est pas encore trop difficile. Ça se complique pour les très grands (ou les très petits) nombres : ainsi, il vaut mieux écrire 10^{18} pour un 1 suivi de dix-huit zéros, ce qui fait un milliard de milliard. Inversement, écrivons plutôt 10^{-18} pour un 1 divisé par 1 suivi de dix huit zéros : c'est un milliardième de milliardième.

Nous verrons plus loin qu'un champ électrique est présent dans l'onde électromagnétique, à cette nuance près que dans ce cas, il est transporté par l'onde et qu'il varie dans le temps...

Une précision : dans la suite de ce document, pour indiquer la multiplication entre deux nombres, on n'utilise pas le symbole « x », mais le point « . », afin d'éviter de confondre avec la lettre X. Quand on multiplie non pas deux nombres, mais deux grandeurs symboliques, par exemple le champ magnétique B et la vitesse de la lumière c , on écrit simplement « $B c$ », sans aucun signe entre les deux, mais avec simplement un espacement.

Force exercée sur une charge électrique. Champ électrique.

Simplifions-nous la vie et imaginons d'abord deux charges électriques de faibles dimensions (ponctuelles) maintenues immobiles, l'une étant désignée par q_1 , l'autre étant désignée par q_2 . L'expression de la force que la charge de valeur q_1 exerce sur la charge de valeur q_2 , séparées de la distance r_{12} est donnée par la loi dite « loi de Coulomb » :

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{u}_{12} \quad (1)$$

La force de répulsion (ou d'attraction) est proportionnelle au produit des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Le symbole ϵ_0 est une constante appelée *permittivité électrique du vide*, dont la valeur est de $8,85 \cdot 10^{-12}$ farad par mètre (le farad étant l'unité de capacité). Le symbole \mathbf{F}_{12} est en gras et, comme dans toutes les formules dans ce document, les caractères en gras représentent des *vecteurs*. Le symbole \mathbf{u}_{12} est le vecteur unitaire qui oriente le vecteur \mathbf{r}_{12} .

On peut également exprimer la force que la charge q_2 exerce sur la charge q_1 . Sans surprise (car action = réaction), elle lui est égale en valeur absolue, mais opposée en sens (car $\mathbf{u}_{12} = -\mathbf{u}_{21}$)

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \mathbf{u}_{21} \quad (2-a)$$

On peut aussi écrire l'équation (1) sous la forme suivante: $\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{E}_1$, où \mathbf{E}_1 est ce que l'on appelle le *champ électrique* engendré par la charge q_1 . Plus précisément, comme les charges sont immobiles, on appelle ce champ un *champ électrostatique*. Ce champ peut être considéré comme une perturbation de l'espace autour des charges qui l'ont créée. Cette perturbation est capable de modifier la trajectoire d'une charge électrique qui passe dans l'espace où il règne. Une charge q dans un champ E subit la force F qui vaut:

$$F = qE \quad (2-b)$$

La force et le champ sont toujours parallèles, de même sens si la charge est positive et de sens opposés si la charge est négative. Dans le cas d'un condensateur plan de capacité C , si la différence de potentiel est V , la charge totale est $Q = CV$ et le champ électrique est égal en module à $\frac{V}{d}$, dirigé de la plaque « + » vers la plaque « - ». Plus généralement, si la distribution du potentiel en tout point M de l'espace est désignée par $V(M)$, et que V est une fonction dérivable, le champ E est donné par la relation

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (3)$$

où le symbole ∇ représente l'opérateur *gradient*.

Remarque importante : notons, à propos de la notion de permittivité, que les matériaux ont en général une permittivité ϵ supérieure à celle du vide. Cela est d'une grande importance quand on s'intéresse aux effets d'une onde électromagnétique sur les organismes vivants. On exprime alors cette permittivité ϵ par la relation $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, où ϵ_r est la *permittivité relative du matériau* (on l'appelle aussi *constante diélectrique*). Dans le vide (ou, avec une très bonne approximation, dans l'air sec), on a $\epsilon_r = 1$. Pour les matériaux usuels (plastiques, bois, verre, ...), ϵ_r varie entre 1,5 et 6, mais pour l'eau, constituant majoritaire du vivant, $\epsilon_r = 78$! Or, la constante diélectrique gouverne la polarisabilité des molécules, et cela, on s'en doute, a une grande importance pour la réponse d'un organisme vivant à une onde électromagnétique qui l'irradie.

Rapidement, les scientifiques ont découvert que deux charges de même signe se repoussent, alors que deux charges de signes opposés s'attirent, et aussi que la force de répulsion (ou d'attraction) est proportionnelle au produit des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. C'est ce que l'on appelle la « loi de Coulomb ». On explique cela en disant qu'une charge électrique (ou un ensemble de charges) crée dans son environnement une *perturbation de l'espace* appelée « champ électrique » que nous notons **E**. Le caractère gras signifie que nous avons affaire à ce que les mathématiciens appellent *un vecteur* : c'est tout simplement un segment orienté (flèche). Il a une **intensité** (mesurée en volts par mètre), et aussi un **sens** : il est orienté dans une direction donnée. Par exemple, le champ généré par une charge ponctuelle positive est représenté par un ensemble de flèches dont l'origine commune est la charge et les extrémités pointent dans toutes les directions de l'espace (un genre *d'oursin sphérique*, si vous voulez). Entre les plaques d'un condensateur, le champ électrique est représenté par des flèches parallèles toutes identiques, qui partent de la plaque positive vers la plaque négative et perpendiculaires aux plaques. Le champ électrique **E** exerce sur un corps porteur d'une charge électrique q une force **F** (qui est elle-même un vecteur) : $\mathbf{F} = q \mathbf{E}$. Cette force est parallèle au champ électrique, ce qui veut dire que la particule chargée sera forcée de se mouvoir dans le même sens que le champ électrique **E** si q est positive, en sens inverse si q est négative. **A retenir, car ça peut se produire dans les organismes vivants !**

Un petit tour chez les atomes, les molécules et les ions.

Pourquoi parler ici des atomes, des molécules, et des ions? Simplement parce que les organismes vivants sont constitués d'atomes, de molécules et d'ions, c'est pourquoi, en vue de l'étude de l'impact des ondes sur le vivant, il est utile de rappeler quelques notions fondamentales sur ce sujet.

Depuis les découvertes en physique atomique et nucléaire de la fin du 19^e et du début du 20^e siècle, on sait que la matière est composée d'*atomes* (ou d'associations d'atomes appelées *molécules*). Une description ultra-simplifiée de l'atome peut se résumer à ceci : l'atome est constitué d'un *noyau central* entouré d'*électrons*. Le noyau central est composé de *nucléons*, qui sont des particules de deux sortes : les *protons* (porteurs d'une charge positive) et les *neutrons* (aucune charge). L'atome, l'électron et les nucléons, nul ne peut s'en faire une idée pratique tellement ils sont petits. A cette micro-échelle, en effet, la matière est composée de trous, de vide, et nos sens ne peuvent pas appréhender cette organisation bizarre. La seule science capable de s'en approcher s'appelle la *mécanique quantique*, mais pour le moment, on peut l'oublier... Donc, la matière est pleine de vide, comme vous allez le constater. L'atome le plus petit –celui de l'hydrogène– peut se représenter comme une minuscule bille de rayon environ $5 \cdot 10^{-11}$ m, soit environ 50 milliardièmes de millimètre. Le noyau de l'atome d'hydrogène est un unique proton, autour duquel tourne un unique électron. L'électron porte une charge électrique que l'on appelle *négative*, et le proton porte une charge électrique égale en valeur à celle de l'électron, mais que l'on qualifie de *positive*: les deux charges s'annulent et l'atome d'hydrogène est donc neutre du point de vue électrique. Les atomes plus complexes ont des noyaux qui comportent des neutrons en plus des protons, et ces neutrons ont une charge nulle (mais sont comparables aux protons). Comme tous les atomes de l'Univers, cet atome d'hydrogène a une charge électrique globale nulle (car les charges positives des protons et les charges négatives des électrons s'annulent). La taille (rayon) de l'atome d'hydrogène paraît vraiment petit, mais il y a encore plus étonnant : le proton, quant à lui, est une particule encore plus petite, dont la taille est estimée à environ un millième de milliardième de mètre (10^{-12} m). Si le noyau d'hydrogène était une boule de pétanque de diamètre 8 cm posée au centre d'un boulo-drome circulaire, ce dernier aurait un rayon de 4 kilomètres. Entre la boule et le bord du terrain, il n'y a que du vide : la matière, c'est du vide ! Et ne comptez pas sur l'électron pour remplir ça ! Si l'on persiste à vouloir voir les atomes, les nucléons et les électrons comme des billes, la bille que représente l'électron a un diamètre probablement plus petit que quelques fractions de milliardième de milliardième de millimètre (en fait, c'est très difficile à estimer avec précision).

On appelle *ion* un atome ou une molécule (assemblage d'atomes) qui a perdu (ion positif) ou gagné (ion négatif) un ou plusieurs électrons. L'arrachement d'un (ou plusieurs) électrons peut avoir une origine chimique, mais certaines ondes particulièrement violentes (comme les *rayons gamma*), ou des particules cosmiques rapides peuvent arracher des électrons des atomes ou des molécules. S'agissant d'organismes vivants, ça peut être très grave. Heureusement, les ondes téléphoniques ne peuvent pas le faire, c'est pourquoi nous parlerons d'elles comme de *rayonnements non-ionisants*. *Ces dernières ont cependant, à haute dose, des inconvénients sur lesquels nous reviendrons.*

b) Phénomènes magnétiques.

Contrairement à la théorie du champ électrostatique, il n'existe pas de formule simple pour calculer l'intensité du champ magnétique issu d'un *aimant permanent*. On connaît depuis des millénaires les aimants naturels qui attirent de petits objets en fer. Avec d'autres matériaux dits « ferromagnétiques » (fer, cobalt, nickel), on peut fabriquer de forts aimants permanents en exposant une pièce de ce métal à un champ magnétique intense (généralement créé par un électroaimant³) : quand on coupe le courant dans l'électroaimant, la pièce de métal conserve la faculté d'attirer des objets ferromagnétiques (elle est devenue un aimant permanent). La physique moderne sait désormais expliquer le phénomène (assez complexe, reconnaissons-le) du magnétisme, qui se décline en ferromagnétisme, ferrimagnétisme, diamagnétisme ou paramagnétisme, mais là n'est pas notre sujet. Les aimants ont été étudiés depuis longtemps, et on a constaté qu'un barreau (rectiligne) d'aimant posé sur une feuille de papier ou une plaque de bois était capable d'organiser de façon ordonnée de la limaille de fer. Les lignes de limaille semblent se diriger vers les extrémités du barreau. L'une d'elles est appelée « pôle Nord », l'autre « pôle Sud ». Ces lignes semblent définir un *champ de forces*, que l'on a appelé *champ magnétique*. On peut considérer les pôles comme les sources du champ magnétique, mais, contrairement au cas de l'électrostatique, où une seule charge (positive ou négative) peut exister et générer un champ électrique, il ne semble pas exister de *monopôle magnétique* : aucune expérience n'a réussi à montrer l'existence d'un pôle magnétique Nord isolé d'un pôle magnétique Sud, ou inversement, et la théorie semble le confirmer. L'unité de champ magnétique est le *Tesla* (symbole *T*). Le champ magnétique de la Terre varie, suivant la position sur le globe terrestre, entre 30 et 50 microteslas. Le *microtesla* est le millionième de Tesla : on le représente par le symbole μT , où la lettre grecque μ (prononcez *mu*) indique le millionième. Cela suffit pour orienter l'aiguille d'une boussole, mais pas pour déplacer de lourdes charges de fer. Pour cela, il faut des aimants permanents en alliage spécial (néodyme-fer-bore, par exemple). Un petit aimant fait dans cet alliage, de quelques cm^2 de surface de contact, peut soulever environ 1 kg de fer et son champ magnétique est de l'ordre de 0,2 Teslas. Pour des charges lourdes, il faut passer aux électroaimants, qui génèrent plus de 1 Tesla. Pour fixer les idées, les énormes électro-aimants (plus de 30 tonnes chacun) chargés de courber les trajectoires des protons dans le grand collisionneur du CERN produisent un champ de 8,2 Teslas. Quoiqu'il en soit, on peut représenter le champ magnétique par un vecteur (*segment orienté*), comme pour le champ électrique *E*. On symbolise traditionnellement le vecteur champ magnétique par la lettre **B**.

³ Un *électroaimant* est un *aimant artificiel* constitué par un noyau de fer dit « doux » entouré d'une bobine parcourue par un fort courant électrique. Voir plus loin pour les effets magnétiques d'un courant électrique.

c) Force de Laplace et force de Lorentz

Nous avons pour souci majeur non seulement la compréhension des phénomènes liés aux ondes électromagnétiques, **mais aussi leurs effets sur les organismes vivants**. C'est pourquoi nous devons ici encore examiner le comportement d'une charge électrique en présence de champs électromagnétiques (ondes composées d'un champ électrique et d'un champ magnétique), car les fluides biologiques contiennent énormément de particules (atomes ou molécules) électriquement chargées, appelées « ions », qui se meuvent au gré des rythmes biologiques. Il est donc intéressant de savoir qu'une petite particule (un atome ou une molécule) porteuse d'une charge q et qui reste immobile dans un champ magnétique \mathbf{B} ne subit aucune force, alors que si cette particule se déplace dans ce même champ magnétique, elle subit une force dite « *force de Laplace* ». Cette force de Laplace dépend de la charge et de la vitesse de la particule chargée. Cependant, il y a une particularité : si la particule va dans la même direction que le vecteur \mathbf{B} , c'est-à-dire si sa vitesse \mathbf{v} (que l'on représente elle aussi par un vecteur, car la vitesse est naturellement orientée), alors il n'y a pas de force de Laplace, ou plutôt : cette force est nulle. Elle est maximum, au contraire, si la vitesse \mathbf{v} de la particule est perpendiculaire avec le champ \mathbf{B} . La formule est un peu plus complexe que pour la force électrique. Voici un schéma (Figure 2-a) pour expliquer ce qui se passe :

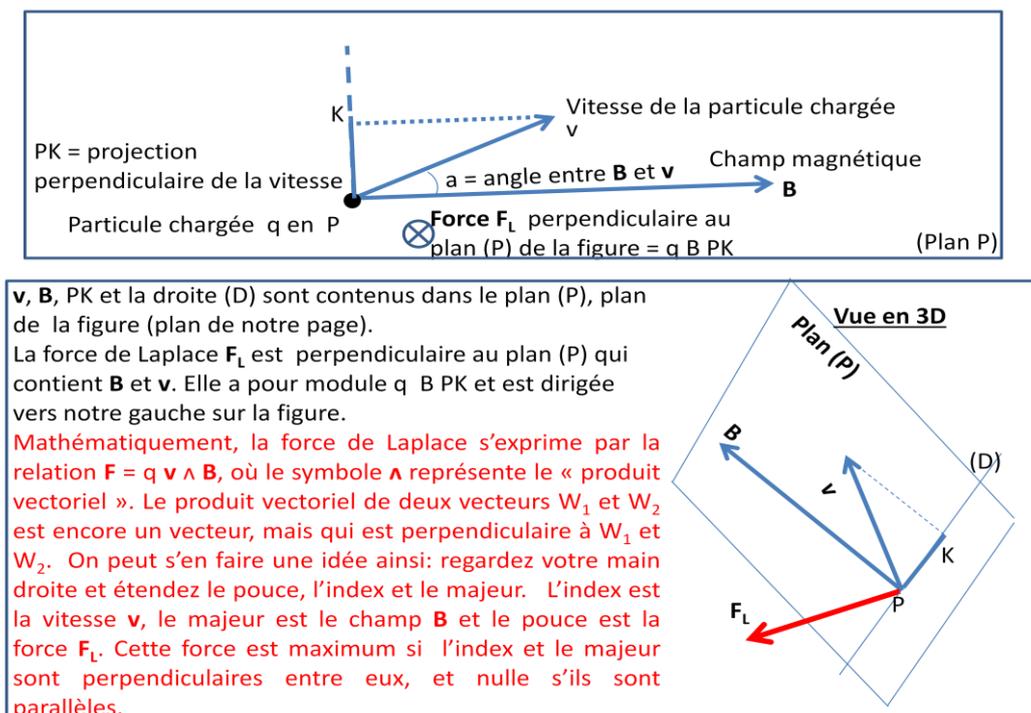


Figure 2-a : Description de la force de Laplace (le symbole \otimes indique un vecteur perpendiculaire au plan de figure).

La force de Laplace est un vecteur dont le module vaut :

$$F_L = q B PK \quad (4-a)$$

où PK (voir figure 2-a ci-dessus) est la projection perpendiculaire de la vitesse : on « rabat » \mathbf{v} sur la droite (D) en pointillée perpendiculaire au vecteur \mathbf{B} . Pour qui n'est pas allergique aux formules, l'expression de la force de Laplace est $F_L = q v B \sin(a)$. Enfin, alors que la force électrique était

orientée dans le même sens que le champ \mathbf{E} , la force \mathbf{F}_L est perpendiculaire à la fois à \mathbf{v} et à \mathbf{B} .⁴ Ici, elle est donc perpendiculaire au plan de la feuille.

Si de plus il y a un champ électrique, la particule chargée subit, en plus de la force de Laplace, une force électrique \mathbf{F}_{el} qui est dirigée dans le sens du champ électrique et vaut $q \mathbf{E}$. La résultante de ces deux forces (force de Laplace \mathbf{F}_L et force électrique \mathbf{F}_{el}) s'appelle « Force de Lorentz » \mathbf{F}_{Lo} :

$$\mathbf{F}_{Lo} = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_{el} \quad (4-b)$$

Attention : cette équation 4-b est une addition vectorielle. Ce n'est pas comme une simple addition arithmétique, mais ça n'est pas vraiment sorcier. Voyez ci-dessous deux vecteurs \mathbf{U} et \mathbf{V} . Pour simplifier, on les a mis dans le même plan, mais ils ne sont pas parallèles. Le vecteur \mathbf{W} est la somme vectorielle de ces deux vecteurs : $\mathbf{W} = \mathbf{U} + \mathbf{V}$ (figure 2-b).

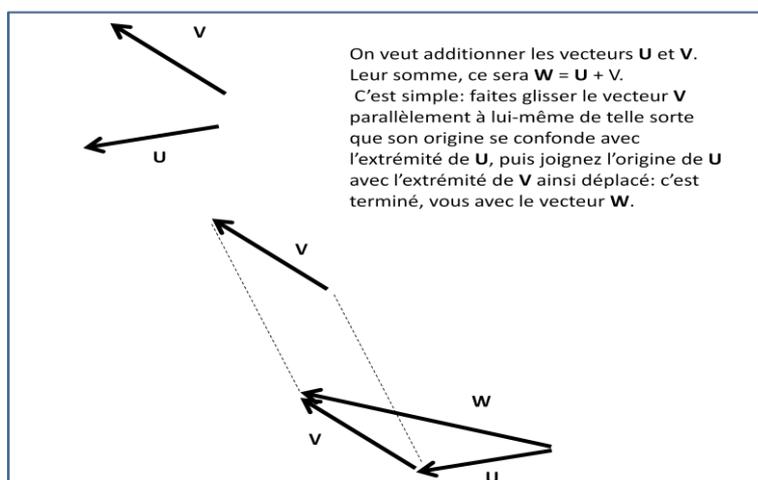


Figure 2-b : Addition de deux vecteurs, pas du tout sorcier ! Attention quand même: leurs longueurs ne s'additionnent pas comme en arithmétique.

Expression mathématique de la force de Laplace et de la force de Lorentz

Si le champ magnétique est représenté par le vecteur \mathbf{B} et si la vitesse du corps porteur de la charge q est représentée par le vecteur \mathbf{v} , la force de Laplace (vecteur \mathbf{F}_L) que subit le corps s'exprime par :

$$\mathbf{F}_L = q \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} \quad (5)$$

où le symbole \wedge représente le *produit vectoriel*. Rappelons que le produit vectoriel de deux vecteurs \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 est encore un vecteur, mais qui est perpendiculaire à \mathbf{W}_1 et \mathbf{W}_2 . On peut s'en faire une idée ainsi: regardez votre main droite et étendez le pouce, l'index et le majeur, et reprenons la formule 5. L'index représente la vitesse \mathbf{v} , le majeur est le champ \mathbf{B} et le pouce est la force \mathbf{F}_L . Cette force est maximum si l'index et le majeur sont perpendiculaires entre eux, et elle est nulle s'ils sont parallèles.

⁴ La force de Laplace explique pourquoi on peut forcer des particules chargées à tourner en cercle dans un cyclotron (comme le grand collisionneur du CERN). Sans entrer dans les détails complexes de ces appareils, ce comportement est, fondamentalement, dû au fait qu'une particule chargée qu'on lancerait perpendiculairement à un champ magnétique rectiligne et uniforme se mettrait à tourner en cercle autour d'une ligne parallèle au champ magnétique, comme un trapéziste autour de sa barre fixe.

S'il existe un champ électrique E en plus du champ magnétique, alors le corps subit une force dite « force de Lorentz », qui s'exprime par

$$\mathbf{F}_{Lo} = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \quad (6)$$

Nous devons nous souvenir de la force de Lorentz quand nous étudierons l'effet sur le corps humain d'un champ électromagnétique (association d'un champ électrique et d'un champ magnétique), car il existe énormément de particules chargées (ions) en mouvement dans l'organisme. On devine que l'effet n'est pas à négliger a priori, car ce champ électromagnétique peut fortement perturber les processus naturels !

d) *Calcul du champ magnétique créé par un courant électrique : loi de Biot et Savart*

On a dit que l'on ne connaît pas de loi simple pour calculer l'intensité du champ magnétique donné par un aimant permanent. Heureusement, cela n'est plus vrai pour les champs magnétiques créés par des courants électriques. On a mentionné plus haut une observation due au physicien danois Ørsted (1820), qui a prouvé que l'on peut générer un champ magnétique à l'aide d'un courant électrique. Ørsted avait remarqué qu'en approchant une boussole d'un fil parcouru par un courant électrique, l'aiguille dévie. Le courant électrique a donc créé quelque chose dans son environnement auquel la boussole est sensible : c'est donc un *champ magnétique*. Comme le courant électrique est constitué de charges électriques en mouvement, on en déduit que ce sont ces charges électriques qui, dans leur mouvement, génèrent un champ magnétique. Les physiciens français J. Biot et F. Savart ont établi une équation qui permet de calculer le champ magnétique généré par un conducteur électrique. En particulier, un fil conducteur rectiligne de grande longueur parcouru par un courant électrique d'intensité i , génère un champ magnétique dont les lignes de champ sont des *cercles concentriques* axés autour du fil. Le champ magnétique B est un *vecteur tangent aux cercles* en tout point, comme le montre la figure 3 ci-dessous, et l'intensité du champ magnétique en un point M sur un cercle de rayon $OM = r$ est donnée par la formule suivante :

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (7)$$

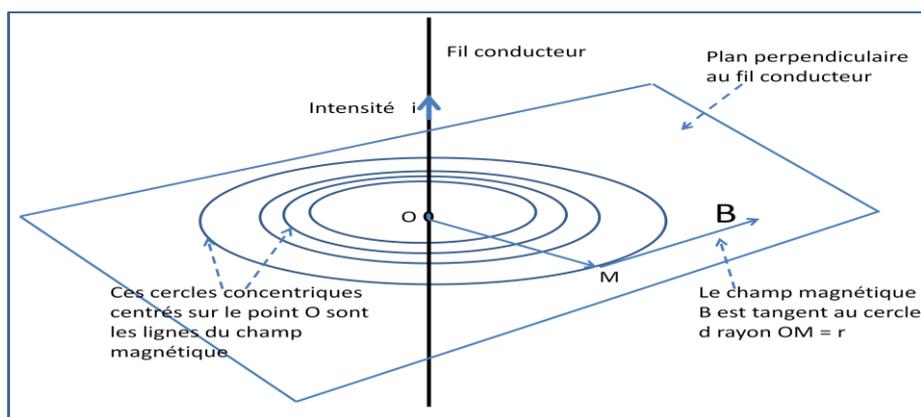


Figure 3 : Champs créés par un long fil conducteur

Le symbole μ_0 est la *perméabilité du vide*, qui vaut, dans le système international en vigueur, $4\pi 10^{-7}$ (l'unité de μ_0 est le Tesla mètre par ampère). Cette valeur est valable également pour l'air. Dans les divers milieux autres que le vide et l'air, la perméabilité peut changer.

Forme mathématique de la loi de Biot et Savart :

La formule précédente présente un cas simplifié : fil conducteur rectiligne et très long (supposé infini). Dans le cas général, il faudrait raisonner sur un fil de forme quelconque. Soit P un point de ce fil ; soit $d\mathbf{l}$ un élément de fil orienté ($d\mathbf{l}$ est un tout petit vecteur parallèle au courant au point P). Ce petit vecteur $d\mathbf{l}$ est centré sur le point P, et soit M un point de l'espace en lequel on veut calculer le champ magnétique \mathbf{B} . Soit enfin \mathbf{u} le vecteur unitaire qui oriente le vecteur $\mathbf{r} = \mathbf{PM}$. Le champ magnétique \mathbf{B} au point M, que nous désignons par $\mathbf{B}(M)$, est la somme vectorielle de toutes les contributions élémentaires $d\mathbf{B}$ générées par tous les éléments $d\mathbf{l}$ du fil. Chaque contribution élémentaire s'exprime par la relation:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{u}}{4\pi r^2} \quad (8)$$

Pour connaître le champ total \mathbf{B} au point M, il faut intégrer cette relation sur la totalité du fil conducteur, que nous désignons par (C) :

$$\mathbf{B} = \int_{(C)} \frac{\mu_0 i d\mathbf{l} \wedge \mathbf{u}}{4\pi r^2} \quad (9)$$

Il existe une formulation plus générale pour des cas complexes où les courants sont distribués non pas dans un fil, mais dans un volume. Nous n'examinerons pas ce cas ici.

e) Généralisation à des courants variables

Nous avons montré que les charges et des courants électriques peuvent générer des champs électriques et des champs magnétiques. Nous pouvons donc imaginer déjà le principe des antennes émettrices, sources de champs électriques et magnétiques. Un fil parcouru par un courant ferait donc l'affaire pour émettre une onde électromagnétique! Cela est vrai sur le plan du principe, *mais il y a un problème* : les formulations que nous avons mentionnées ici concernent l'action de courants *continus ou lentement variables*, alors que les courants qui génèrent les ondes ne sont *ni continus ni lentement variables*, mais varient au contraire à *des fréquences très élevées* ! Or, des formules comme la loi de Coulomb ou la loi de Biot et Savart ne sont vraies qu'en électrostatique, en magnétostatique ou pour des courants continus ou lentement variables. Le cas général des courants variables est traité par les **équations de Jefimenko** (Oleg Jefimenko était un physicien contemporain américain né en Ukraine), mais nous n'en dirons pas plus ici. Ce qui précède nous a permis de réaliser que des circuits électriques sont à même de *générer des champs électriques et magnétiques*. Nous reviendrons sur la description des antennes dans la suite de ce document. Venons-en maintenant à l'existence des ondes électromagnétiques.

f) Equations de Maxwell.

On a commencé notre exposé en expliquant que James Clerk Maxwell avait rassemblé tous les travaux de ses prédécesseurs : sur ce socle, il a bâti *l'électromagnétisme*, une discipline qui unifie électricité et magnétisme. Cette théorie est résumée sous la forme des *quatre équations fondamentales* ci-dessous, dites « *équations de Maxwell* ».

Les équations de Maxwell

Pourquoi montrer ces terrifiantes équations ici ? Même si nous ne les pratiquons pas dans ce document, on doit les saluer au passage : ce sont ces équations qui régissent les ondes électromagnétiques, y compris celles qui nous concernent. On peut néanmoins sauter ce passage si

on n'aime pas trop la physique !

Elles représentent les propriétés des champs électrique et magnétique en tout point M de l'espace et aussi à tout instant t, car à présent, ces champs dépendent non seulement de la position dans l'espace du point considéré, mais aussi du temps. Les symboles $\mathbf{B}(M,t)$ et $\mathbf{E}(M,t)$ représentent respectivement le champ magnétique et le champ électrique au point M de l'espace et à l'instant t.

$$\operatorname{div} \mathbf{B}(M, t) = 0 \quad (10)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}(M,t)}{\partial t} \quad (11) \quad (\text{Maxwell-Faraday})$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E}(M, t) = \frac{\rho(M,t)}{\epsilon_0} \quad (12)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B}(M, t) = \mu_0 \mathbf{j}(M, t) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(M,t)}{\partial t} \quad (13) \quad (\text{Maxwell-Ampère})$$

Le terme $\rho(M,t)$ représente la *densité de charge électrique* (charge électrique par unité de volume) au point M et à l'instant t. Son unité est le *coulomb par mètre cube* (Cm^{-3}). Le terme $\mathbf{j}(M,t)$ est le vecteur *densité de courant*, défini par l'intensité électrique locale qui passe à travers une surface unité. Le vecteur \mathbf{j} est orienté normalement à cette surface unité. L'unité de \mathbf{j} est l'*ampère par mètre carré* (Am^{-2}). On rappelle les définitions de $\operatorname{div} \mathbf{V}$ et de $\operatorname{rot} \mathbf{V}$ (en repère orthonormé):

Pour un vecteur \mathbf{V} de coordonnées (V_x, V_y, V_z) , $\operatorname{div} \mathbf{V}$ est la *divergence* de \mathbf{V} , définie par

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

$\operatorname{rot} \mathbf{V}$ est le vecteur *rotationnel du vecteur V*, dont les trois composantes sont :

$$\frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z}, \quad \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y}$$

4) Etablissement des équations des ondes électromagnétiques

Les équations de Maxwell sont complexes et leur résolution, dans le cas général, ne l'est pas moins. Il faut généralement utiliser des méthodes numériques pour en venir à bout, mais nous n'aurons pas ici à nous en préoccuper ! En effet, ce qui va nous intéresser, c'est que les équations de Maxwell permettent de prévoir l'existence de perturbations électromagnétiques en présence de courants électriques variables: les *ondes électromagnétiques*.

Nous allons ici nous restreindre au cas de la propagation dans le vide (ou dans l'air). En l'absence de charges électriques ($\rho = 0$) et de courants électriques ($\mathbf{j} = 0$) dans le milieu étudié⁵, les équations précédentes se simplifient et deviennent:

$$\operatorname{div} \mathbf{B}(M, t) = 0 \quad (14)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}(M,t)}{\partial t} \quad (15)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E}(M, t) = 0 \quad (16)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B}(M, t) = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(M,t)}{\partial t} \quad (17)$$

⁵ Il est évident que la condition d'absence de courants électriques est valable *sur le trajet de l'onde*, mais certainement pas dans l'*antenne émettrice* : sans courant, pas d'ondes émises !

On va déduire de ces équations que les champs **E** et **B** se propagent comme des *ondes lumineuses*, à la vitesse de la lumière $c = 300\,000$ kilomètres par seconde ($3 \cdot 10^8$ m/s). En fait, la lumière n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique, et toutes ces ondes diffèrent par leurs fréquences.

Pour montrer le caractère ondulatoire des champs **E** et **B**, on considère tout d'abord l'équation 15 et on prend le rotationnel des deux membres.

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{E}) = -\text{rot}\left(\frac{\partial \mathbf{B}(M, t)}{\partial t}\right)$$

On va utiliser une relation classique entre opérateurs d'analyse vectorielle :

$$\text{rot}(\text{rot}) = \text{grad}(\text{div}) - \Delta$$

où **grad** est l'opérateur « gradient », de composantes $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$ en coordonnées cartésiennes, et Δ est l'opérateur « laplacien vectoriel ». Le laplacien d'une grandeur scalaire $f(M) = f(x, y, z)$ quelconque (dont les dérivées secondes existent) est défini par la relation suivante, en coordonnées cartésiennes :

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Le Laplacien d'un vecteur **Z** est tout simplement *un autre vecteur* dont les trois composantes sont constituées par les laplaciens scalaires des composantes du vecteur **Z**.

On obtient, en inversant au second membre l'ordre des opérateurs indépendants $\frac{\partial}{\partial t}$ et **rot** :

$$\text{grad}(\text{div } \mathbf{E}) - \Delta \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \mathbf{B}$$

Au premier membre, $\text{div } \mathbf{E} = 0$ d'après (16) et au second membre, $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(M, t)}{\partial t}$ d'après (17)

$$\text{Finalement, on obtient } \Delta \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Or, l'équation générale d'une onde est celle-ci : toute grandeur $X(M, t)$ qui satisfait l'équation

$\Delta X = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 X}{\partial t^2}$ représente une onde qui se propage avec la vitesse v . Ici, en posant $\mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2}$, on obtient :

$$\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (18)$$

En faisant de même avec l'équation (17), on trouverait :

$$\Delta \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (19)$$

La grandeur c est homogène à une vitesse, et sa valeur est la *vitesse de la lumière* :

$$c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2} = (4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12})^{-1/2} = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s (à peu près } 300\,000 \text{ km/s)}$$

Les champs **E et **B** se propagent donc dans le vide (et dans l'air) à la vitesse de la lumière.**

Résumons pour les lecteurs qui ont sauté les passages en rouge: en manipulant un peu les équations de Maxwell, on peut arriver à montrer l'existence d'ondes électromagnétiques. Le vecteur champ électrique **E** et le vecteur champ magnétique **B** *se propagent à la vitesse de la lumière*. La lumière n'est qu'un cas particulier d'onde électromagnétique.

En 1888, le physicien allemand Heinrich Hertz met en évidence l'existence de ces ondes prédites par Maxwell plus de 20 ans auparavant : *bravo Maxwell, c'était bien vu !* Ouf ! La téléphonie mobile va pouvoir apparaître...

A partir de maintenant, nous allons adopter les conditions des ondes issues des antennes-relais, en nous plaçant à distance de l'antenne. Dans un *milieu homogène et isotrope*⁶ comme le vide (ou l'air), à une certaine distance de l'émetteur (antenne), les ondes sont localement planes. La surface d'onde ici est un *plan d'onde*, une surface plane qui contient les champs **E** et **B**. On vérifie que ces champs ont une seule composante, qui est donc contenue dans le plan d'onde. Les ondes émises par les antennes-relais sont dites « *polarisées rectilignement* », c'est-à-dire que les vecteurs **E** et **B** gardent une orientation fixe dans le plan d'onde. Seule leur amplitude varie, et ils sont en permanence perpendiculaires entre eux. Ils vibrent en phase, et on peut montrer que les amplitudes E et B des vecteurs **E** et **B** sont reliées par une relation simple, qui est $E = B c$. Donc, il suffit de connaître E pour connaître B et inversement. On se contentera donc du champ **E** pour décrire le champ électromagnétique. La figure 4 décrit cette disposition.

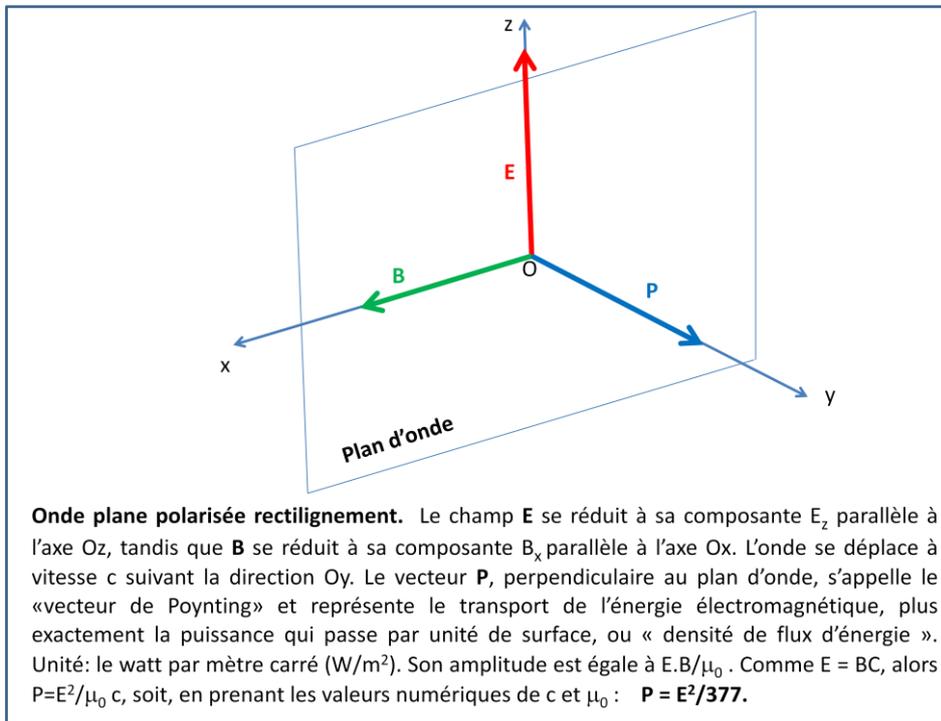


Figure 4 : Structure d'une onde électromagnétique plane : c'est le cas d'une onde issue d'une antenne-relais en se plaçant à quelques dizaines de mètres de l'antenne.

Le champ **E** se réduit à sa composante E_z tandis que **B** se réduit à sa composante B_x . Le plan d'onde se déplace à la vitesse de la lumière c suivant la direction Oy. Le vecteur **P**, perpendiculaire au plan d'onde et donc parallèle à l'axe Oy, s'appelle le «*vecteur de Poynting*» (du nom du physicien anglais John Poynting) et représente le transport de l'énergie électromagnétique, plus exactement la puissance qui passe par unité de surface, ou « *densité de puissance* » (sous-entendu : densité surfactive de puissance). Unité: le watt par mètre carré (W/m^2). Son amplitude P (on dit aussi sa

longueur ou son module) est égale à $\frac{E \cdot B}{\mu_0}$. Or, $E = Bc$, il s'ensuit donc que $P = \frac{E^2}{\mu_0 c}$ (20-a)

Soit encore, en prenant les valeurs numériques des constantes μ_0 et c :

⁶ Un milieu est dit *homogène* si ses propriétés sont uniformes en tout point. Il est dit *isotrope* si ses propriétés ne dépendent pas de la direction de l'espace. C'est le cas du vide et, avec une bonne approximation, c'est aussi le cas de l'air.

$$P = \frac{E^2}{377} \quad (20-b)$$

Si E est en V/m , alors P est en W/m^2 . Retenons bien cette notion de densité de puissance, nous en aurons besoin quand nous en viendrons aux antennes-relais. Retenons aussi que le champ électromagnétique issu d'une antenne relais est *polarisé*. Si le champ électrique E possède une orientation verticale, on dit que l'onde est *polarisée verticalement*. Parfois, pour de meilleures conditions de réception sur les téléphones mobiles, l'opérateur se débrouille pour qu'il y ait une double polarisation (les champs E sont alors orientés obliquement par rapport à la verticale et sont symétriques l'un par rapport à l'autre).

L'image ci-dessous illustre la manière dont les ondes électromagnétiques se propagent, les champs E et B restant solidaires. Plus précisément, cette image représente l'onde plane non perturbée.

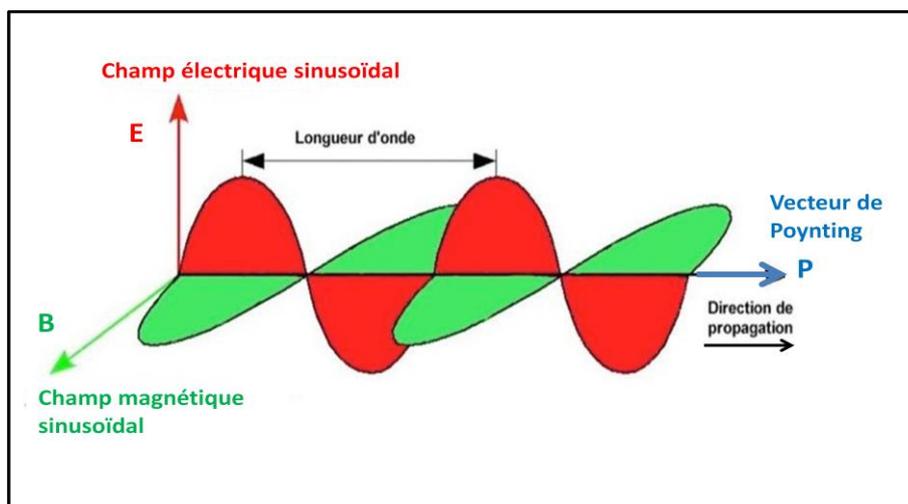


Figure 5 : Schéma de la propagation de l'onde plane non perturbée.

4) Les fréquences (ou *spectre*) des ondes électromagnétiques.

L'unité de fréquence (pour tous les types d'ondes, mécaniques ou électromagnétiques) est le *hertz* (symbole : Hz), déjà mentionné au paragraphe 2. Le scientifique allemand méritait bien cet honneur ! **Une fréquence de 1 Hz correspond à une vibration d'un cycle par seconde. En électromagnétisme, on utilisera plutôt le mégahertz (MHz) : 10^6 Hz, soit un million de cycles par seconde, ou le gigahertz (GHz) : 10^9 Hz, soit un milliard de cycles par seconde.** Il est utile de montrer la variété des ondes électromagnétiques en ce qui concerne les fréquences :

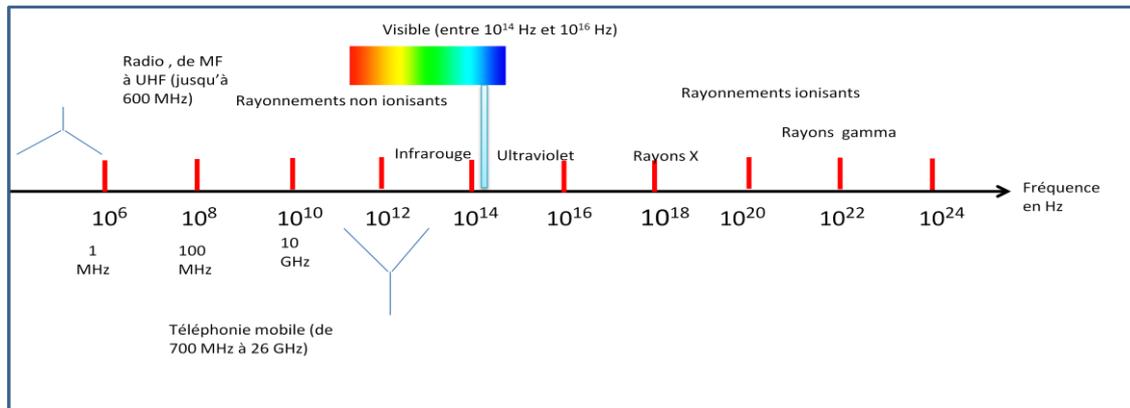


Tableau des fréquences (spectre électromagnétique)

Les fréquences des ondes issues des antennes-relais, qui vont nous occuper dans la suite de ce document, varient entre 700 MHz et (pour l'instant) 3,5 GHz pour la 5G dite « cœur de cible », mais la 26 GHz est déjà à l'essai, et on s'attend à 60 GHz, voire plus...**Convention** : dans la suite de ce document, nous utiliserons l'abréviation **RF (radiofréquences)** pour désigner les ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre 700 MHz (0,7 GHz) et plusieurs gigahertz (GHz) ; l'abréviation **CEM** désigne le champ électromagnétique, et **OEM** désigne l'onde électromagnétique.

Remarque: un point de terminologie. Le vecteur **B** que nous avons appelé « champ magnétique » est associé à un autre champ vectoriel, le vecteur **H**, défini (dans le vide ou l'air) par la relation $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}$. Ce vecteur **H** est appelé *excitation magnétique*. Il faut savoir que selon certains auteurs, c'est ce même champ **H** qui est appelé « champ magnétique » et le champ **B**, qui est défini par la relation $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, est appelé « vecteur induction magnétique ». On rappelle que le terme μ_0 est la perméabilité du vide. Cependant, nous pouvons oublier tout cela dans la suite de ce document, et ce n'était que pour rassurer le lecteur qui tomberait, au cours de ses lectures, sur cette confusion possible. Dans la suite de ce texte, le symbole **B** représente le *champ magnétique*.

5) Un mot sur l'effet de peau : à la frontière de la science et du mensonge.

Une onde électromagnétique arrivant sur un matériau solide et conducteur (électrique) subit généralement une réflexion sur sa surface, mais la question est de savoir si cette OEM peut pénétrer dans ce milieu et si oui, de combien (à quelle profondeur). En tant que telle, une OEM ne peut pas se propager dans un matériau conducteur. Cependant, les calculs et l'expérience montrent qu'il peut y avoir un *courant induit* dans le milieu, et que la pénétration de ce courant est d'autant plus faible que la fréquence de l'onde incidente est élevée. On définit la *profondeur de pénétration* comme étant l'épaisseur **d** de matériau à partir de laquelle le courant généré par l'onde, maximum en surface, est divisé par 3^7 . On conçoit qu'à une profondeur de quelques **d**, le courant est pratiquement nul, car à chaque étape il est divisé par presque 3: le matériau, dans son ensemble, n'est pas affecté par l'onde. La valeur de **d** est donnée par la formule $d = \frac{k}{\sqrt{f}}$, où **k** est une constante qui dépend de la conductivité électrique du matériau et **f** est la fréquence de l'onde incidente. Ainsi, pour le cuivre, une onde de fréquence 1 MHz pénètre de $d = 66 \mu\text{m}$ (66 micromètres, soit 0,066 mm), alors que pour une fréquence de 1 GHz, la profondeur de pénétration

⁷ Exactement, par le nombre $e = 2,71828 \dots$, qui est la base des logarithmes naturels, mais on peut oublier ce détail...

est faible : $d=2 \mu\text{m}$ (deux millièmes de millimètre). Pour $f=3,5 \text{ GHz}$, on obtient environ $1 \mu\text{m}$. Cela fait dire aux *thuriféraires de la 5G* que les fréquences utilisées (3,5 GHz) ne nous font courir aucun danger. Le problème, qui a dû sans doute leur échapper, c'est que *la peau, les muscles, les feuilles des arbres ou les insectes sont rarement en cuivre*, et ils ignorent (ou feignent d'ignorer) que les biologistes ont mis en avant des mécanismes qui pourraient faire que la pénétration des OEM soit importante. Ainsi, par exemple, le Pr Martin Pall (Université de Washington) met en avant le fait que la composante magnétique de l'OEM peut pénétrer en profondeur. Citons-le : « *Les champs magnétiques exercent des forces sur des groupes mobiles électriquement chargés dissous dans les phases aqueuses du corps et de petits mouvements individuels des groupes chargés peuvent régénérer des champs électriques essentiellement identiques aux champs électriques des CEM originaux, portant la même fréquence et la même pulsation, mais avec une intensité plus faible.* ». Un autre mécanisme pourrait être basé sur des messages envoyés profondément dans l'organisme par les cellules superficielles attaquées par l'onde. Donc, si vous entendez que les CEM de très hautes fréquences ne pénètrent pas dans les organismes vivants, ***n'en croyez rien : il s'agit d'un mensonge !***

B - Les antennes-relais téléphoniques.

1) Brève description technique des technologies mobiles- Réseau d'antennes et générations.

Avant toute chose, et indépendamment de tous dangers sanitaires ou sociétaux que l'on peut identifier, il faut reconnaître que le développement de la téléphonie mobile est, sur le plan des avancées technologiques, tout à fait remarquable. Malheureusement, nous devons admettre, à côté de certains aspects indéniablement positifs, que les points négatifs de cette technologie pèsent et pèseront très lourd sur nos sociétés dites « avancées ». Le drame est que le poids économique de cette industrie et l'influence des lobbies ont nettement plus d'effet que les appels à la raison et à la sagesse numérique, lesquels se manifestent malgré tout de plus en plus.

a) Comment tout ça a commencé...

La téléphonie mobile « grand public » est née dans les années 1970 (si l'on excepte les talkies-walkies et la CB « Citizen Band », et bien sûr les appareils de radio militaires). On admet en général que le *premier vrai téléphone portable* a été inventé par la firme Motorola en 1973: cet appareil s'appelait le DynaTac 8000. C'était un vrai bijou de technologie pour l'époque, mais il avait quelques défauts: lourd (environ 1 kg), encombrant (25 centimètres), cher (près de 3400 dollars), une autonomie de moins d'une heure et un temps de recharge de presque une demi-journée: il n'a pas connu de succès commercial. Une décennie plus tard, les téléphones vraiment « de poche »⁸ sont apparus. Il est commode de graduer les progrès constants de ces appareils en parlant de *générations* : 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, et bientôt peut-être 6G, etc.,... Ce cheminement s'appuie sur le développement concomitant du *réseau de téléphonie cellulaire*, que nous définissons ci-dessous.

⁸ Attention cependant : un téléphone mobile dans une poche peut endommager gravement certains organes sensibles situés à proximité!

b) Le réseau de téléphonie cellulaire

Ce réseau est la condition indispensable pour que l'heureux possesseur d'un téléphone portable qui téléphone depuis sa voiture (en espérant qu'il est passager) ne soit pas « coupé » en passant d'une région à l'autre⁹. Plus généralement, il s'agit de s'adapter à la demande des clients, en faisant en sorte que le téléphone « passe » partout et plus généralement pour que les objets connectés (nous revenons sur ce point dans la suite du document) fonctionnent. Tout appareil personnel (téléphone, tablette, ...) ayant une puissance limitée, il convenait d'aménager l'offre de connexion. Pour cela, le territoire est subdivisé en *cellules* de forme hexagonale et de tailles différentes suivant la position géographique de la cellule (ville ou campagne, population dense ou faible). La figure 6 schématise cette disposition. De là vient le nom de « *téléphone cellulaire* ».

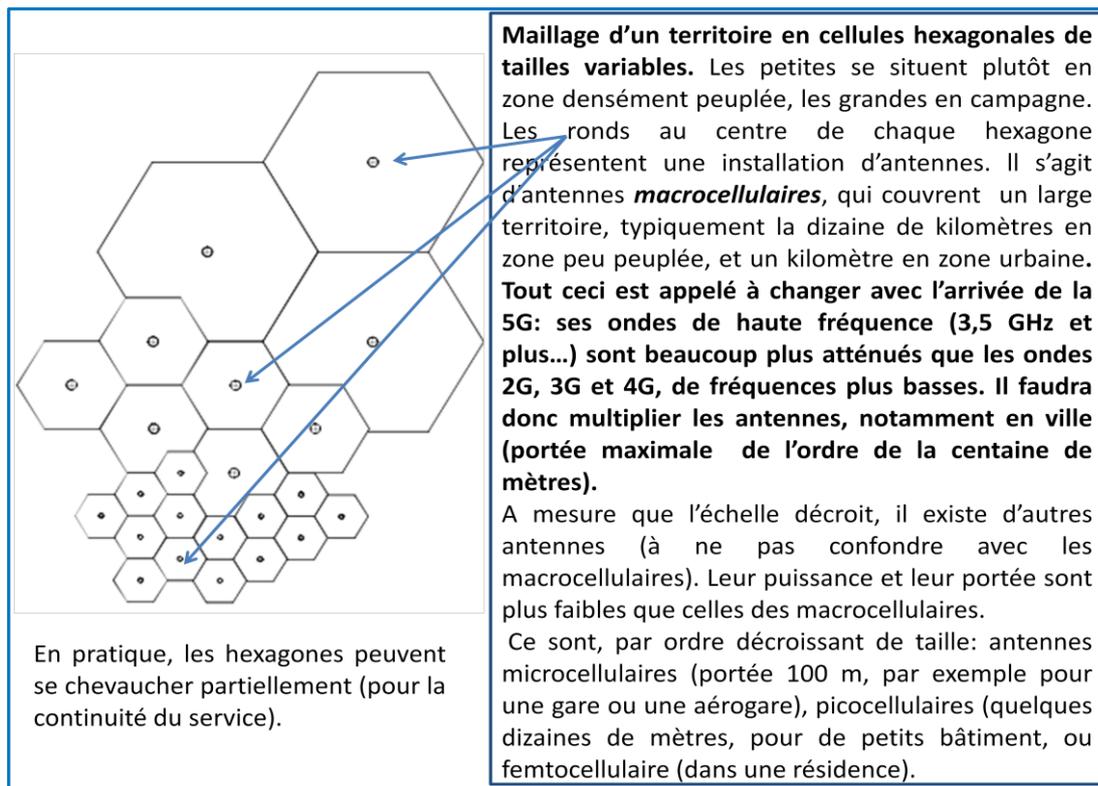


Figure 6: Représentation schématique du réseau cellulaire : subdivision du territoire en cellules de tailles adaptées.

Dans cette figure, on a mentionné les antennes microcellulaires, picocellulaires et femtocellulaires. On aurait pu dire : petites, très petites, extrêmement petites. C'est à prendre au sens figuré. En toute rigueur, voici la liste des préfixes pour le petit, le tout petit, le vraiment tout petit, l'infiniment petit, etc. : déci = 1 dixième ; centi = 1 centième ; milli = 1 millième ; micro = 1 millionième ; nano = 1 milliardième ; pico = 1 millième de milliardième ; femto = 1 millionième de milliardième ; etc....

⁹ Téléphoner en voiture ou en train, c'est justement l'erreur que commettent bien des gens : comme l'appareil connecté recherche toujours la meilleure antenne en émettant sans relâche, l'irradiation du cerveau est maximale dans ce cas.

c) Technologie analogique et technologie numérique.

La première génération de téléphonie mobile (1G) était basée sur une technologie dite « *analogique* ». Elle a été abandonnée au début des années 2000. Les générations suivantes seront « *numériques* », mais cela mérite une explication préalable quant à la définition des termes *analogique* et *numérique*.

Dans les télécommunications en technologie *analogique*, le signal (voix, musique, images) est transmis par une onde porteuse dont l'amplitude ou la fréquence sont *modulées*, c'est-à-dire modifiées de façon à reproduire le signal à transmettre. Au départ, il existe une onde pure, dite « *sinusoïdale* »¹⁰, qui ne transporte aucune information, sauf sa propre existence. Le signal à transmettre (la voix, par exemple) est d'abord transformé en signal électrique (tension) par un microphone. Cette tension est proportionnelle (c'est-à-dire *analogue*) au signal à transporter, d'où le nom d'« *analogique* ». Ce signal *analogique* est ensuite *superposé* à l'onde porteuse. Ce processus va *moduler*, c'est-à-dire *modifier* l'onde porteuse, soit en amplitude (AM : *modulation d'amplitude*), soit en fréquence (FM : *modulation de fréquence*). A la réception, le signal est « *démodulé* » (opération inverse) pour restituer la voix. On comprend que si des signaux parasites se superposent à l'onde porteuse modulée par le signal, la fidélité du signal reçu ne sera pas bien assurée. Ce type d'onde se retrouve dans les émissions de radio ou TV en AM ou FM.

En technologie numérique, la voix (pour garder le même exemple) est convertie grâce à un système électronique appelé : « *convertisseur analogique-numérique* » (CAN). Supposons que l'on parle devant un microphone : le signal est transformé par le microphone d'abord en une tension électrique sortant de ce micro. Ce signal *analogique* entre dans le CAN et il y est converti en un format dit « *numérique* », c'est-à-dire en une série de 0 et de 1 (*codage en système binaire*). Le CAN découpe le signal *analogique* issu du microphone en bandes plus ou moins étroites et l'amplitude est convertie en langage binaire. Ainsi, le signal découpé (numérisé) devient invulnérable aux parasites, contrairement au signal *analogique*. En effet, contrairement au signal *analogique* dont l'amplitude (la hauteur) doit ressembler aussi fidèlement que possible au phénomène qu'il est censé représenter, la série de 0 et de 1 ne sera pas perturbée même si des parasites s'en mêlent : ils seraient bien incapables de changer des 0 et 1 ou inversement ! A la sortie de ce convertisseur, la transformation qu'il a subie, c'est aussi une modulation, mais la modulation, dans ce cas, prend la forme de « *pulses* », d'apparence fort irrégulière, dont la forme dépend du signal véhiculé, la voix dans notre exemple : hauteur, débit, ... On appelle ceci une « *multipulsation chaotique* ». Ce signal est envoyé à l'émetteur pour être combiné à la porteuse *sinusoïdale*, puis enfin envoyé à l'antenne, qui le véhicule vers le récepteur (téléphone, par exemple), où il subit les opérations inverses et l'on peut alors entendre la voix ! Précisons que les antennes téléphoniques (à l'exception de la 3G) émettent des ondes *pulsées*, même en l'absence de signal à transmettre, c'est-à-dire que l'onde porteuse (*sinusoïde pure*), est modulée par des *pulses*, c'est-à-dire des signaux « *rectangulaires* », envoyés à intervalles réguliers, et la fréquence d'envoi de ces *pulses* est de quelques centaines de Hz seulement. C'est ce que l'on appelle de la « *très basse fréquence* » (c'est en effet très bas, quand on compare aux centaines de MHz ou aux GHz de la porteuse !). A l'exception de la 3G, donc, ces *pulses* existent même quand on n'envoie aucun signal.

Résumons : une OEM issue d'une antenne-relais ou d'un téléphone mobile est constituée d'une porteuse à très haute fréquence, éventuellement modulée par une *pulsation de basse fréquence* (dans les 200 Hz), et enfin, d'une pulsation qualifiée de « *multipulsation chaotique* », qui porte les informations à transmettre. Le document sur la biologie donnera des détails sur les dangers d'une telle configuration.

¹⁰ C'est le type d'onde la plus simple. Elle est identique à celle qui est représentée sur la figure 1_a.

Reprenons l'examen de la suite des générations téléphoniques.

Première génération (1G) : mode *analogique*. En France, il y avait le réseau Radiocom 2000 (1986). Uniquement pour appels vocaux (pas encore de SMS, MMS, photos, vidéos, etc.... : tout cela devra attendre les générations suivantes!)

La seconde génération (2G), est la première en mode *numérique*. Elle apparaît vers 1990. Le réseau transmet la voix et les premiers SMS, voire des MMS¹¹ et même un peu d'internet. C'est avec la 2G qu'apparaissent deux grandes innovations : les réseaux cellulaires (*vus ci-dessus*) et la carte SIM (*voir encadré plus bas*). Les téléphones sont enfin de taille réduite, et pas trop chers... Plus rapide et moins onéreuse que la 1G, cette génération 2G a évolué longtemps : 2G, puis, 2G+, et enfin 2,75G, qui est quasiment déjà une 3G. Diverses normes¹² qui vont se succéder : GSM, CDMA, TDMA, GPRS ou enfin, EDGE. Le débit maximum initialement de moins de 10 kbps, va passer à plus de 300 kbps (*sur le débit, voir encadré plus bas*). Les fréquences utilisées sont dans les bandes 900 MHz et 1800 MHz.

Avec la troisième génération (3G, en 2001) apparaît le *haut débit mobile*. On peut naviguer sur Internet, télécharger et même visionner en direct (*streaming*) des vidéos, accéder à la TV, jouer en ligne avec des amis ou à la Bourse, envoyer des documents de quelques mégaoctets (*voir encadré plus bas*). Cette génération aussi a connu plusieurs améliorations. D'un débit de 144 kbps, on passe ainsi à une moyenne de 10 Mbps. L'internet haut débit était né. Bien sûr, la 3G n'a pas fait disparaître la 2G, qui survit encore de nos jours (2022). La norme régissant la 3G s'appelle UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Les fréquences utilisées sont dans les bandes 900 MHz, 1900 MHz et 2100 MHz.

La quatrième génération (4G, en 2012) fait tout ce que sait faire la 3G, mais *beaucoup plus vite*. On parle alors d'*internet à très haut débit*. Le nom de la norme qui la gouverne est LTE (Long Term Evolution). Son débit théorique maximum est donné pour 150 Mbps, voire même 1 Gbps (1 milliard de bps) pour la norme « LTE-advanced » (parfois appelée 4G+), mais cela semble plutôt de la publicité. En pratique, on constate une moyenne de 40 Mbps, ce qui est déjà fort correct ! Les fréquences utilisées sont dans les bandes 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz, 2100 MHz et 2600 MHz.

La cinquième génération ou « 5G » : voir plus bas, nous lui réservons un traitement spécial...

Définissons, avant de poursuivre, quelques termes: que signifie le *débit* d'un réseau, dont nous venons de parler ci-dessus ? Qu'est ce que la *carte SIM* ? Comment mesure-t-on la *taille* d'un document numérique ? Qu'entend-on par *largeur de bande* et par *bande passante* ? Qu'est-ce réellement qu'une *zone blanche* et pourquoi il faut *en conserver sur le territoire* ?

Débit

Un réseau informatique se caractérise notamment par la quantité d'informations qu'il peut passer en une seconde. Nous avons vu plus haut que dès l'apparition de la 2G, le codage est en binaire. Nous sommes habitués au système décimal, où il y a 10 chiffres, *de zéro à neuf*. Dans le *système binaire*, moins habituel, il y a seulement deux chiffres: *le zéro et le un*. En électronique, c'est

¹¹ SMS = « Short Message Service » = envoi de textes. Le MMS (= Multi Messaging Service) améliore le service SMS en permettant aussi l'envoi de documents (photo, vidéos, ...).

¹² En télécommunications, le mot « norme » (ou *standard*) fait référence aux exigences techniques ou réglementaires auxquelles doit satisfaire le réseau.

particulièrement commode : 0 pour interrupteur ouvert, 1 pour interrupteur fermé, par exemple. Les nombres, les symboles alphabétiques, tout peut être traduit en binaire. Un texte peut se transformer en binaire. Une image ou une symphonie, une chanson, tout cela, convenablement scanné et subdivisé en « pixels » ou éléments de plus en plus petits, ça fait un gros document (voir encadré plus bas), mais ça restitue fidèlement l'original. La quantité d'information qui peut passer dans un réseau peut ainsi se représenter par la quantité de zéros et de 1 qui passent dans ce réseau. La plus petite unité d'information s'appelle le *bit*, un mot anglais qui est la contraction de « *binary digit* » (le mot anglais *digit* renvoie au latin *digitus* : le doigt, car le doigt est en effet notre premier ordinateur quand on a appris à compter... sur les doigts !). Le bit prend donc seulement *deux valeurs possibles* : le zéro ou le un (ou l'une des deux valeurs logiques : *vrai* ou *faux*). Le débit d'un réseau est simplement la vitesse de transmission de l'information. On la mesure en *kilobits par seconde* : mille bits par seconde, en abrégé : le *Kbps*. Les multiples sont le *Mbps* (*mégabits par seconde* : le million de bits par seconde), le *Gbps* (*gigabits par seconde* : le milliard de bits par seconde). On en est là pour l'instant (2022). La *fibres optique* en est au *Gbps*, de même (en principe) que la 5G haut débit. **Un point important : plus la fréquence de l'onde est élevée, plus le débit est important.**

Carte SIM

C'est l'âme du téléphone portable. L'acronyme SIM signifie (en anglais) *Subscriber Identification Module*, soit, en français : *Module d'identification du souscripteur*. C'est une minuscule *puce* (circuit intégré) qui contient les informations relatives à l'abonné. A travers cette carte, l'opérateur reconnaît l'abonné (sécurité) et lui ouvre ses services. C'est un véritable ordinateur microscopique qui en possède les fonctionnalités. Aucun téléphone portable ne peut fonctionner sans elle. Elle peut migrer d'un téléphone portable vers son successeur quand on change d'appareil.

Taille des documents numériques (à connaître pour estimer la possibilité de transfert par internet)

Maintenant que l'on connaît le « bit », voici l'*octet*. Ce mot désigne *un ensemble de 8 bits* (des zéros et des 1). On l'utilise comme unité de mesure de la taille en informatique. On l'appelle aussi le *mot élémentaire*. Un octet permet de représenter 256 combinaisons différentes, ce qui permet de représenter les 10 chiffres de notre système décimal, les lettres de nos alphabets avec leur accentuation, et les signes de ponctuation. Dans un ordinateur, le *microprocesseur* (c'est l'âme de l'ordinateur) traite des informations sous forme de « mots » soit de deux octets (16 bits), soit de quatre octets (32 bits), soit de huit octets (64 bits), etc., suivant le système d'exploitation de la machine. La taille d'un fichier informatique est comptée en octets, ou plutôt en multiples de l'octet : kilooctets (1000 octets, symbole Ko), mégaoctets (million d'octets, Mo), gigaoctets (milliards d'octets, Go), téraoctets (mille milliards d'octets, To), pétaoctets (un million de milliards d'octets, Po), exaoctets (un milliard de milliards d'octets, Eo), ...On trouve couramment dans le commerce des disques informatiques pour PC ou Mac qui peuvent contenir plusieurs téraoctets à des prix très abordables. Ne parlons pas encore du Zettaoctet (mille exaoctets) ou du yottaoctet (un million d'exaoctets), on n'y est pas encore, mais ça va venir....

Un fichier d'un mégaoctet représente 8 mégabits. On peut donc, en principe, connaissant le débit de notre réseau, calculer combien de temps prend le transfert d'un tel fichier en fonction de la technologie (2G, 3G, etc.) - mais par expérience, on sait que ce temps dépend aussi de l'encombrement du réseau ! Les opérateurs donnent des capacités de transfert parfois optimistes...

Largeur de bande et bande passante.

Ces notions sont très importantes en télécommunications. Nous avons vu que chaque technologie (2G, 3G, etc....) utilise des fréquences données. En fait, l'émission des ondes ne se passe pas exactement sur une fréquence unique, de même qu'un son pur n'existe pas : le son, comme l'émission, se manifeste sur une certaine *largeur spectrale*, c'est-à-dire sur un certain intervalle de

fréquences. *Plus la bande est large, plus il passe de données*, mais attention : un émetteur possède des performances limitées à partir d'une certaine fréquence. Il est efficace dans un certain intervalle de fréquences, disons : entre f_1 et f_2 , mais, en dehors de ces valeurs (si la fréquence est inférieure à f_1 ou, au contraire, supérieure à f_2), il devient moins bon. C'est là qu'intervient la notion de *bande passante*. Par définition, la *bande passante* représente l'*intervalle de fréquences* dans laquelle le signal passe de façon satisfaisante. D'autre part, chaque opérateur n'est pas seul à s'intéresser à une certaine bande de fréquences, il va devoir partager. Donnons un exemple. Nous avons parlé de la bande des 1900 MHz pour la 4G. Or, en France, nous bénéficions (?) de la présence de quatre opérateurs téléphoniques : Orange, Free, Bouygues et SFR. Tous utilisent notamment la 4G, et en particulier cette bande 1900 MHz, qui en fait est répartie entre 1920 MHz et 1980 MHz. Selon un document émanant de l'ARCEP (**Autorité de Régulation des Communications Electroniques, des Postes et de la distribution de la Presse**), actuellement, les quatre opérateurs doivent se contenter d'une largeur de bande de 14,8 MHz chacun: la tranche entre 1920 et 1980 MHz est découpée en quatre tranches de largeur 14,8 MHz, et peu importe si la bande passante de leur émetteurs est plus large (ce qui est le cas). Y aurait-il, par hasard, trop d'opérateurs téléphoniques sur le marché ?

Zone blanche.

L'ARCEP est une autorité administrative indépendante, parfois appelée le « gendarme des télécommunications ». C'est elle qui, légalement, donne des ordres aux opérateurs téléphoniques et leur fixe leurs missions. Voici, selon l'ARCEP, la définition de la zone blanche : « On appelle couramment *zone blanche* un territoire non couvert par un réseau mobile. **Aucun opérateur mobile ne couvre ce territoire** peu densément peuplé, situé le plus souvent en zone rurale. » (source : le site officiel de l'ARCEP). En réalité, les opérateurs ont **privatisé cette notion** lorsqu'ils disent : « Ma couverture téléphonique dans cette zone est faible, je m'y installe car pour moi, elle est blanche », alors même qu'il y a d'autres opérateurs. Un fait très grave, qui commence à être connu mais n'est absolument pas pris en compte de façon sérieuse par les autorités : des millions de personnes sont **électro-hypersensibles (EHS)**, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent vivre dans un environnement où l'intensité des ondes (hautes fréquences RF, mais aussi basses fréquences) dépasse un certain seuil, variable selon les individus, mais qui est de l'ordre de *quelques centièmes de volt par mètre* (pour les RF). Dès lors, on ne peut *qu'exiger des pouvoirs publics que soient maintenues des zones* dans lesquelles les CEM soient *aussi réduits que possible*. Ces zones dites « blanches » ne seraient pas coupées du reste du monde, car *le téléphone filaire basé sur la fibre optique* pourrait compenser efficacement l'absence des champs électromagnétiques. *Cela dépend largement de la volonté des pouvoirs publics.*

2) Description d'une antenne téléphonique. Puissance et gain de l'installation¹³.

(Dans tout ce qui suit, sauf spécification contraire, nous traitons des antennes macrocellulaires)

a) Description sommaire d'une installation téléphonique et répartition de la puissance.

Principe : en schématisant un peu, l'antenne la plus simple consiste en un fil rectiligne parcouru par un courant électrique à très haute fréquence que lui envoie un dispositif appelé « circuit oscillant ». Dans ce cas, le fil émet un rayonnement électromagnétique : une onde porteuse d'un champ électrique et d'un champ magnétique se propage dans toutes les directions du plan horizontal. Cela n'est pas le cas des antennes utilisées en téléphonie mobile. Celles-ci sont plus élaborées : par une disposition appropriée de plusieurs fils rayonnants et d'un réflecteur métallique limitant l'émission dans des directions non souhaitées (comme vers l'arrière, par exemple), on peut obtenir une propagation *dans une direction déterminée*. Ce type d'antenne s'appelle une *antenne-panneau*. Attention à un point de langage : souvent, quand on parle d'*antenne*, on veut généralement parler du pylône (ou de tout autre support), avec ses antennes et tout l'équipement électrique qui va avec. Pour désigner ce pylône (ou ce support), on devrait plutôt parler de « station de base » (ou en anglais, BTS pour *Base Transceiver Station*, c'est-à-dire : *station émettrice/réceptrice de base*). En toute rigueur, le mot « *antenne* » devrait être réservé à l'*élément radiant*, qui prend le plus souvent la forme d'un grand rectangle (antenne-panneau), d'un ou deux mètres de haut, de quelques dizaines de centimètres de large et quelques centimètres d'épaisseur. Nous pouvons nous la représenter par une simple plaque rectangulaire d'où partent les ondes. Quand les antennes sont fixées en haut d'un pylône, on en trouve en général trois pour viser l'ensemble du tour d'horizon. Ces antennes pointent vers des directions horizontales appelées « *azimuts* ». Comment visent-elles ces directions? On a dit qu'une antenne est représentable par une plaque rectangulaire. Imaginez, au centre de la plaque, une flèche qui sort perpendiculairement à cette plaque (on dit que cette flèche est *normale* à plaque). Cette flèche représente l'axe du faisceau électromagnétique et c'est elle qui nous indique l'azimut. Exemple simple d'azimuts : 120° (sud-est), 240° (sud ouest) et 360° (nord). Cela ne veut évidemment pas dire que la puissance électromagnétique émise par les antennes se limite au faisceau très étroit matérialisé par les flèches. Au contraire, cette puissance se répartit en **un vaste lobe** à droite et à gauche dans un secteur angulaire de 120°. Plus précisément, un premier secteur angulaire (triangle d'angle au sommet de 60°) contient une grande partie (environ les deux tiers) de la puissance émise, tandis que deux secteurs plus étroits, de 30 degrés de part et d'autre du triangle principal, contiennent à eux deux quasiment tout le reste. Finalement, on voit qu'aucun secteur de l'espace n'est oublié, car chaque antenne émet sur un secteur de 120 degrés et ces trois secteurs sont contigus (Figure 7-a).

¹³ Le site <https://www.cartoradio.fr/index.html#/> permet de connaître la carte des antenne-relais. Il suffit d'entrer l'adresse de la commune pour connaître les installations radioélectriques qui y sont implantées.

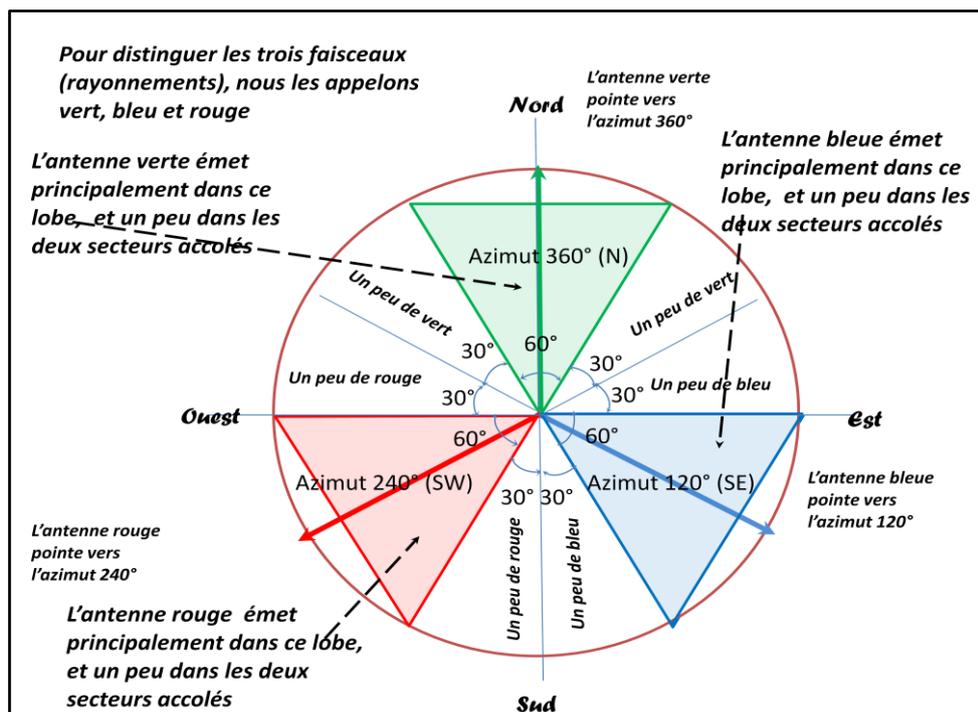


Figure 7-a : Répartition spatiale des lobes d'émission à partir d'un pylône à trois antennes.

La figure 7-b montre comment se répartit la puissance de l'antenne dans le plan horizontal.

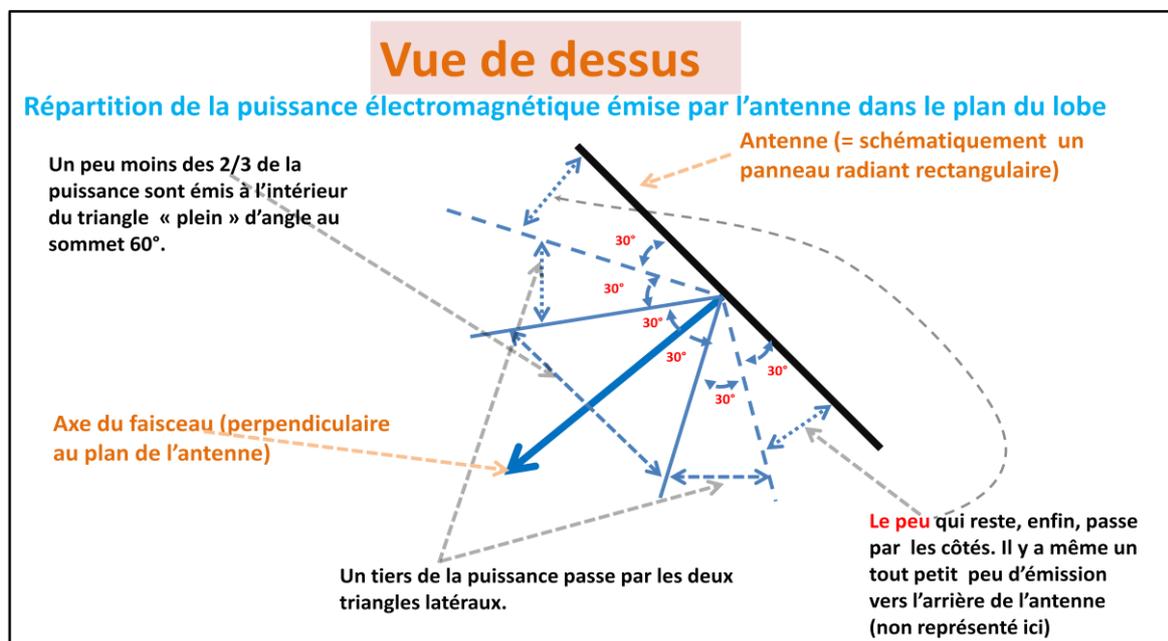


Figure 7-b : Répartition spatiale de la puissance dans un faisceau (lobe) dans le plan horizontal.

Retenons qu'environ les deux tiers de la puissance électromagnétique de chaque lobe sont inclus dans un triangle principal qui couvre un secteur de 60 degrés (30° à gauche et 30° à droite), et pratiquement tout le reste est contenu dans deux petits triangles d'angle au sommet 30°, l'un à gauche et l'autre à droite. En d'autres termes, la quasi-totalité du CEM émis par l'antenne est

distribuée sur un lobe de 120° (60° d'un côté de l'axe du faisceau et 60° de l'autre). Le peu qui reste passe entre ces deux petits triangles et le plan de l'antenne, côté « émission ».

Remarque : en plus des antennes rectangulaires, on note aussi la présence d'antennes *rondes* au sommet du pylône : elles ne sont pas destinées au public. Ce sont des émetteurs-récepteurs à très haute fréquence (par ex. 60 GHz) destinés à recevoir les ordres de réglage¹⁴ de la part du *Contrôleur de Station de Base* (BSC, pour *Base Station Controller*). Ce contrôleur commande plusieurs stations de base (BTS). Sur les documents officiels, ces antennes sont dénommées « antennes de faisceau hertzien ».

Voici en résumé de quoi se compose une station de base. Il y a tout d'abord un pylône (mais les antennes peuvent aussi atterrir sur un toit, une terrasse, une façade d'immeuble, un clocher, un château d'eau, une tour, une fausse cheminée...). Ce pylône mesurait une dizaine de mètres autrefois, mais il a beaucoup grandi ces dernières années¹⁵. Au sommet du pylône, il y a les antennes. Il y en a plusieurs car, même s'il n'y a qu'un seul opérateur, ce dernier utilise plusieurs technologies, de la 2G à la 5G, et parfois une même technologie est déclinée en plusieurs fréquences. Tout ceci augmente le nombre d'antennes, et surtout fait croître le « brouillard électromagnétique » dans lequel nous baignons.

La station est alimentée par le réseau électrique (ENEDIS) en 220 V. L'alimentation est installée dans une armoire, qui est métallique pour éviter les parasites. C'est la « *baie technique* », qui contient l'alimentation électrique et les éléments électroniques qui participent à l'émission et la réception. La puissance électrique maximale utilisée est de l'ordre de 15 à 20 kW. Ceci n'est pas à confondre avec la puissance des antennes elles-mêmes, que nous allons découvrir dans la suite de ce document.

b) Détail d'un lobe de CEM.

Nous avons dit qu'une antenne émet dans des directions particulières de l'espace, et le CEM émis est principalement contenu dans un faisceau appelés *lobe principal*. Nous allons maintenant entrer dans les aspects quantitatifs de la question : répartition spatiale de la puissance émise, structure horizontale et verticale, calcul des champs émis.

Il n'est pas inutile de revenir sur la géométrie du lobe (figures 8-a et 8-b).

¹⁴ Quand on vous raconte que les caractéristiques de l'antenne (puissance et orientation du faisceau, par exemple) sont fixés une fois pour toute, c'est faux : l'opérateur peut tout modifier à distance et à sa guise.

¹⁵ Un opérateur peut construire un mat de plusieurs dizaines de mètres s'il le désire : les lois actuelles lui en donnent le droit, à de rares exceptions près.

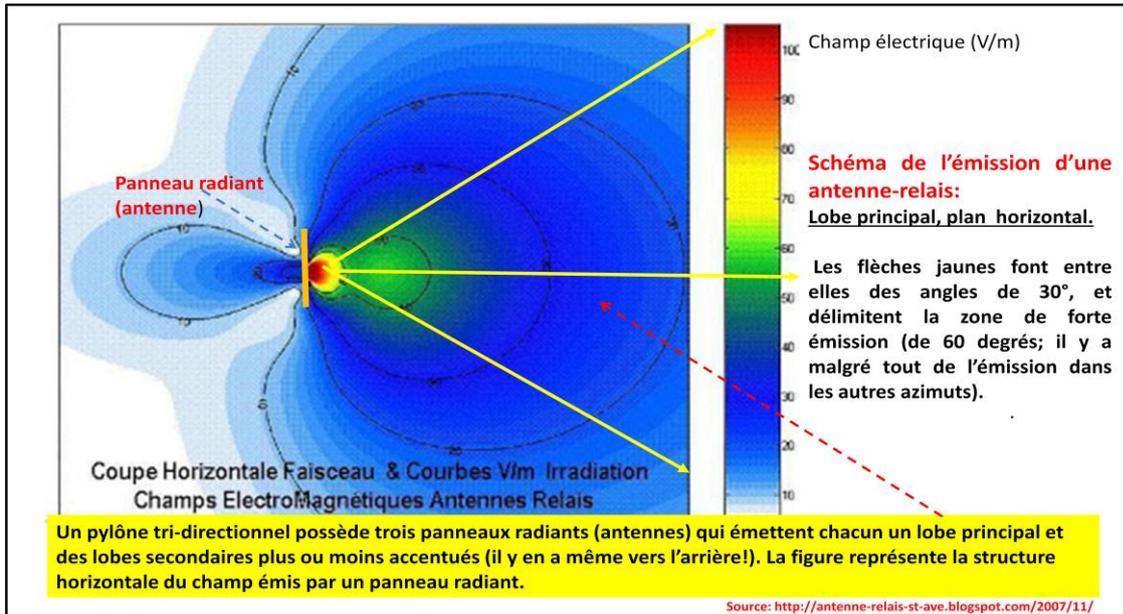


Figure 8-a : Structure horizontale du lobe émis par une antenne.

Nous avons parlé de « lobe dans le plan horizontal ». En réalité, ce lobe est le plus souvent légèrement incliné vers le bas (là où se trouvent les clients), et plus rarement vers le haut ((si l'installation est située dans un fond de vallée). Cet angle d'inclinaison est parfois désigné par le mot anglais « tilt ». Il est de quelques degrés (généralement entre -6° et $+6^\circ$ par rapport à l'horizontale). Sur la figure 8-b, qui représente la structure du lobe dans le plan vertical (coupe verticale), on note que la largeur angulaire (épaisseur) du faisceau est faible, de 6° à 8° , donc le lobe est beaucoup plus étroit (moins épais) que dans le plan horizontal.

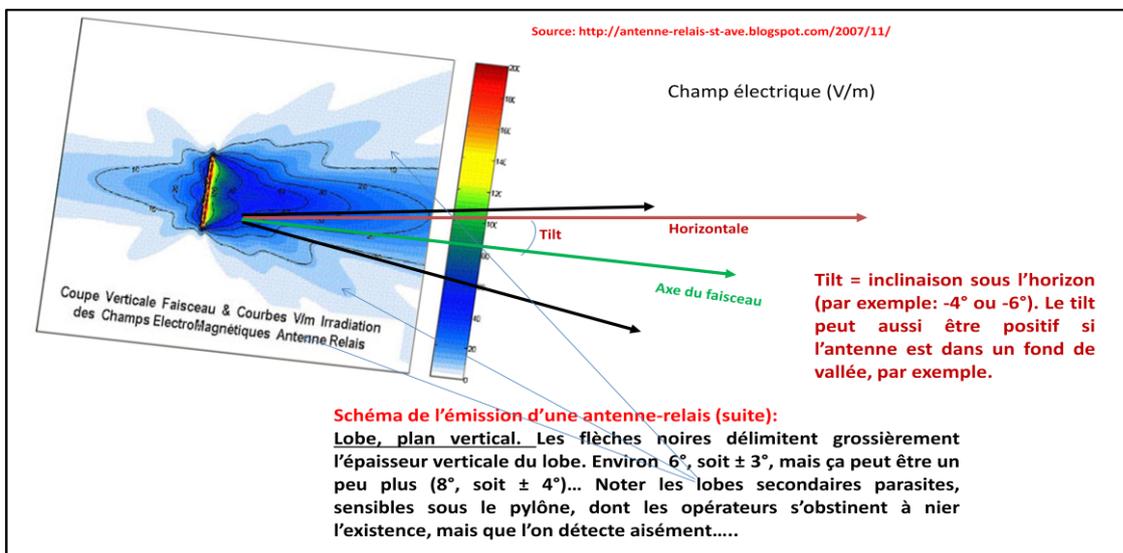


Figure 8-b : Structure verticale du lobe émis par une antenne.

c) Calcul des champs

Tout le monde peut, sans difficulté excessive, calculer l'intensité des CEM qu'une installation de téléphonie mobile va occasionner dans son voisinage, et nous allons le montrer¹⁶. Nous verrons comment on procède, en pratique, au paragraphe 3 ci-dessous. Nous allons comprendre ce qui se passe en considérant un lobe particulier issu d'une antenne. On suppose que nous connaissons la puissance électrique injectée dans cette antenne (voir plus bas). Soit P_e cette puissance. Elle semble faible (20 à 40 watts, le plus souvent moins de 100 watts), mais l'antenne émet dans des lobes étroits, ce qui a pour résultat que dans chaque lobe, la *puissance radiative* qui passe y est concentrée, et est donc très importante. Nous allons calculer la puissance radiative qui passe par ce lobe. Prenons l'analogie habituelle d'un phare de voiture, dans lequel il y a une ampoule au centre d'une parabole réfléchissante. La lumière issue de cette ampoule est concentrée en un faisceau étroit qui suffit pour éclairer la route vers l'avant de la voiture et un peu aussi les bas-côtés. Supposons un instant que l'on veuille illuminer tout l'espace autour de notre voiture, tout en conservant le même éclairage sur notre route, comme avec un phare normal. On supprimerait le phare et on remplacerait l'ampoule par une ampoule beaucoup plus puissante, qui illuminerait tout l'espace: haut, bas, avant, arrière, droite et gauche. On dit alors que le rayonnement émis serait *isotrope*, c'est-à-dire qu'il serait le même quel que soit le sens de propagation des rayons lumineux issus de l'ampoule : toutes les directions de l'espace recevraient la même puissance radiative que celle qu'envoyait le phare. Ce serait idiot, bien sûr, comme il serait idiot pour un opérateur téléphonique d'envoyer son faisceau vers les nuages, vers le sol, partout à droite et à gauche et même en arrière, mais cela va nous servir pour la suite des calculs. On va donc calculer la puissance de l'ampoule qu'il faudrait pour réaliser ce caprice d'automobiliste.

Soit donc P_i cette puissance (voir figure 9). La puissance émise par l'ampoule est supposée ne pas être atténuée le long de son trajet (pas de brouillard ni de fumée !). Dans le cas d'une ampoule qui éclairerait dans toutes les directions de l'espace, la puissance qui passe à travers une sphère de rayon R_1 (c'est-à-dire : qui illumine de l'intérieur toute la sphère de rayon R_1 , au centre de laquelle il y a l'ampoule) est identique à celle qui passe à travers la sphère de rayon R_2 , qui est concentrique à la sphère de rayon R_1 , mais de rayon plus grand, car il ne s'est pas perdu de rayonnement en passant d'une sphère à l'autre. Rappelons ici la notion de *densité surfacique de puissance*, appelée encore *densité de flux d'énergie* : c'est la quantité d'énergie par unité de temps (donc la puissance¹⁷) qui passe à travers une surface d'aire unité. On a vu cette notion avec le vecteur de Poynting : on rappelle que le module de celui-ci en un point quelconque est égal à la *densité de flux d'énergie*, ou *densité de puissance* en ce point. Puisque la puissance de l'ampoule est P_i , la densité surfacique de puissance¹⁸ vaut $\varphi_1 = \frac{P_i}{S_1}$ quand on considère la surface S_1 de la sphère de rayon R_1 , et cette densité surfacique de puissance est $\varphi_2 = \frac{P_i}{S_2}$ quand on considère la surface S_2 de la sphère de rayon R_2 . Cette densité de puissance φ diminue naturellement à mesure que l'on s'éloigne de la source O : on comprend qu'à 1 km de la source de puissance P_i , une surface d'un mètre carré recevra moins de puissance d'éclairage que si cette même surface est à 5 m de la source. Par contre, la puissance d'éclairage totale ne s'est pas atténuée (on a supposé que la nuit est claire !). On peut donc écrire $P_i = \Phi_1 S_1 = \Phi_2 S_2$. Comme la surface d'une sphère de rayon R est égale à $4\pi R^2$, on obtient : $P_i = 4\pi R_1^2 \varphi_1 = 4\pi R_2^2 \varphi_2$, et cela reste vrai pour toute distance R de l'ampoule.

¹⁶ Il suffit pour cela de disposer d'une calculette, telle celle qui existe en général dans les téléphones mobiles.

¹⁷ Rappelons qu'en physique, la *puissance* est égale à l'*énergie* divisée par le *temps*.

¹⁸ La lettre grecque φ (prononcer « phi ») représente ici la densité surfacique de puissance.

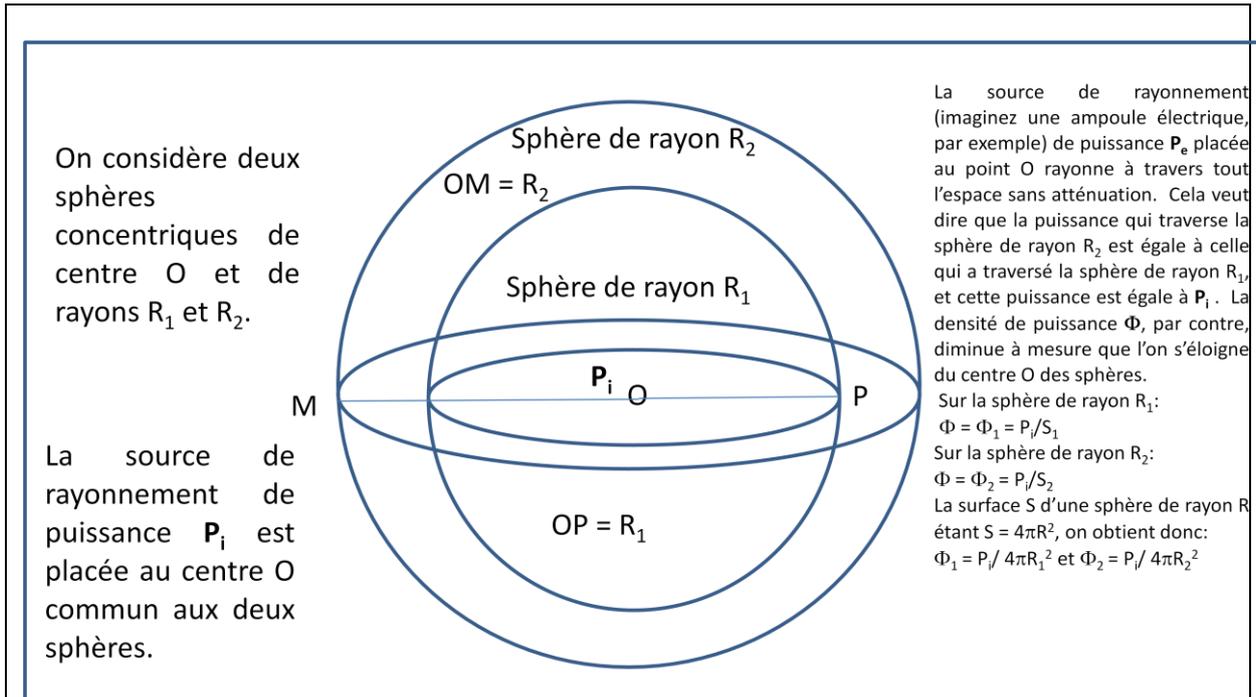


Figure 9 : Configuration d'une source d'éclairage isotrope. La source est placée au point O,

Revenons maintenant au phare « normal » d'une voiture, qui éclaire suivant un faisceau étroit (voir figure 10).

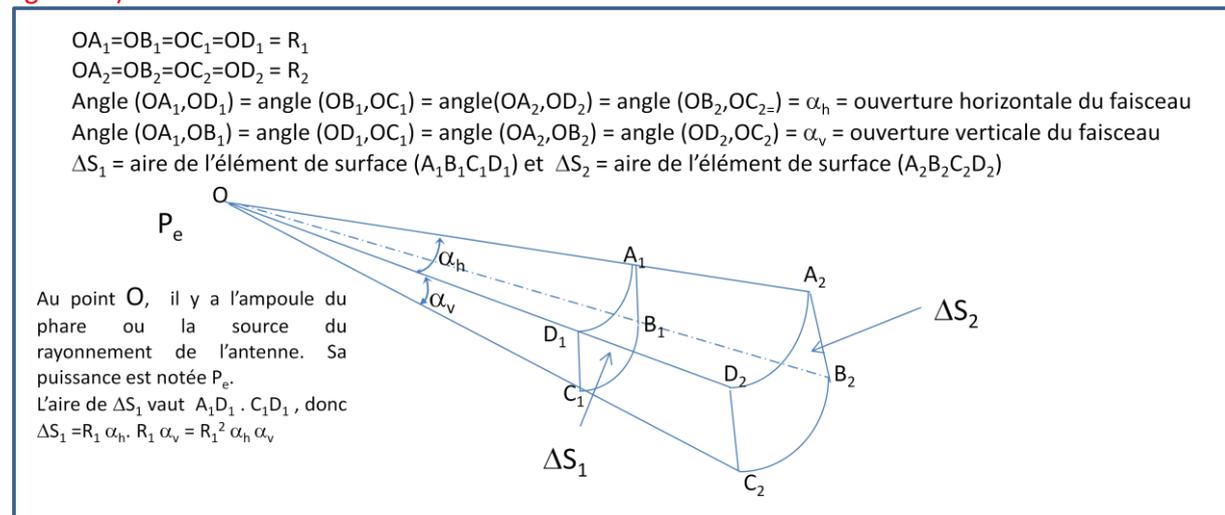


Figure 10 : Configuration de l'éclairage d'un phare de voiture (dans le cas d'une antenne-relais, l'angle α_h est plus important, mais le principe est le même).

On suppose toujours que la puissance se conserve (pas d'atténuation le long du parcours de l'onde : on appelle cela propagation « en champ libre »). La puissance de rayonnement de l'ampoule est P_e .
 Considérons la petite surface ΔS_1 . La densité de puissance sur ΔS_1 est égale à $\frac{P_e}{\Delta S_1}$. Notons α_h l'angle (en radians!)¹⁹ (OA_1, OD_1) : c'est l'ouverture horizontale du faisceau. Notons α_v l'angle (en radians aussi!) (OC_1, OD_1) ; c'est l'ouverture verticale du faisceau. Le faisceau étroit de lumière suffit pour éclairer la route. Si on voulait éclairer tout l'espace (la sphère !), il faudrait avoir la même puissance irradiant l'ensemble des petites surfaces comme ΔS_1 , estimées comme des aires de

¹⁹ Le radian est l'unité naturelle de mesure des angles. Un angle de 180 degrés est égal à π radians ($\pi = 3,14159\dots$).

rectangles $A_1B_1C_1D_1$ (peu importe que les côtés soient courbes, cela ne change pas l'aire).

$$\Delta S_1 = R_1^2 \alpha_h \alpha_v \quad (21)$$

Il faudrait donc que la puissance de l'ampoule P_i soit égale à la puissance P_e de l'ampoule multipliée par le nombre G de petites surfaces comme ΔS_1 , soit donc :

$$G = \frac{\text{Surface totale de la sphère}}{\text{aire de } \Delta S_1} = \frac{4\pi R_1^2}{R_1^2 \alpha_h \alpha_v} = \frac{4\pi}{\alpha_h \alpha_v}$$

$$G = \frac{4\pi}{\alpha_h \alpha_v} \quad (22)$$

Cette grandeur G est appelée le *gain* du projecteur. La puissance P_i , dite *isotrope*, est donc égale à : $P_i = G P_e$. Pour fixer les idées, supposons que $\alpha_h = 30^\circ$ et $\alpha_v = 10^\circ$. Il faut d'abord transformer ces angles en radians. En effet, par exemple, la relation $A_1D_1 = R_1 \alpha_h$ n'est valable que si α_h est en radians²⁰. Le cercle complet étant égal à 2π radians ou 360 degrés, chaque degré vaut ainsi :

$$2\pi/360 = 0,0175 \text{ radian par degré. Cela donnerait :}$$

$$G = \frac{4\pi}{30 \cdot 10 \cdot (0,0175)^2} = 68$$

Donc, une ampoule de phare de 50 watts devrait être remplacée par une ampoule de $68 \cdot 50 = 6850$ watts, ce qui est parfaitement illégal²¹. Là n'est pas la question, car nous pouvons maintenant transposer ce qui précède pour le calcul du champ électromagnétique.

Considérons une antenne-relais dont la *puissance électrique d'entrée*, c'est-à-dire l'équivalent de l'ampoule du phare, est P_e . Le lobe possède une ouverture horizontale α_h et une ouverture verticale α_v . Calculons le champ E à distance d de l'antenne. La densité de puissance qu'il génère (que nous notons ici Φ , c'est le module du vecteur de Poynting (voir l'équation 20-a) est égale à :

$$\Phi = \frac{E^2}{\mu_0 c}, \text{ soit, en remplaçant } \mu_0 \text{ et } c \text{ par leurs valeurs (respectivement } 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ et } 3 \cdot 10^8 \text{):}$$

$$\Phi = \frac{E^2}{120\pi} \quad (23)$$

A la distance d de l'antenne, le lobe présente une surface ΔS traversée par le rayonnement égale à

$$\Delta S = d^2 \alpha_h \alpha_v. \text{ La densité de flux } \Phi \text{ vérifie la relation : } P_e = \Phi \Delta S, \text{ et donc } \Phi = \frac{P_e}{\Delta S}, \text{ soit enfin :}$$

$$\Phi = \frac{P_e}{d^2 \alpha_h \alpha_v} \quad (24)$$

En éliminant Φ entre les équations 23 et 24, et en tenant compte de l'équation 22 relative au gain, on obtient finalement:

$$E = \frac{\sqrt{30 G P_e}}{d} \quad (25-a)$$

Par définition, le produit $G P_e$ est la *puissance isotrope rayonnée équivalente*, en abrégé : PIRE, c'est-à-dire la puissance de l'antenne qui serait nécessaire pour irradier toute la sphère entourant l'antenne pour assurer la même puissance dans le lobe, comme nous l'avons vu dans le cas du phare qui voudrait illuminer tout l'espace.

$$E = \frac{\sqrt{30 \text{ PIRE}}}{d} \quad (25-b)$$

Important : dans les deux formules précédentes, P_e ou PIRE sont en watts et d en mètres. Alors, E est en volts par mètre.

En pratique, cette formule donne la valeur du champ E dans l'axe, car le champ faiblit quand on n'est plus dans l'axe, mais ne s'annule jamais.

²⁰ Ainsi, si α_h est égal à 2π , on obtient $A_1D_1 = 2\pi R_1$ (longueur de la circonférence).

²¹ La loi, en France, stipule que la puissance d'une ampoule de phare de voiture ne doit pas dépasser 55 watts.

Pour nous résumer : un phare de voiture, tout comme une antenne téléphonique, possède une propriété qui s'appelle *le gain*, noté G . Si on désigne par P_{amp} la puissance électrique d'une ampoule de phare (par exemple 50 watts) et si le gain G de son phare vaut 30, la puissance radiative utile à l'automobiliste (celle qui passe dans le faisceau) est égale à $G P_{amp}$, soit 30 fois 50 = 1500 watts. Attention : dans le cas de la voiture et aussi de l'antenne-relais, il s'agit ici d'un *gain passif*, car il n'y a pas multiplication de la puissance. Il y a juste une *affectation de la puissance disponible dans un faisceau étroit*. En ce qui concerne les installations radiotéléphoniques, tout citoyen peut et doit avoir accès à la puissance d'une antenne-relais. Les opérateurs téléphoniques sont tenus de la donner au maire, et la donnent (en général). Certains opérateurs fournissent directement la puissance de chaque antenne sous forme d'une grandeur appelée « PIRE », ce qui signifie puissance isotrope rayonnée équivalente, c'est-à-dire la puissance électrique qui serait nécessaire pour irradier toute la sphère entourant l'antenne pour assurer la même puissance dans le lobe. Ainsi, on n'a plus besoin de connaître la puissance électrique d'entrée ni le gain. D'autres opérateurs donnent simplement la puissance d'entrée, et oublient parfois de donner le gain. Supposons que l'on

connaisse la PIRE. La formule²²
$$E = \frac{\sqrt{30 \text{ PIRE}}}{d} \quad (25-b)$$
 nous permet de trouver la valeur maximale du champ à la distance d de l'antenne en se plaçant *dans l'axe du faisceau*. E sera en volts par mètre si d est en mètres et PIRE en watts. Si nous n'avons pas connaissance du gain, mais simplement de la puissance d'entrée, nous pouvons néanmoins calculer la PIRE en estimant le gain de l'antenne si vous connaissez l'angle d'ouverture horizontale α_h et l'angle d'ouverture verticale α_v (épaisseur verticale du faisceau), grâce à la formule $G = 41000 / \alpha_h \alpha_v$ (qui est équivalente à la formule 22 en rouge, mais en comptant ici *les angles en degrés*). Nous pouvons considérer que ces angles ont pour valeur respectives 60 degrés et 8 degrés, ce qui donnera un gain de 86 environ. Une puissance d'entrée de 40 watts aura pour résultat une PIRE de 3400 watts. Le mieux est cependant d'avoir directement la PIRE. Nous examinons les détails au paragraphe suivant. Avant cela, nous remarquons, d'après la formule $E = \frac{\sqrt{30 \text{ PIRE}}}{d}$:

- que le champ E décroît en fonction de la distance d . Si le champ vaut E à 50 m, il sera divisé par 2 quand la distance aura doublé, donc à 100 m, et ne vaudra plus que $E/2$
- que le champ augmente comme la racine carrée de la puissance **PIRE** quand la distance ne change pas. Ainsi, si le champ vaut E à une certaine distance dans l'axe de l'antenne pour une puissance PIRE donnée, il vaudra $2 E$ pour une puissance PIRE quadruplée et à la même distance d , toujours dans l'axe.

Exemple : PIRE= 3000 W et $d = 100\text{m}$, alors, d'après la formule, on trouve $E=3 \text{ V/m}$. Si par contre PIRE ne change pas mais $d=200\text{m}$, alors, $E= 1,5 \text{ V/m}$, soit la moitié de la valeur à 100 m. Si à présent on reste à 100 m, mais avec une PIRE quatre fois plus élevée, soit 12000 W, alors E vaut 6 V/m, soit le double de la valeur avec 3000 W.

Nous verrons plus bas comment on peut approximativement estimer le champ quand on s'écarte du faisceau, tout en gardant la même distance à l'antenne.

²² Rappelons que le symbole \sqrt{X} représente la racine carrée de la grandeur X . Si $X = 4$, alors $\sqrt{4} = 2$. Cette opération est disponible sur toute calculette.

3) Exemples de *dossier d'information mairie (DIM)* et leur exploitation.

Tout opérateur téléphonique qui envisage d'installer une station relais (sur un pylône, un toit, un château d'eau ou autre point élevé) est (en principe²³) tenu de fournir à la mairie de la commune un document, appelé « Dossier d'Information Mairie » (en abrégé : DIM). Ce DIM décrit notamment les caractéristiques du projet : lieu précis (parcelle cadastrale et coordonnées géographiques, altitude NGF²⁴ du site, dimensions : hauteur du pylône ou du support, ...). Y figurent aussi le nombre d'antennes émettrices (un support peut comporter jusqu'à trois directions horizontales et de nombreux émetteurs suivant la technologie utilisée : 3G, 4G, 5G), les fréquences mises en jeu, la puissance des antennes émettrices, leur orientation horizontale (azimut) et leur inclinaison verticale, parfois appelée « tilt ». Ce tilt, on l'a vu, peut être soit négatif (un angle de -3° signifie que l'antenne vise sous l'horizon), soit positif si l'antenne vise des points plus élevés qu'elle. Pour exploiter le DIM, on procède comme indiqué ci-dessous.

Nous pouvons sans dommage passer outre les pages « publicitaires » et les semi-vérités quant au non-danger des ondes et aux immenses bénéfices que nous devrions retirer de cette nouvelle installation. Après avoir repéré le site de l'installation, rendons-nous directement aux pages « techniques ». Ci-dessous (figure 11), voici un exemple issu d'un cas actuel.

a. Antennes à faisceau fixe ← Les nouvelle 5G sont à faisceaux orientables. Ici, les faisceaux sont fixes

ANTENNE	AZ ² (°)	HAUTEUR ² (m)	TECHNOLOGIE	FREQUENCE (MHz)	Angle d'inclinaison ³ (°)	PUISSANCE ISOTROPE RAYONNEE (dBW)	PUISSANCE APPARENTE RAYONNEE (dBW)
ANT 1	340°	15m	2G	900	0°	27.71	25.56
			3G	900		30.72	28.57
			4G	700		33.18	31.05
			4G	800		33.58	31.43
			4G	1800		38.44	36.29
			4G	2100		37.69	35.54
			4G	2600		36.33	34.18
			4G/5G	2100		37.69	35.54

Il y a trois directions (azimuts) prévues (ici, 340°, c'est N-NW)

L'opérateur a prévu une 2G, une 3G, et six 4G. La 4G/5G: la 4G est transformable en 5G par simple changement de carte électronique

Fréquences qui seront mises en jeu (de 700 MHz à 2100 MHz, soit 2,1 GHz)

Les faisceaux seront orientés à l'horizontale (inclinaison 0°)

Cette puissance apparente ne sert pas aux calculs ici, on peut l'oublier

La Puissance Isotrope Rayonnée (en abrégé PIRE) est fondamentale pour nos calculs. Prenons l'exemple de la PIRE associée au faisceau 4G en 700 MHz: 33,18 dBw (décibels-watts)

Figure 11 : Extrait d'un « Dossier Information Mairie » (DIM) et explications des diverses colonnes.

La colonne la plus importante est la 7°, qui donne la PIRE, mais dans une unité que peu de gens utilisent : le « décibel watt », en abrégé *dBw*. Pour avoir la PIRE en watts, il suffit de diviser la valeur par 10 et de prendre sa calculette : nous recherchons alors la puissance de 10 de ce nombre. Prenons un exemple : la puissance de la 4G en 700 MHz est de 33,18 dBw. On divise d'abord par 10, ça fait

²³ Certaines dispositions relatives à des situations supposées d'urgence dispensent les opérateurs de cette démarche civique pourtant indispensable.

²⁴ L'altitude NGF d'un point (NGF signifie « Nivellement Général de la France ») est repérée par rapport au niveau de la mer de ce point dans le réseau de repères altimétriques officiel de la France.

3,318. Ensuite, avec la calculette, on élève 10 à la puissance 3,318. On obtient 2 079,696687, que l'on arrondit à 2080 watts. On peut alors calculer le champ électromagnétique que nous notons E_{4G700} associée à cette antenne 4G travaillant en 700 MHz. Il suffit pour cela d'utiliser la formule **25-b** pour calculer la valeur du champ E_{4G700} à une distance d dans l'axe. Attention : il y a d'autres antennes qui travaillent dans cet azimut. Il faudra donc répéter la même opération pour la 2G, la 3G, les 3 autres antennes 4G (800, 1800, 2100 et 2800 MHz) et celle qui est définie comme 4G/5G en 2100 MHz. Pour la 4G seulement, les champs respectifs sont notés E_{4G800} , E_{4G1800} , E_{4G2100} , E_{4G2800} et $E_{4G/5G}$. Le champ total E_{tot} n'est pas, comme on pourrait s'y attendre, égal à la simple somme de tous ces termes. Il s'obtient en élevant tout d'abord au carré chacun des termes de champ et en les additionnant, ce qui est égal au carré du champ recherché E_{tot}^2 :

$$S_{4G} = E_{4G700}^2 + E_{4G800}^2 + E_{4G1800}^2 + E_{4G2100}^2 + E_{4G2800}^2 + E_{4G/5G}^2 \quad (26-a)$$

On a vu le cas de la 4G, mais comme il y a les antennes 2G et 3G, il faut faire de même pour ces antennes :

$$S_{2G} = E_{2G900}^2 ; S_{3G} = E_{3G900}^2$$

Il suffit enfin de prendre la racine carrée de la somme $S_2 = S_{2G} + S_{3G} + S_{4G}$, et donc :

$$E_{tot} = \sqrt{S_2} \quad (26-b)$$

La figure 12 ci-dessous montre les résultats des calculs du champ électromagnétique.

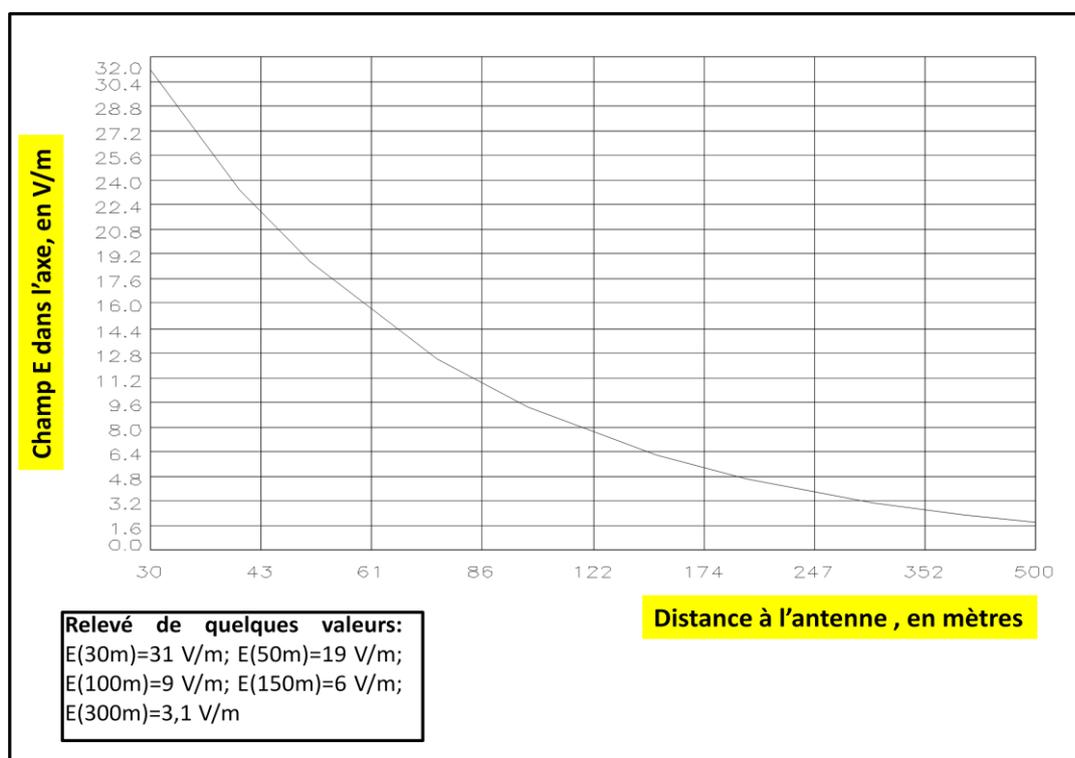


Figure 12 : Champ dans l'axe du faisceau produit par l'ensemble des antennes dans l'exemple traité ici.

C'est long, certes, mais pas du tout infaisable !

Remarque : certaines antennes 5G en 3,5 GHz présentent une PIRE, en dBi, égale à 49,3 (désolé, ça ne s'invente pas !). La même opération : diviser 49,3 par 10 et porter 10 à la puissance 4,93, donne une PIRE supérieure à 85 000 watts (85 kW). Quand les bornes sont franchies, ...

4) Portée d'une antenne

Quand on se demande : « A combien porte une antenne ? », la réponse n'est pas simple. En campagne, si aucune montagne ou colline ne nous cache une antenne, on peut communiquer avec elle même à une dizaine de kilomètres, voire beaucoup plus, sans qu'il soit besoin qu'elle soit alimentée par une énorme puissance: en effet, un téléphone portable peut fonctionner même en présence d'un champ électromagnétique *de moins d'un centième de volt par mètre*. Evidemment, dans ces conditions, on ne pourra pas télécharger ou envoyer un gros document, mais on pourra parler... On sait aussi que des reliefs occultent souvent la transmission, c'est pourquoi la chasse aux zones blanches (ou prétendues telles) bat son plein depuis 2018, année où fut signé le regrettable pacte appelé « New Deal Mobile ». En ville, vu le nombre énorme de ces engins, il y a peu de chance que la question de la portée soit pertinente, car en vérité peu d'endroits sont en dessous de 0,5 V/m !

5) **A quelle distance d'une antenne peut-on considérer que l'onde est plane ? A quelle distance les champs E et B sont-ils liés par la relation $E = B c$?**

En fait, l'onde n'est jamais vraiment plane, mais *localement*, après une dizaine de mètres, c'est une hypothèse tout à fait valable. De plus, la théorie et les mesures ont permis de déterminer plusieurs zones autour de l'antenne. Voyez ci-dessous (figure 13), un document de l'INERIS²⁵. A proximité immédiate de l'antenne, c'est-à-dire en pratique à quelques centimètres, l'onde n'est pas encore formée et il n'y a pas de relation nette entre les champs E et B (comme $E = B c$, pas encore valable). On appelle cette zone la *zone réactive*, elle est très petite et heureusement, il n'y a personne (sauf des insectes et des oiseaux ?). Au-delà s'étend la zone dite « zone de Fresnel », qui ne s'étend guère au-delà de la dizaine de mètres, et dépend de la longueur d'onde. Supposons que l'antenne mesure 1,5 m de haut et que la fréquence d'émission f soit de 1 GHz, donc 1 milliard d'hertz. On a vu plus haut que cela se note 10^9 Hz. La longueur d'onde est donc $\lambda = c/f = 3 \cdot 10^8 / 10^9 = 0,33$ m. Le champ lointain, où les champs E et B sont reliés par l'équation $E = B c$, commence après une distance égale à $2 D^2/\lambda$ (fin de la zone de Fresnel), donc à une distance de l'antenne égale à $2 \cdot 1,5^2 / 0,33 = 13,6$ m.

²⁵ Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

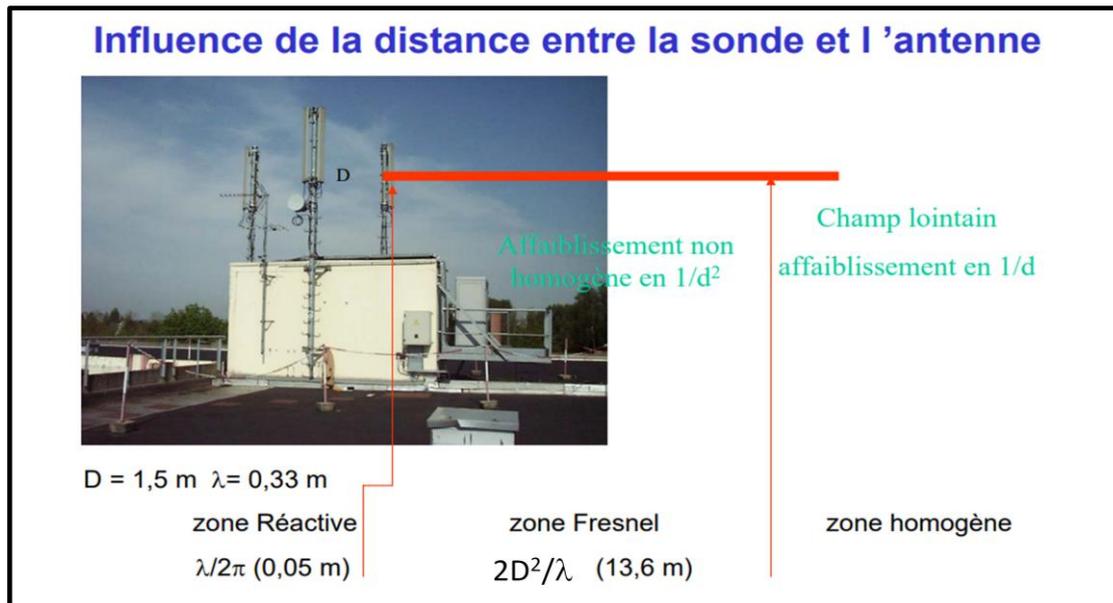


Figure 13 : Répartition des zones de rayonnement autour d'une antenne-relais (document INERIS).

6) Répartition spatiale du champ E : comment E varie autour des antennes.

Prenons un exemple réel (figure 14 ci-dessous)

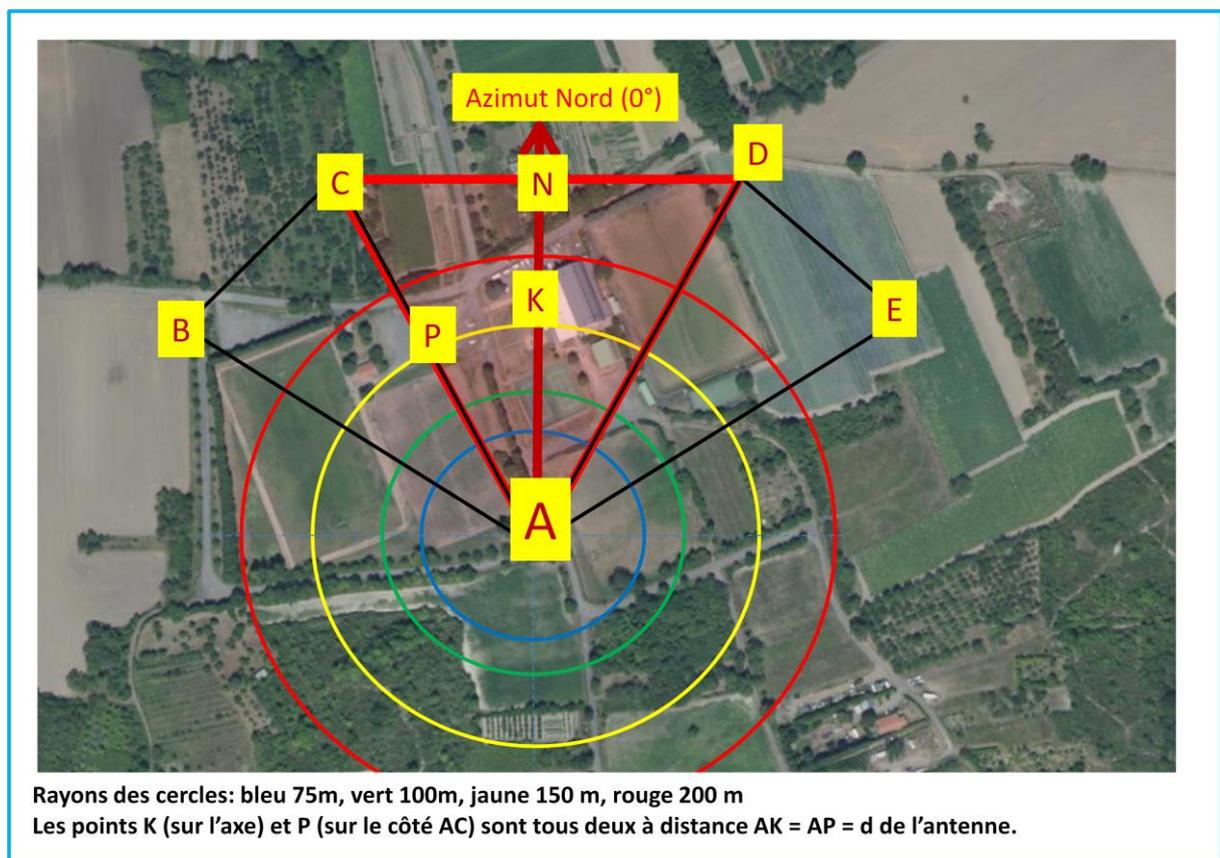


Figure 14 : Répartition de la puissance émise par une antenne suivant la direction.

L'antenne se trouve au point A. Considérons un lobe (faisceau) d'azimut Nord (0°). D'après la figure 7-b (paragraphe 2 ci-dessus), environ les 2/3 de la puissance émise par l'antenne passent par la partie du faisceau délimitée par le triangle ACD, de sommet A et de côtés AC et AD. L'angle au sommet de ce triangle est de 60°. On a dit que le maximum du champ se trouvait le long de l'axe AN. Les côtés AC et AD font, chacun, un angle de 30° avec l'axe AN. Ces côtés portent le nom bizarre de « limites à 3 dBi », ou « *limite à 3 décibels* ». Cela veut dire, en clair, que le long des côtés AB et AC, la puissance locale du faisceau, ou, si l'on préfère, sa *densité de puissance en un point P quelconque*, n'est plus que la moitié de la densité de puissance maximale (que l'on trouve sur l'axe) à la même distance, donc au point K. On aurait pu appeler ces côtés « limites à demi-puissance », mais l'électronique a ses traditions. Expliquons l'origine de cette expression. Par exemple, en un point K situé sur l'axe à la distance **d** de l'antenne, supposons que la puissance soit X. Sur le côté AB, en un point P situé à la même distance **d** de l'antenne que K (AP=AK = d), la puissance est divisée par 2, soit X/2. Alors, le rapport des densités de puissance : « densité de puissance en P/densité de puissance en K » vaut 0,5. En électronique, quand on parle d'atténuation de puissance ou de toute autre grandeur, on préfère prendre le **logarithme à base 10** de cette atténuation. Cette fonction « logarithme à base 10 » se trouve d'ailleurs sur toutes les calculettes. Si l'on prend le logarithme de 0,5, on trouve -0,3. C'est l'atténuation, en « Bels ». Le sous multiple du Bel, c'est le décibel (dB). On multiplie alors cette valeur de -0,3 par 10 : on obtient -3 *décibels*, noté -3dB. Nous avons déjà vu les décibels avec le décibel-watt (dBw) au paragraphe 3. Donc, au point P, la densité de puissance est divisée par 2, mais qu'en est-il du champ E? C'est simple : rappelons-nous la formule 20-a, qui nous donne la densité de puissance φ en un point où le champ vaut E: c'est $\varphi = \frac{E^2}{377}$. Sans faire appel à des mathématiques trop compliquées, le champ E est alors donné par $E = \sqrt{377 \varphi}$. Donc si φ est divisée par 2, le champ E, lui, est divisé seulement par $\sqrt{2}$ (qui vaut 1,414). Si donc E(K) désigne le champ E au point K et E(P) le champ au point P, alors $E(P) = \frac{E(K)}{1,414}$, ce qui donne :

$$E(P) = 0,7 E(K), \text{ soit donc: } E(P) \text{ vaut } 70\% \text{ de } E(K)$$

Ensuite, quand on s'écarte davantage de l'axe, nous ne pouvons que donner des ordres de grandeur, car chaque antenne possède ses propres caractéristiques. On peut malgré tout considérer que ce que nous disons ici est réaliste.

Quand l'angle augmente au-delà de 30°, la densité de puissance φ diminue encore. Globalement, la puissance totale qui passe dans chacun des deux triangles ACB ou ADE, d'angle au sommet 30°, qui flanquent le lobe principal de part et d'autre, est d'environ 1/6° du flux total. Sur les côtés AB et AE, on admet que la densité de puissance, à même distance de l'antenne, est divisée par 10 par rapport à celle qui existe sur l'axe AN, donc le champ est seulement de 30% du champ dans l'axe. Les quelques % de puissance qui restent passent par les côtés (voir figure 7-b ci-dessus).

Entre les valeurs des angles que nous avons données, on peut se contenter d'une interpolation linéaire. De toute façon, la théorie est utile, mais il faut, finalement, que des mesures soient effectuées si l'on veut s'assurer des valeurs de l'exposition aux champs électromagnétiques.

7) Effets des obstacles sur les ondes électromagnétiques. Interférences. Effet de la végétation.

Les ondes issues des antennes-relais n'échappent pas à la règle générale: tout obstacle a un effet sur leur propagation. Elles peuvent se réfléchir sur le sol et sur les bâtiments. Elles peuvent donner lieu à une focalisation, c'est-à-dire que certaines dispositions peuvent faire qu'elles convergent vers une zone où l'exposition augmente alors. Bien sûr, contrairement à la lumière, elles peuvent pénétrer dans les habitations à travers les murs, sinon on ne pourrait pas téléphoner de son domicile, mais alors, elles sont atténuées. Précisons que les fenêtres à double ou triple vitrage peuvent atténuer fortement les ondes (cela tient aux réflexions multiples à l'intérieur du vitrage et à la teneur en métal du matériau). Certaines surfaces irrégulières donnent lieu à un phénomène de réflexion complexe que l'on appelle « diffusion », où la réflexion ne se fait pas comme sur un miroir, mais donne lieu au renvoi de l'onde dans toutes les directions possibles. D'autre part, et c'est important à savoir avec l'arrivée de la 5G (celle qui fonctionne avec des fréquences élevées), plus la fréquence est élevée, plus l'atténuation par les obstacles (végétation, bâtiments) est importante, et plus la pénétration dans les bâtiments est faible, d'où la nécessité (selon les opérateurs !) de multiplier les antennes 5G, principalement en zone urbaine. **Pour notre protection, un obstacle particulièrement efficace est constitué par la végétation, pour toutes les fréquences, même si les hautes fréquences sont les plus affectées, car la végétation est riche en eau liquide. « Rassurons-nous » cependant, on peut toujours téléphoner, même à l'abri d'une haie, car un téléphone portable n'a nullement besoin d'un champ énorme !** Enfin, n'oublions pas les interférences. Ce phénomène consiste en la superposition de deux ondes qui ont toutes deux la même fréquence. Il se produit alors, soit l'addition, soit la soustraction des amplitudes des deux ondes : le résultat est que la réception peut être nulle, ou du moins très affaiblie, avec parfois une fluctuation irrégulière du signal reçu. Cela peut arriver si le récepteur (téléphone ou tablette) reçoit l'onde directement de l'antenne et en même temps la même onde réfléchiée par un obstacle.

On pose souvent la question : « Si on installe des antennes sur le toit-terrasse d'un immeuble, que se passe-t-il ? », en espérant sans doute que le toit-terrasse va intercepter totalement les ondes... La réponse officielle (et notre expérience) montrent qu'il n'en est malheureusement rien : le CEM pénètre dans le bâtiment sur plusieurs étages. Ci-dessous, un schéma, dû à l'INERIS, montre que cette pénétration peut être complexe (avec sans doute réflexions, diffusions et focalisations, ...), mais certains logements peuvent être affectés. Nous ne connaissons pas malheureusement la puissance de l'antenne dans ce cas, mais le fait est là : installer des antennes sur une terrasse n'est pas du tout innocent (figure 15).

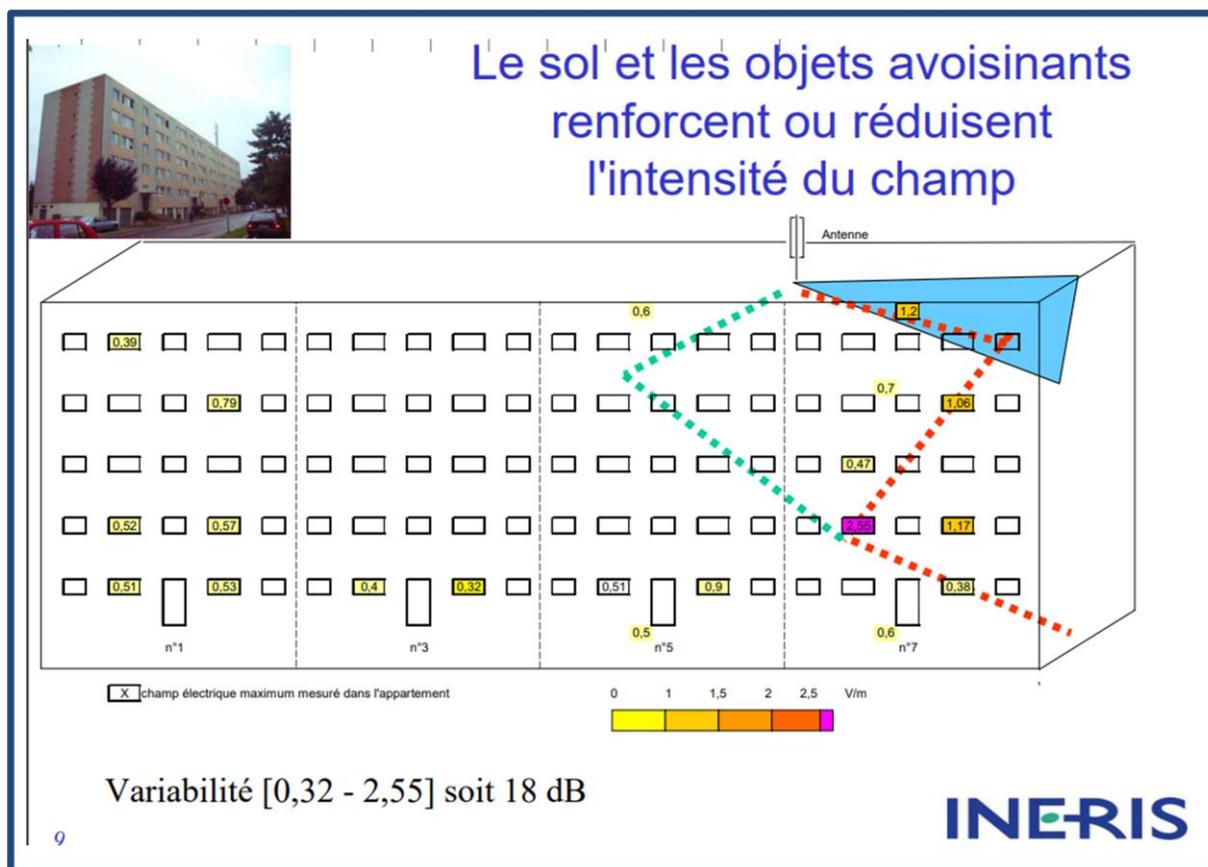


Figure 15 : Une antenne sur un toit ne préserve pas les habitants de l'immeuble.

8) Normes sanitaires en France

Nous ne traiterons pas ici de l'effet des ondes sur le monde vivant, qui fait l'objet d'un document séparé. Par contre, voici les normes sanitaires décrétées par la France en ce qui concerne l'exposition aux champs électromagnétiques. En préambule, il faut rappeler que de nombreux travaux scientifiques (indépendants des industriels des télécommunications) ont montré que la valeur maximale du champ électromagnétique RF (MHz ou GHz) acceptable par un organisme humain est d'environ $0,6 \text{ V/m}$ - ou, en termes de densité de puissance, 6 milliwatts par mètre carré (6 mW/m^2). Au-delà de ce seuil, et sans que le sujet ne sente sur le moment un effet quelconque, il peut y avoir, à la longue, des suites néfastes pour l'organisme (pour les électrohypersensibles, le seuil de douleur est d'ailleurs beaucoup plus bas que $0,6 \text{ V/m}$!). Ces effets sont qualifiés de « *non-thermiques* », ou « *athermiques* », car ils ne se traduisent par aucune sensation d'échauffement immédiate. En 2011, le CIRC (Centre international de Recherche sur le Cancer, organisme dépendant de l'Organisation Mondiale de la santé) a classé les champs électromagnétiques de hautes fréquences comme *potentiellement cancérigènes (classe 2B)* pour l'homme, et cela a malheureusement été souvent vérifié. Ce danger était d'ailleurs connu par des travaux antérieurs, concernant notamment les effets des radars sur les personnels affectés à ces matériels. En 1999, au Parlement Européen, la commission Tamino²⁶ cherche à déterminer quels sont les seuils (valeurs maximum) d'exposition aux

²⁶ Le député européen Gianni Tamino, biologiste de formation, était alors membre de la Commission de l'environnement, de la santé publique et de la protection des consommateurs.

ondes acceptables pour l'humain. A cette époque existait déjà un rapport publié par l'ICNIRP (*International Commission of Non Ionizing Radiation Protection*, soit, en français : *Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants*). L'ICNIRP est une officine se présentant comme une ONG indépendante, mais c'est en réalité une vraie collection de conflits d'intérêts avec les industriels des télécommunications, ainsi que l'ont montré des procès ultérieurs. En bon biologiste, le député Tamino avait prévu deux étapes dans son enquête: dans une première étape, il se résolut à adopter les conclusions de l'ICNIRP, mais seulement pour ce qui concerne les *effets thermiques* (effets dits *aigus*). L'ICNIRP recommandait des valeurs maximales allant de 41 V/m jusqu'à 61 V/m (entre 900 MHz et 2100 MHz et au-delà...). Pour la commission Tamino, au-delà de ces seuils, des effets immédiats pouvaient se manifester : élévation de température, brûlures... Dans une seconde étape, la commission Tamino, ayant étudié les travaux biologiques disponibles, conclut que sur le long terme, les *effets athermiques* pouvaient apparaître au-delà de 0,6 V/m dans la gamme des fréquences mentionnées ci-dessus. Malheureusement, peu de temps après, sous la pression de divers lobbies, le Conseil de l'Union Européenne (Recommandation Européenne 1999 :519 : CEE du 12-07-1999 du) ne reprend que la moitié des conclusions du rapport Tamino et décide *que les effets non thermiques sont des effets non avérés*, donc à ignorer ! En conséquence de quoi, la recommandation est que les limites acceptables pour les humains sont encore 41 V/m (pour 900 MHz), 58 V/m pour 1800 MHz et 61 V/m pour 2100 MHz et au-delà, sans d'ailleurs que l'on sache comment le rôle différencié de ces diverses fréquences est biologiquement justifié ! Cependant, ce n'était qu'une recommandation, et la France pouvait fort bien, comme l'ont fait d'autres nations en Europe ou dans le monde, adopter des normes plus réalistes. Il n'en a rien été, et la France a suivi les normes de l'ICNIRP : *le célèbre et regrettable décret 2002-775 du 3 mai 2002* entérine ce scandale, et cela dure depuis 40 ans ! A noter que l'Assemblée Parlementaire Européenne (à ne pas confondre avec le Parlement) a publié de son côté une recommandation demandant de fixer les limites acceptables d'exposition à 0,6 V/m (puis de descendre dès que possible jusqu'à 0,2 V/m). On est loin du compte !

Les organismes vivants sensibles aux champs électromagnétiques ne sont pas seulement les humains : bien d'autres êtres vivants (mammifères, insectes, etc....) sont affectés par une surexposition (en particulier, les colonies d'abeilles et autres pollinisateurs souffrent beaucoup des CEM en RF). Enfin, les organismes vivants ne sont pas les seuls à souffrir d'un abus d'ondes : les appareils médicaux (appareillages médicaux, auditifs, pacemakers, défibrillateurs, pompes à médicaments ou à insuline) peuvent dysfonctionner. Il existe bien deux textes réglementaires français : le décret n° 2006-1278 du 18 octobre 2006) et la norme NF EN 61000 qui limitent les champs à 3 V/m pour les RF dans un environnement médicalisé, mais il semble que cela ne soit pas très dissuasif, y compris dans les hôpitaux...

Quant aux normes des pays voisins, on lit ça et là un certain nombre de données, mais il faut être très prudent, car cela a pu changer au cours du temps. Cependant, il semblerait que la Belgique se situe entre 20 et 30 V/m, Bruxelles étant beaucoup plus bas (6 V/m). La Pologne est à 6 V/m, la Russie à 3 V/m, l'Italie à 6 V/m, le Luxembourg à 3 V/m, l'Autriche à 0,6 V/m (?), etc.... mais l'Allemagne a les mêmes normes que la France, et bien d'autres pays en Europe et dans le monde ont adopté ces mêmes normes absurdes.

En France, si un site subit une exposition moyenne, dûment constatée par l'ANFR²⁷, à un niveau de plus de 6 V/m, ce site est déclaré « point atypique ». Règlementairement, l'ANFR déclenche alors une alerte et doit demander à l'opérateur concerné que le niveau soit abaissé, mais elle ne peut pas l'exiger, car elle n'en a pas le pouvoir. Reconnaissons que c'est généralement ce qui se passe : le niveau est ramené à des valeurs plus acceptables, mais parfois, l'ANFR renonce à ses injonctions si l'opérateur se déclare, pour des raisons « techniques » ou de « qualité du service » (!), incapable (!!)

Quoiqu'il en soit, les normes actuelles sont délirantes, et doivent impérativement être ramenées à des valeurs compatibles avec la santé humaine et environnementale, d'autant que, nous l'avons dit, un téléphone mobile peut fonctionner avec des valeurs de champ bien inférieures à 0,6 V/m.

9) **La 5G : là, on change réellement de monde !**

La 5G, cinquième génération de téléphonie mobile, présente de vraies avancées technologiques, mais si la technologie est « neutre », son utilisation ne l'est certes pas, et les problèmes que soulève la 5G sont plus graves à ceux que soulèvent les générations précédentes. Ces inquiétudes sont d'ordre sanitaire et environnemental, économique et sociétal. On a coutume de dire qu'il ne s'agit pas d'un simple bond technologique s'apparentant, par exemple, à celui qui a consisté à passer de la 2G à la 3G ou de la 3G à la 4G et **c'est largement vrai**. Voici ce qui fait de la 5G une technologie à part :

La 5G utilise des fréquences plus hautes que les générations précédentes :

En France, **trois bandes** sont utilisées par la 5G:

0,7-0,8 GHz (Free mobile) : bande déjà utilisée par la 4G

1,8-2,1 GHz (Bouygues, SFR, Orange) : bande déjà utilisée par la 4G

3,5 GHz (plus précisément entre 3,4 GHz et 3,8 GHz, intéresse les 4 opérateurs) : cette nouvelle **bande de fréquences 3,5 GHz** (appelée « fréquence-cœur » ou « bande-cœur » de la 5G) offre le meilleur débit des trois bandes.

A terme, la 5G convoite une **quatrième bande** en beaucoup plus haute fréquence : **24,25 GHz à 27,5 GHz**²⁸, mais cela pourrait éventuellement aller encore plus haut en fréquence (60 GHz ?). On entre alors dans la zone des « ondes millimétriques », car la longueur d'onde de cette bande de fréquence correspond à des valeurs de l'ordre du millimètre²⁹. Le débit prévu est exceptionnel, mais on verra plus loin que cela pose aussi de graves problèmes, notamment dans la surveillance de l'environnement.

Si l'on passe en revue les spécificités de toutes ces bandes, on peut dire ceci : la première bande (basses fréquences, si l'on peut dire : 0,7-0,8 GHz) permet **une longue portée et une bonne pénétration dans les bâtiments** (milieu urbain), mais *le débit est médiocre* ; la seconde (1,8-2,1 GHz)

²⁷ Agence Nationale des Fréquences

²⁸ Selon le cabinet ARIASE (qui se définit lui-même comme « un portail web de référence dédié aux opérateurs et aux offres télécoms »)

²⁹ Rappelons que la longueur d'onde λ d'un rayonnement de fréquence f se calcule aisément par la formule : $\lambda = c/f$ (c divisé par f), où « c » est la vitesse de la lumière, soit 300 000 000 (trois cents millions) de mètres par seconde. Pour une fréquence de 5 GHz, $f = 5\,000\,000\,000$ (cinq milliards de cycles par seconde). En divisant la vitesse de la lumière c par la fréquence f , on trouve $\lambda = 0,06$ m, soit 6 cm. Pour $f = 24$ GHz, on trouverait $\lambda = 12$ mm.

est un peu plus performante, mais la portée et la pénétration des bâtiments sont moins bonnes ; le débit merveilleux que la 5G nous promet, concerne la bande **3,4-3,8 GHz** : elle **porte moins loin (atténuation) et pénètre moins dans les bâtiments, mais offre un meilleur débit** : c'est donc un **bon compromis**. Enfin, la bande 26 GHz a une **faible portée, un mauvais pouvoir de pénétration, mais un débit exceptionnel**. La publicité sur les futurs avantages de la 5G se base sur les plus hautes fréquences.

La 5G met en œuvre beaucoup plus d'antennes, « à hauteur d'homme » :

Beaucoup plus : cela tient au fait que les très hautes fréquences subissent davantage d'atténuation que les fréquences plus basses. Antennes à hauteur du visage ? Cela ne rassure pas vraiment ! Tout cela ne va pas dans le sens d'un abaissement du brouillard électromagnétique ...

La 5G utilise la technologie « massive MIMO » et la technologie « Full Duplex » :

MIMO = multiple input multiple output = multiples entrées multiples sorties, en français. Pour plus de clarté, revenons un instant aux antennes précédentes. Une antenne 4G est, dans le détail, constituée de nombreux éléments appelés « connecteurs », qui sont des antennes miniatures. Dans le cas des antennes 4G+, par exemple, on en compte une douzaine. Ces micro-antennes sont utilisées ainsi : une partie pour appeler (émission), l'autre partie pour recevoir. Par exemple il y en a 8 en émission et 4 en réception. Chaque élément ne peut pas en même temps recevoir et émettre. Les téléphones portables sont également dotés d'antennes à plusieurs canaux (mais il y en a moins : 2 ou 4). Avec la 5G, rien de tel : la technologie dite *Massive MIMO*, très astucieuse, permet à chaque élément d'antenne (connecteur) **de faire en même temps émission et réception, sur une même fréquence**. En outre, il y a beaucoup plus d'éléments (connecteurs) sur une antenne 5G. Par exemple, une antenne pourra être constituée par un réseau *matriciel* carré de 16x16 connecteurs, soit 256 connecteurs, utilisant 256 canaux. Un système électronique permet de couper le signal en émission durant un très bref instant, si un signal arrive au même moment en réception sur le même canal : c'est le *Full Duplex*. L'ensemble de ces deux facilités *MASSIVE MIMO/Full Duplex* fait que le **temps de latence est réduit au minimum, soit au plus 1 milliseconde (1 ms)**. Le temps de latence, c'est en effet **l'argument de vente central de la 5G**. Par définition, il s'agit de l'intervalle de temps qui sépare l'envoi d'une commande et le moment de la réponse du système commandé, qui doit être de l'ordre de la milliseconde. Une voiture autonome doit en effet réagir très vite : il faut éviter l'obstacle, et 1 milliseconde, à 100 km/h, soit 28 mètres par seconde, ça représente 2,8 cm. Trop tard, on a écrasé le bout du pied d'un piéton imprudent, mais on a évité l'autobus (en principe du moins) !

La 5G génère une focalisation automatique du faisceau sur l'utilisateur (*beamforming et beamtracking*) :

Avec la 5G, un appel d'un client est interprété par l'antenne la plus proche, et un processus appelé « commande de phase » fait converger un faisceau sur l'utilisateur. Il n'y a donc plus de faisceau figé dans l'espace comme dans la 4G, mais des métamorphoses rapides des faisceaux en un ensemble convergent, focalisé sur la « cible » (smartphone, voiture autonome, ...). C'est ce que le jargon technique appelle « *beamforming* », en français : *formation du faisceau*, suivi du « *beamtracking* » (en français, *suivi du faisceau*) : *on ne lâche plus la cible, c'est verrouillé, c'est rapide et puissant* ! Malheureusement, ça pourra aussi **irradier le passant qui se trouve entre émetteur et récepteur et qui ne demandait rien** ! Ce processus est destiné à suivre l'utilisateur (la voiture autonome) sans

discontinuer (pilotage ininterrompu, ça vaudrait mieux !), en évitant de balancer des ondes tous azimuts, et aussi en évitant les interférences entre faisceaux. Enfin, grâce au procédé de « **slicing** » (encore de l'anglais ! ça pourrait se traduire par « **saucissonnage** », mais ça ne fait pas très techno), c'est-à-dire le découpage du réseau en tranches, le système pourra rendre prioritaire une opération vitale (appel au secours pour une intervention urgente, ou une opération de télé-chirurgie) par rapport à un simple téléchargement, qui n'est pas vital, lui. Un point inquiétant : en ce qui concerne les smartphones 5G, on considère généralement que leur puissance sera de deux à dix fois celle d'un smartphone 4G, et qu'ils contiendront beaucoup plus de connecteurs (micro-antennes). Un surcroît de puissance en émission, ça ne va pas dans le bon sens environnemental ou sanitaire !

Les stations de base 5G mettent en jeu des puissances d'émission bien plus élevées que les générations précédentes.

S'agissant de la 5G « cœur de bande », il n'est pas rare de voir apparaître des installations dont les puissances (PIRE) dépassent 50 000 watts, ou 85 000 watts, comme on l'a vu plus haut. Si tous les connecteurs se focalisent sur une même zone réduite (beaucoup de « clients » au même endroit), le champ est très élevé. Nous avons calculé que dans ce cas – probablement rare, nous l'admettons – le champ, à 50 m, est de 32 V/m, et de 16V/m à 100 m. On nous objecte : «Vous l'admettez, cette configuration de concentration en un point unique est peu probable ! ». Certes, mais, tant que nous en sommes aux probabilités, croit-on que la sécurité est un jeu de roulette russe ? Si un pont routier est garanti pour 20 tonnes, doit-on laisser un « improbable camion » de 40 tonnes le traverser ?

Quelques aspects environnementaux de la 5G :

Beaucoup de choses sont à dire sur la 5G, une technologie à laquelle nous peinons à trouver quelque utilité. Par contre, nous y trouvons beaucoup de points négatifs. Outre une augmentation à terme du brouillard électromagnétique (malgré les dénégations de l'ANFR basées sur une argumentation abracadabrante, qui conclut que l'exposition aux ondes n'augmente qu'à la marge avec la 5G !), cette technologie semble bien nous entraîner vers une société ultra-surveillée, où la reconnaissance faciale n'est que la partie émergée de l'iceberg, car l'ultra-connexion nous accompagnera partout et à tout instant. Au paragraphe suivant, nous développons quelques aspects liés à la multiplication des objets connectés, dont le développement, à terme, est intimement lié à la 5G. Sur le plan « pillage de l'environnement », le développement de ces nouveaux objets amènera un surcroît d'extraction de matières premières. Pour ne parler que des smartphones, la construction d'un tel appareil requiert l'utilisation de **45 métaux différents**, dont des métaux précieux (or, argent, palladium, ...), ou rares (nickel, tantale). Le lithium lui-même n'est pas une ressource rare, il y en a beaucoup de gisements dans le monde, mais son extraction est polluante, consomme de grandes quantités d'eau et pose de sérieux problèmes politiques et moraux (exploitation des travailleurs, dont des enfants, violences, milices armées, ...). Quant aux « puces » qui nous envahissent (*voir paragraphe plus bas*), elles sont elles aussi très gourmandes en matières premières. Sur le plan « sobriété énergétique », parlons-en ! Le numérique (toutes technologies confondues) consomme actuellement 3,3% de l'énergie mondiale finale, tant pour la fabrication et que pour l'utilisation. Cette proportion croît de 9% par an, et la 5G y sera pour beaucoup, si elle se développe comme le souhaitent ses tenants. En 2025, le numérique pourrait atteindre 5% de l'énergie mondiale consommée. En 2020, il émettait déjà 3,7% des GES (gaz à effet de serre), mais cela pourrait monter à 7,5% en 2025. Les accords de Paris de 2015 (COP 21) requéraient une réduction de 5% par an des GES dus au numérique : on assiste plutôt à une

augmentation de 9% par an de ces émissions, soit un écart de 14% ! On part dans le mauvais sens, à 180 degrés de ce qui était souhaité ! Que dire d'autre ? Et qui, en « haut lieu », entend la voix de la sagesse ?

Quelques aspects sanitaires de la 5G :

Sur le plan sanitaire, l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) avait été chargée par le Gouvernement de rédiger un rapport sur les impacts éventuels de la 5G avant son déploiement. Outre le fait que ledit déploiement est intervenu avant la parution du rapport final (2021), les autorités ne l'ont visiblement pas lu, car, si les médias « mainstream » l'ont résumé en : « 5G, pas de danger », la conclusion était plutôt : « **Pas de risques nouveaux pour la santé au vu des données disponibles** ». Donc : (i) il y avait des risques déjà connus, et (ii) on manque de données pour conclure à l'innocuité des fréquences utilisées. Bien sûr, dans ce rapport, il n'y a certes pas que des alarmes, et la conclusion reste timide, mais on lit ça et là dans le texte (240 pages) des remarques inquiétantes telles que :

"Les études ciblant des effets cellulaires et moléculaires tendent souvent à montrer que l'intensité des effets biologiques augmente avec la fréquence des signaux étudiés."

"La littérature scientifique ne fournit pas suffisamment d'études à 3,5 GHz ou dans des fréquences voisines (seulement 5 études et dans des domaines très disparates) pour pouvoir procéder à une évaluation du niveau de preuve d'effets sanitaires éventuels à cette fréquence spécifique."

"Peu d'études dosimétriques proposant une analyse fine de l'exposition des différents tissus aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz sont cependant disponibles à ce jour."

"Le rôle éventuel de l'intermittence des signaux radiofréquences utilisés par les communications mobiles sur les interactions biophysiques mériterait d'être mieux étudié."

"Les travaux sur les membranes artificielles mettent en évidence l'existence d'effets. Les modifications à la fois structurales et fonctionnelles qui en résultent peuvent avoir des conséquences directes sur les propriétés des membranes biologiques. Ainsi, si l'ensemble de ces travaux ne permet pas d'évaluer les risques sanitaires, ils démontrent néanmoins l'existence d'effets non thermiques et donnent une idée des effets éventuels des ondes millimétriques sur les membranes cellulaires."

« En conclusion, cette étude montre une augmentation de la mobilité des spermatozoïdes exposés aux radiofréquences, mais la faiblesse des tests statistiques ne permet pas de bien apprécier cet effet. Il s'agit d'une seule étude, de qualité moyenne. De ce fait, il n'est pas possible de conclure sur les effets des radiofréquences dans la bande de 26 GHz du système reproducteur mâle. Aucune donnée n'est disponible sur le système reproducteur femelle. Des études sont nécessaires aussi bien in vitro que in vivo pour évaluer le risque pour le système reproducteur de l'exposition aux ondes dans la bande 26 GHz »

Bon, mesdames et messieurs, méditez sur la dernière phrase, surtout si vous désirez avoir une descendance, ça arrive parfois...

De toutes ces interrogations, on conclut que l'on va soumettre sans état d'âme des milliards de gens à l'action d'ondes dont on n'est pas sûr qu'elles soient sans danger, et cette exposition sera universelle, car (on va le voir au paragraphe suivant), la couverture globale sera assurée par des satellites dédiés. Les « responsables » ignorent que *ce genre de délit porte un nom : l'expérimentation sur l'humain*. On rappelle que le Code de Nuremberg (1947), puis la déclaration

d'Helsinki (1964) bannissent toute expérimentation sur l'être humain. C'est bien beau, mais la croissance, qu'en faites-vous, chers Amish ?

Les constellations de satellites 5G

Des satellites dédiés à la 5G sont déjà en orbite, et utilisent la bande de 26 GHz. La firme américaine Starlink annonce (décembre 2022) en avoir placé 3300 sur orbite (contre 1800 en début 2022), et veut en envoyer 12 000 (mais Starlink n'exclut pas d'en envoyer à terme plus de 40 000 !). D'autres firmes sont dans les starting-blocks : USA, Royaume-Uni, Canada, Chine,...et la France aussi, bien sûr (Thalès): bientôt, ce pourrait bien être plusieurs **dizaines de milliers de satellites dédiés à la 5G** qui tourneraient sur des orbites basses (quelques centaines de kilomètres³⁰). Depuis l'été 2020, on peut en voir passer dans le ciel par « trains » entiers, polluant nos nuits étoilées. Quand on sait qu'environ 9000 étoiles sont visibles à l'œil nu, ces intrus ne pourront pas passer inaperçus. Tout ceci présente plusieurs inconvénients environnementaux majeurs, touchant directement ou indirectement à la santé et la sécurité, outre le fait qu'ils sont directement impliqués dans l'Internet des Objets. Quels peuvent être les **effets sanitaires** ? A priori, la puissance rayonnée par un satellite est **extrêmement faible** en arrivant à la surface terrestre, très vraisemblablement incapable par elle-même de nuire directement à la santé humaine. On sait que dans le cas d'une antenne satellite pour la réception TV, le minuscule signal reçu par la parabole doit être très fortement amplifié. Le problème, c'est que les faisceaux électromagnétiques 5G échangés entre la Terre et les satellites doivent passer à travers *l'ionosphère*, une couche de la très haute atmosphère comprise entre environ 80 km et 1000 km au-dessus de la surface terrestre. La densité atmosphérique y est extrêmement faible, et les rayons UV et X du Soleil, et aussi les rayons cosmiques *ionisent* les molécules et les atomes présents, c'est-à-dire leur arrachent un électron, si bien que chaque centimètre cube contient une centaine *d'ions positifs*. Pas de panique : cela fait des milliards d'années que ça dure, et nous sommes toujours là! Cette ionosphère est le siège de vibrations naturelles d'ensemble, de très basses fréquences, entre 3 Hz et 60 Hz. On les appelle *résonances de Schuman* (du nom du scientifique allemand qui les a découvertes). L'énorme zone comprise entre la surface de la Terre et l'ionosphère se comporte ainsi comme une cavité résonante, ayant ses modes propres de vibration, tout comme une corde de piano présente une vibration fondamentale et des harmoniques. Or, il se trouve que **l'Appel international pour l'arrêt du déploiement de la 5G sur la Terre et dans l'espace**³¹, signé par de nombreux scientifiques et médecins, mentionne le danger potentiel d'une perturbation de l'ionosphère par les faisceaux échangés entre satellites et surface terrestre. Une perturbation possible des résonances de Schuman aurait, selon les signataires, un impact sur le vivant. Ils se réfèrent à des observations (mais ils n'en donnent pas la référence dans leur appel) comme quoi une centaine de satellites en orbite basse, en service depuis 1998, et impliqués dans des communications 2G et 3G, auraient déjà eu un impact négatif sur des animaux et des humains, malgré des puissances radiatives infimes en surface. Pour expliquer cet impact, ils se sont tournés vers les perturbations des fréquences Schuman. Donc, si 20000 satellites en orbite basse sont lancés pour la 5G (les signataires de l'appel avancent ce

³⁰ Les orbites s'étagèrent entre 300 km et 1000km environ, car le sacro-saint *temps de latence minimum* ne pourrait pas se satisfaire des satellites géostationnaires qui restent à 36000 kilomètres. En effet, les ondes électromagnétiques sont trop lentes : elles se traînent à la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s ! Manque de chance, on ne peut pas aller plus vite que ça. Sacré Einstein, il ne connaissait pas la 5G, sinon il n'aurait pas osé assigner cette limite indépassable de vitesse à la lumière...

¹⁸ www.5gspaceappeal.org > the-appeal

chiffre, mais on a vu qu'il est sans doute timide et serait de 40 000 rien que pour Starlink), ces spécialistes ont quelques raisons de s'interroger...

Sur le plan environnemental, ces satellites sont en orbite basse, et ont donc une durée de vie courte, à cause de la friction avec les couches supérieures de l'atmosphère : même si la densité de l'atmosphère est extrêmement ténue à plusieurs centaines de kilomètres de la surface, la vitesse du satellite est telle que le frottement (très faible mais continu) entre satellite et atmosphère finit par altérer complètement l'orbite, et ça finit en une jolie étoile filante : le satellite se disloque et tombe en morceaux. La retombée des débris dans l'atmosphère va générer des pollutions non négligeables. Ceux des satellites qui ne retomberont pas vont multiplier par 3 la densité des objets en orbite (on compte environ 20 000 objets en orbite en 2020 : satellites, vaisseaux habités, débris de fusées, etc....). Gare aux embouteillages là-haut!

Ces satellites nous empêcheront d'admirer tranquillement le ciel nocturne et les étoiles filantes, car ils sont très brillants, mais les poètes et les rêveurs, *ça n'est pas rentable*. Il y a peut-être pire. Voici pourquoi :

Utilisant la bande de 26 GHz, les communications bidirectionnelles entre ces satellites et la Terre vont perturber les observations astronomiques et météorologiques (nous avons évoqué plus haut les incertitudes de l'ANSES elle-même quant aux effets possibles des RF de très hautes fréquences de 3,5 GHz et 26 GHz).

Voyons d'abord les astronomes: l'appel international des astronomes³² « *Appeal by Astronomers: safeguarding the astronomical sky* » (« *Appel des astronomes : sauvegarder le ciel astronomique* ») pointe les dommages irréparables dans certaines bandes de fréquences : les radio-interféromètres et les radiotélescopes en surface verront leurs *bandes spectrales polluées*. Des opérations que les astronomes réalisent en ce moment, comme le « scan » du ciel entier en 3 jours, de même que les « scans » à échelle réduite et longue durée seront désormais impossibles. Il y a pire, potentiellement : la NASA coordonne un projet mondial de surveillance des astéroïdes qui s'approcheraient trop près de la Terre : la mission *NEO SM*, ce qui signifie : *NEO Surveillance Mission* (en français : *Mission de surveillance des objets célestes Proches de la Terre*). Il s'agit donc d'utiliser toutes les images spatiales disponibles pour voir si un gros astéroïde ne va pas venir nous flirer de trop près. Il est clair que ce projet est, lui aussi, bien menacé, car seule *une observation longue et patiente de tous les objets célestes* permet de remarquer le tout petit point brillant qui, mois après mois, se déplace dans le ciel. C'est peut-être un astéroïde appelé **géocroiseur**, un de ces objets énormes qui pourrait, un jour, venir nous rendre visite. Tous ces satellites si brillants rendront quasiment impossible la détection de cet intrus. Certains diront : un astéroïde, quelle importance ? Ah oui ? Demandez un peu aux dinosaures, tous tués par un très gros caillou de 10 km de diamètre, il y a 65 millions d'années! Ils n'avaient pas vu le film « Deep impact ».

Au tour des météorologues:

Environ 800 satellites sont dédiés à l'observation terrestre. Ils réalisent la mesure à distance (*téledétection par satellite*) des données dynamiques, thermiques et radiatives de l'atmosphère

³² Aller sur « astronomersappeal.wordpress.com »

(distribution 3D du vent, de la température, de la teneur en vapeur d'eau, nature et distribution spatiale des nuages, rayonnement solaire réfléchi, rayonnement infrarouge émis, ...), ainsi que de la composition chimique de l'atmosphère (gaz, aérosols,...), sans oublier les caractéristiques de la surface terrestre elle-même: zones continentales, océaniques, et cryosphère (zones où l'eau se rencontre sous forme solide : neige, banquises, glaces terrestres). Les satellites météo sont porteurs d'instruments de type *radiomètres ou imageurs (télé-détection passive)*, mais peuvent aussi embarquer *des radars spatiaux (télé-détection active)*. Il est important de noter que ces satellites ont notamment la capacité de *suivre la formation des cyclones et autres ouragans, et de les prévoir avec plusieurs jours d'avance*. Seulement, il y a un « hic »: les météorologues utilisent en particulier la bande des 23.8 GHz pour mesurer précisément la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, grâce à des radiomètres hyperfréquences (télé-détection passive). Contrairement aux radars, ces radiomètres n'émettent pas de CEM. Ils sont basés sur le principe physique qui veut que tout corps émet un rayonnement dans toutes les longueurs d'onde, et les radiomètres mesurent ce rayonnement. Soit par exemple un satellite qui effectue des mesures multi spectrales passives dans les bandes 6 GHz, 10 GHz, 18 GHz, 24 GHz, 36 GHz et 60 GHz. Grâce à son radiomètre fonctionnant dans ces bandes, il mesure l'état de l'atmosphère sur son trajet : température de surface, vitesse du vent, teneur en eau liquide et pluie, vapeur d'eau. On tombe sur un problème majeur si la 5G s'invite sur certaines de ces bandes, en particulier sur la bande 24 GHz. *Cette bande 24 GHz est archi-précieuse, car c'est exactement dans l'intervalle 23,6-24 GHz que la vapeur d'eau est détectable*, à l'exclusion des autres grandeurs atmosphériques, qui ne se manifestent quasiment pas dans cette bande. Il faut l'affirmer : cette bande 23,6-24 GHz **doit être préservée absolument**, sans quoi les mesures des satellites ne valent rien ! En effet, la vapeur d'eau a la fâcheuse habitude de se manifester également dans toutes les autres bandes, que l'on vient d'énumérer, et cela fausse les mesures des autres grandeurs. Pas de panique cependant, car si l'on connaît la teneur exacte en vapeur d'eau de l'atmosphère, on peut, **par des algorithmes de correction appropriés**, « nettoyer » les autres bandes de la « pollution » due à la vapeur d'eau, et tout rentre dans l'ordre : on peut déterminer non seulement la teneur en vapeur d'eau, mais aussi toutes les autres grandeurs (vent, température, ...). Donc, il est ultra-important de ne pas venir polluer la bande « vapeur d'eau » 23,6-24 GHz, car, répétons-le, **c'est le seul canal qui permet de mesurer la teneur exacte en vapeur d'eau**. Or, la 5G veut s'approprier la bande des 26 GHz : exactement l'intervalle de fréquences 24,25 GHz-27,5 GHz. C'est trop proche du canal vapeur d'eau : une émission 5G pourrait interférer avec la télé-détection de la vapeur d'eau, **et fausser entièrement l'estimation de cette grandeur**. Les météorologues estiment que les **prévisions météo**, qui s'appuient certes sur la modélisation numérique, mais ont besoin des observations, **pourraient être fortement dégradées**. En particulier, on perdrait du temps dans la prévision d'un **événement météorologique majeur (cyclone, ...)**. Comme le demandait l'ANFR elle-même, en juillet 2019: il faudrait « **sacraliser** » la bande des 24 GHz, mais les opérateurs n'en ont pas tenu compte. Ils doivent se dire : « Après moi, le déluge ? ».

C - Les téléphones, les objets connectés, les instruments domestiques, les précautions à observer et quelques aspects sociétaux

Quand une station de base téléphonique s'installe à proximité d'un lieu de vie (habitation, école, maison de soins, crèche ...), on s'inquiète à juste titre, *mais si protester est justifié, sait-on que des*

sources de danger sont présentes dans nos logements et peuvent être maîtrisées ? Sait-on que téléphoner avec le mobile collé à l'oreille expose à des champs extrêmement élevés : 10 V/m, parfois 20 V/m, comme si on était à proximité d'une antenne puissante, et cela pendant toute la durée de la conversation ? Il faut comprendre que ce petit appareil, qui peut être si utile quand des précautions sont prises, est une *véritable antenne-relais* ! Ce n'est pas la seule source de nuisances domestiques. En voici une liste, à la maison, sur nous, ou en voiture... Certains objets mettent en jeu des fréquences plus basses que les ondes téléphoniques, ce qui n'empêche pas de s'en méfier.

Ampoules fluocompactes (en 50 Hz): attention, pas trop près de la tête (le champ magnétique est supérieur à 3,75 microteslas, limite pour les champs magnétiques en 50 Hz).

Babyphones: ces appareils mettent en jeu des fréquences d'environ 40 MHz. Ce n'est pas dans la gamme des ondes téléphoniques RF, mais il faut être inconscient pour soumettre des bébés à de telles agressions !

Box : si la fonction wifi est désactivée (*voir ci-dessous*), ce boîtier d'interface entre communications entrant et sortant ne présente a priori aucune émission RF notable. Par contre, certaines observations ont montré que sur les boxes les plus récentes, il y aurait une émission « cachée » dans la gamme des 26 GHz même après arrêt... Précautions à prendre : remplacer la wifi par un câblage filaire (RJ 45), mettre la box « à la terre » et, si l'on veut éviter la possible émission en 26 GHz, entourer la box « en papillote » avec une feuille de papier d'aluminium.

Bracelets et montres connectés : équipés d'un mini émetteur-récepteur, ils donnent l'heure mais aussi renseignent sur votre activité. Certains inconscients préconisent d'équiper les enfants de bracelets connectés, « pour leur sécurité ». Ben voyons ! Ces jeunes organismes en croissance seront saturés d'ondes (effet cumulatif observé même pour de basses intensités, très inquiétant pour des organismes en pleine croissance). Par contre, ils habitueront nos chers petits à porter un bracelet électronique en cas de condamnation devant un tribunal s'ils tournent mal...

Casque de réalité virtuelle: grâce à ce petit écran qui couvre les yeux, on pourra tout aussi bien visiter virtuellement sa future résidence que s'imaginer Rolland à Roncevaux ou Saladin reprenant Jérusalem... et tout cela grâce au très haut débit de la 5G ! Bienvenue aussi dans le « Métavers », un autre univers si celui-ci ne vous convient pas ! Evidemment, avec cette activité, on est bombardé d'ondes au niveau de la tête... mais au moins, on ne pense pas à autre chose... *Panem et circenses*³³, comme disaient les anciens.

Compteurs communicants (Linky, Gazpar, Aquarius): ces trois compteurs communicants, prétendus « intelligents » (pour respectivement, les consommations d'électricité, de gaz et d'eau) font l'objet d'une énorme pression de la part des fournisseurs, mais seul le Linky est prétendu obligatoire. Insistons sur ce point : c'est faux ! Il est illégal de présenter le Linky comme obligatoire, car il n'en est rien. Ainsi, la cour d'appel de Bordeaux, dans un jugement en date du 17/11/2020, dit : « ***Ainsi, contrairement à ce qu'affirme la société Enedis, aucun texte légal ou réglementaire, européen ou national n'impose à Enedis, société commerciale privée, concessionnaire du service public, d'installer au domicile des particuliers des compteurs Linky ...*** ». La seule obligation que la loi impose

³³ « *Du pain et des jeux* » : le poète latin Juvénal, il y a presque vingt siècles, fustigeait déjà la manie des gouvernants consistant à donner au peuple des divertissements et de la nourriture pour les empêcher de se révolter. Différence : aujourd'hui, tout cela n'est plus donné, c'est devenu payant, mais ça semble bien marcher quand même !

à l'abonné est de payer les factures à ENEDIS. Ce n'est pas ici le lieu de rapporter les nombreuses polémiques qu'a soulevées l'arrivée de ces instruments à l'utilité douteuse et, du moins pour le Linky, néfastes pour la santé des électrosensibles (sans même parler de la question de la surveillance des abonnés). Nous renvoyons le lecteur sur le site de l'association *Robin des Toits* où tous ces points sont développés. En ce qui concerne leur impact électromagnétique, il convient de distinguer le Linky des deux autres. Si ce compteur n'émet, par lui-même, que peu d'ondes RF, des observations effectuées par le CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) ont montré que, fréquemment, des *trames* de moyennes fréquences dans la bande 30 kHz-95 kHz, sous forme pulsée, sont présentes dans le circuit électrique du logement. Cela est très préjudiciable aux personnes électrohypersensibles, et contredit les affirmations lénifiantes des industriels concernés. De plus, une « grappe » de compteurs, dans un quartier donné, communique ses informations via un concentrateur qui n'est rien d'autre qu'une antenne de télécommunications.

Quant au Gazpar et à l'Aquarius, ils ne font l'objet d'aucune obligation, mais, outre leur éventuel rôle d'« espion des ménages » comme le Linky, ils fonctionnent comme des téléphones mobiles, et envoient leurs mesures à un concentrateur. La fréquence utilisée par le Gazpar est de 169 MHz, et celles de l'Aquarius sont : 169 MHz, 433 MHz ou 868 MHz. Tous deux ont également besoin d'un concentrateur. Ces compteurs participent donc à l'accroissement constant du « brouillard électromagnétique ».

Domotique (tout ceci fonctionne avec bluetooth ou wifi, et grâce à la 5G):

Porte de garage, volets roulants, climatisation, chaudière, ceci peut être commandé à distance. Réfrigérateur « intelligent » (Il nous annonce : « Il ne reste que deux yaourts au beurre de chamelle », ou bien « Le paquet de steak de crapaud bolivien bio sera périmé dans 3 jours,...) : le summum de l'inutile, car on peut vérifier l'état de son réfrigérateur soi-même.

Enceintes Bluetooth (manette de jeu ou musique): ces enceintes mettent en jeu des fréquences de l'ordre de quelque GHz. A proximité, le champ varie de 0,3 à 0,6 V/m, et leur utilisation pendant de longues heures est dangereuse. Comme la Wifi et le téléphone à base DECT (*voir plus bas*), cet appareil met en jeu une porteuse à très haute fréquence et des pulsations.

Four microondes : ce n'est certes pas un appareil destiné à communiquer, mais il utilise des ondes de fréquence 2,45 GHz (2450 MHz). Ces ondes interagissent avec l'eau contenue dans les aliments. En voici très succinctement le principe : les molécules d'eau se comportent comme de petits aimants que l'onde entraîne à vitesse folle. Comme les molécules d'eau sont liées les unes aux autres par des forces électrostatiques, il en résulte des frottements qui provoquent l'échauffement de la masse de l'aliment à cuire. Il faut donc éviter que le cuisinier, dont le corps comprend 75% d'eau, ne se mette lui-même à cuire. Or, aussi élaboré qu'il soit, un four micro-ondes présente toujours des « fuites » d'onde. Ne jamais rester à proximité d'un four micro-ondes en marche : mieux vaut quitter la cuisine si l'on tient absolument à utiliser cet appareil.

Ordinateur portable : les ordinateurs portables n'émettent pratiquement rien si on prend la précaution de les configurer en « mode avion ». Les tablettes et les téléphones portables également. Dans ce cas, pour utiliser Internet, on doit communiquer avec la box par un moyen filaire. Sinon, on peut mesurer jusqu'à 4 V/m à proximité immédiate (attention : en général, on a la main gauche juste au-dessus de l'émetteur de l'ordinateur !)

Plaques à induction (100 kHz) : les EHS y sont sensibles, il y a bien d'autres techniques pour cuisiner !

Puce RFID et Internet des Objets :

La puce RFID, ce minuscule composant électronique, dont le sigle signifie *Radio Frequency Identification* (en français: *Identification par Radiofréquence*), nous a envahi sans même que nous nous en rendions compte, alors même que nous voyons quotidiennement celle de notre carte bancaire. Quand on parle de « cartes à puce », il s'agit de RFID. Ces puces sont présentes dans de nombreuses cartes d'usage quotidien, dans les vêtements et autres articles (étiquettes « pucées » pour éviter le vol !), dans les cartes d'embarquement, la carte Vitale, la carte du club de boules, etc.... Des dizaines de milliards de puces sont produites chaque année, dont beaucoup ne sont même pas recyclées. Or, une puce RFID est constituée d'un microprocesseur en silicium et d'une antenne. Deux problèmes au moins : gaspillage des ressources, et accroissement du brouillard électromagnétique. Certaines puces sont passives : les informations qu'elles contiennent sont lues quand un lecteur RFID les interroge. Dans ce cas, pour répondre, la puce utilise la puissance de l'onde transmise par le lecteur. D'autres puces sont actives, et possèdent un émetteur et une petite source d'énergie ! Les fréquences mises en jeu vont de 130 kHz à plus de 6 GHz. La portée varie de moins d'un mètre à la dizaine de mètres. Et vous savez quoi ? Il est légal (depuis 2015 en France) de s'en faire poser dans le corps ! Ce sont de minuscules capsules, semblables à un grain de riz, que l'on pose sous la peau. Après les animaux de compagnie, c'est au tour des humains. Sous la peau ou même dans le cerveau, la puce servirait à des fins médicales, mais qui ne voit les dérives possibles ? Certains rêvent de puces implantées contenant toutes les informations personnelles. Plus besoin de papiers, de porte-monnaie, de carte de paiement...A chacun ses rêves ! Une chose est certaine, avec la puce, on fait entrer un petit brouillard électromagnétique supplémentaire dans notre organisme, et notre liberté en prend un coup ! Ce qui est certain, c'est que la puce RFID est un élément essentiel à l'ère de *l'Internet des Objets*.

L'Internet des Objets. Nous connaissons évidemment l'Internet du quotidien, qui cesse de nous concerner dès que l'on éteint notre terminal (PC, smartphone, tablette, ...). Avec la 5G, voici qu'arrive *l'Internet des Objets* (en anglais : *IoT*, pour *Internet of Things*). Là, l'humain n'a quasiment plus rien à faire : tous les objets de notre quotidien seront connectés, interconnectés entre eux, y compris nos vêtements, voire... nous-mêmes, on l'a vu, et tout ça nous passerait au-dessus de la tête (ou dedans, si l'on est pessimiste). Tous connectés, mais pour notre bonheur ! A propos, que vont devenir les milliards de milliards de données personnelles ainsi glanées ? Perdues ? Sans doute pas pour tout le monde. L'exploitation des données personnelles, il faudrait être bien naïf pour penser que ça n'existe pas déjà. Exemple : vous revenez juste du Supermarché d'outillage, mais un petit message publicitaire vous attend dans votre ordinateur, car vous n'avez pas encore acheté leur super-découpeur à couple inverse contrôlé : un oubli, sans doute ! Eh oui, votre carte de paiement vous a trahi ! Alors, que sera la suite de l'Internet des Objets ? Interface homme-machine, humanité augmentée, transhumanisme... n'allons pas plus loin, nous serions taxés de complotisme, et pourtant...

Téléphone fixe sans fil (technologie DECT).

L'abréviation DECT signifie *Digital Enhanced Cordless Telecommunications*, soit, en français : « Télécommunications numériques améliorées sans fil ». Ils comprennent une base, sur lequel le combiné peut se recharger, et le combiné (téléphone) lui-même. La base est un émetteur-récepteur,

tout comme le téléphone lui-même. La gamme de fréquences utilisées se situe vers 1900 MHz. Ces appareils ont presque partout supplanté le téléphone filaire, et c'est regrettable, car tant la base que le combiné, pendant le fonctionnement, émettent plusieurs V/m ! Nous ne lui trouvons aucune justification, puisqu'on peut avantageusement le remplacer par un téléphone *filaire*.

Téléphone mobile (portable, smartphone, ...) et, en passant, une solution possible au problème de l'excès d'ondes

Le téléphone mobile est une véritable antenne émettrice-réceptrice, et il utilise exactement les mêmes ondes que les antennes-relais, mais à plus petite échelle. Par exemple, il transforme la voix en signal numérique et l'envoie grâce à l'onde porteuse vers l'antenne la plus proche. Son émission est également pulsée et multi-chaotique. Inversement, il reçoit les messages via l'antenne-relais la plus proche. Technologiquement parlant, c'est une très belle réussite ! Oui mais, associé au réseau de téléphonie mobile, le téléphone est sans cesse aux aguets, même quand on ne passe pas d'appel : il se signale au réseau par des appels brefs et répétitifs. Il recherche en permanence l'antenne la plus proche. Un progrès pour la santé : depuis la 3G, les téléphones mobiles émettent à puissance adaptée (les 2G émettaient toujours au maximum). Par contre, si on téléphone en roulant, ou même en marchant, l'appareil est sans cesse occupé à rechercher l'antenne la mieux adaptée et la puissance d'émission augmente. Il faut également noter que – sur le plan des principes – un réseau d'antennes de faible puissance, mais rapprochées, aurait pour résultat que le téléphone ne rechercherait pas, à forte puissance, à se connecter à une antenne puissante, mais éloignée : au contraire, le champ qu'il émettrait serait plus faible, et les débits montants (du téléphone vers l'antenne) et descendants (de l'antenne vers le téléphone) seraient bien meilleurs. Les champs émis par les antennes seraient également bien plus acceptables. Au final, tout fonctionnerait mieux ! **Ce n'est pas du rêve: tout cela a été prouvé une étude menée par l'ANFR elle-même en 2017-2018, avec l'appui technique de trois opérateurs**³⁴. Ce test, cependant, était plutôt destiné à tester la faisabilité d'un réseau dense d'antennes 5G urbaines, mais il garde tout son intérêt pour les défenseurs d'un environnement sans brouillard électromagnétique : ce serait un moyen pour parvenir à ce but. Les opérateurs, on s'en doute, ne sont pas partisans de cette transformation.

Reste un élément essentiel quand on fait l'acquisition d'un téléphone mobile : quel est son « DAS », c'est-à-dire son *débit d'absorption spécifique* ? Cette grandeur est supposée qualifier la dangerosité ou l'innocuité d'un téléphone. C'est par définition la puissance envoyée par l'appareil et absorbée par le corps humain rapportée à la masse (poids) du corps. Il ne devrait pas, selon la réglementation française, dépasser 2 watts par kilogramme (2W/kg). La valeur du DAS est communiquée à l'acheteur. Ce DAS a fait l'objet de nombreuses critiques, nous n'insisterons pas sur ce sujet. On distingue parfois le DAS « tronc », le DAS « tête » et le DAS « membre ». Le seul intérêt du DAS est de pouvoir comparer les divers types d'appareils avant de faire son choix. Les valeurs du DAS constatées dans les diverses publicités vont de 0,4 W/kg à 1,6 W/kg. De toute façon, ne pas oublier que le champ qu'il émet à quelques millimètres varie de quelques V/m jusqu'à 20 V/m suivant le type. Or, il arrive souvent qu'on téléphone avec l'appareil « collé à l'oreille »... et même tenu à la

³⁴ « Rapport technique sur les déploiements pilotes de petites antennes en France pour favoriser l'accès au très haut débit mobile » - Document pdf à télécharger sur le site de l'ANFR : https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/petites-antennes/2018-12_Rapport_d%C3%A9ploiements_pilotes_petites_antennes_vf.pdf

main avec haut-parleur, il n'est pas innocent. A nous de choisir la façon la plus appropriée de s'en servir. Prudence ! Et enfin, ne pas en donner aux enfants de moins de 15 ans... ah, bon?

Vêtements connectés (voir aussi : *Internet des Objets, ci-dessous*)

Vêtements de sport, bonnets, parkas, cagoules, vestes, pulls, pantalons, robes, chaussettes, slips, caleçons, soutien-gorge connectés... n'en jetez plus ! Cherchez les pubs qui vantent ces produits si vous ne le croyez pas, et ajoutez à cette liste ce que vous pourrez trouver, c'est infini ! Oui, mais, dit la pub, c'est utile, un slip intelligent, au cas où le temps serait plus froid que prévu. Dans ce cas, votre sous-vêtement, qui, grâce à des capteurs thermiques, tensiomètres, capteurs cardiaques, etc., a noté que vous frissonniez de froid en rentrant chez vous, lance au thermostat domestique de la maison (connecté lui aussi, cela va sans dire !) l'ordre de remonter le chauffage (sauf si ce thermostat communique aussi avec le Ministère de l'Intérieur et que vous dépassez la consigne ! Attention, alors, car le *compteur Linky* est aussi connecté aux autorités, ça peut couper !). Il n'empêche, des vêtements connectés, c'est une bonne idée : comme ça, il n'y a pas que les oreilles que l'on irradie avec le smartphone, le reste y a droit aussi ! Et puis, ça peut nous sauver, car le tensiomètre et le capteur cardiaque intégrés aux sous-vêtements peuvent nous alerter si l'AVC nous guette – attention quand même : ces données seront accessibles à notre compagnie d'assurances, et le tarif pourrait bien augmenter³⁵ ! D'autres objets connectés existent encore, mais la décence nous interdit de les mentionner.

Voiture connectée et autonomie totale (avec la 5G) :

Ce sujet est emblématique d'un choix de société absolument crucial à propos duquel il faudra trancher : veut-on rester maître de notre vie ou, à terme, en confier la conduite (dans tous les sens du terme) à un guide extérieur ? Actuellement, beaucoup de voitures possèdent des capteurs de vitesse et de position (dont le GPS). Des caméras détectent les autres véhicules et les obstacles, et ces voitures peuvent même effectuer un créneau sans l'aide du conducteur (radar de recul et processus dit « park assist »). Attention à la terminologie: une *voiture connectée n'est pas forcément une voiture autonome*. La voiture connectée « de base » reçoit simplement des informations de l'extérieur, par divers moyens (caméras, radars, GPS, radio) et le conducteur reste indispensable, même si certains dispositifs rudimentaires assurent déjà des fonctions de sécurité (ralentissement automatique si le véhicule qui précède est trop proche, signal sonore et correction de trajectoire en cas de franchissement de bordure ou de ligne continue). Pour la suite, les stratégies de l'industrie automobile distinguent jusqu'à *six niveaux de connectivité* pour un véhicule automobile (voiture, autobus, camion,...). Le premier niveau requiert la présence permanente d'un conducteur. A mesure que l'on augmente de niveau, l'assistance à la conduite s'accroît. Au dernier niveau (pas encore réalisé, encore trop de problèmes à résoudre et pas toujours d'ordre technique³⁶), le volant ne sera même plus présent. Il suffira alors d'indiquer à l'ordinateur de bord les consignes de destination. Dans ce cas, il est clair que la 5G sera nécessaire pour gérer la circulation. En effet, à ce niveau de complexité, seule une centralisation des données en temps réel concernant chacun des véhicules susceptibles de se trouver sur une même portion de voies de circulation pourra, en théorie, assurer la sécurité et la fluidité de l'ensemble. La 5G, qui présente un temps de latence (délai entre un ordre

³⁵ L'honnêteté oblige à dire qu'il existe aussi des sous-vêtements qui protègent des CEM !

³⁶ ...dont le fameux dilemme : voici deux piétons imprudents, et malheureusement, la voiture ne pourra pas éviter de tuer l'un des deux ! L'intelligence artificielle à bord du véhicule devra décider si elle écrase le piéton A ou le piéton B. Quels critères pour choisir ?

et son exécution) très bas, de l'ordre du millième de seconde, est évidemment un maillon incontournable vers l'autonomie totale. Le véhicule deviendra alors une extension de la maison ou du bureau : passivité absolue, et ce n'est pas le seul aspect où le citoyen est « déchargé » de ses responsabilités. Cette société vous tente ? Si l'on ne veut pas de cette société de robots téléguidés, il est encore temps de réagir, mais il faut faire vite, car les bureaux d'étude ne chôment pas !

WIFI

La WIFI (*wireless fidelity*, ce qui signifie littéralement « fidélité sans fil ») est un procédé de télécommunications généralement présent sur une « box » (boîtier d'accès haut débit) qui permet d'accéder à Internet sans communication filaire. Cette technologie est basée sur une porteuse de fréquence 2,45 GHz, modulée par des pulsations de très basses fréquences (10 Hz, identique à la fréquence des ondes alpha du cerveau) et enfin, une multipulsation chaotique, générée par la nature du message transporté. Quand elle n'est pas interrompue, on mesure à proximité de la box entre 2 et 4 V/m. Il est souvent possible de se passer de Wifi en connectant sa box à son ordinateur via des fils électriques si possible blindés et en utilisant un connecteur « RJ 45 ». Au besoin, un électricien peut apporter une aide sur ces questions.

A SUIVRE....

Pour conclure : pas de panique, à nous de rétablir la sagesse numérique. Rien n'est perdu si nous savons résister aux fausses affirmations lénifiantes de ceux qui rêvent d'asservir notre liberté tout en niant les dangers. Rien ne nous interdit de posséder smartphone, tablette ou GPS, si nous sommes très attentifs à respecter certaines précautions, mais nous devons refuser définitivement les technologies invasives (5G et plus...), inutiles, consommatrices de ressources et d'énergie, mortifères pour le climat et la société.

Nous sommes maîtres de notre destin, n'en déplaise aux fâcheux. A nous de le rappeler à ceux qui l'oublie, et faisons nôtre la sagesse des anciens, qui nous incitent à ne pas courber l'échine :

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme » (Rabelais)

« Les tyrans ne sont grands que parce que nous sommes à genoux » (Etienne de la Boétie)

"L'ignorance et l'incuriosité sont deux doux oreillers » (Montaigne)

D'autres penseurs, des penseurs modernes, existent, qui prônent résistance, sagesse et modération. Chère lectrice, cher lecteur, vous en connaissez sans doute... Ils sont plus nombreux qu'on ne le pense et cela doit nous redonner espoir.

Document rédigé par :

Guy Cautenet, docteur es-sciences physiques, professeur retraité (Université de Clermont Ferrand)

Sylvie Cautenet, docteur es-sciences physiques, professeur retraitée (Université de Clermont Ferrand)

(Membres du Conseil Scientifique de Robin des Toits)