

SCIENCES

**TÉLÉCOMMUNICATIONS
D'HIER ET D'AUJOURD'HUI**

Vincent SAVAUX*

RÉSUMÉ : Les télécommunications sont un domaine des sciences et technologies que chacun utilise au quotidien, mais qui reste méconnu par le plus grand nombre de ses utilisateurs. C'est à partir de ce constat que cet exposé a été rédigé, afin de donner une vue d'ensemble des télécommunications, incluant un historique du domaine, la présentation des principes fondamentaux, ainsi qu'un cas pratique d'application.

SUMMARY: Telecommunications are a field of science and technology that is used by everybody in everyday life, but that is generally unknown by most of its users. This observation lead to this presentation, in order to provide an overview of telecommunications, including an historical background of the domain, the presentation of the basics, as well as a case of practical use.

Parmi tous les domaines technologiques, celui des télécommunications est sans doute le plus présent dans les habitudes quotidiennes de chacun. Qu'il s'agisse d'applications civiles ou militaires, objets, machines, animaux, humains tendent à être (inter)connectés via des réseaux tels que l'internet. Cependant, bien que la complexité de tels réseaux soit soupçonnée par tous, rares sont les personnes à connaître, ne serait-ce que partiellement, le fonctionnement des systèmes de télécommunications. La raison principale est qu'il existe peu de documents de vulgarisation à ce sujet, comme on peut en trouver

* Docteur en communications.

dans d'autres domaines des sciences et techniques tel que l'astronomie notamment.

Bien qu'utilisées par le plus grand nombre, les télécommunications restent très largement méconnues. Pourtant, qui ne s'est jamais demandé comment le message envoyé d'un téléphone arrivait à bon port ? Quelle différence y a-t-il entre la 2G, 3G, 4G ? Qu'est-ce qu'une onde ? Sont-elles dangereuses ? En y réfléchissant bien, les questions ayant trait au domaine sont nombreuses. Cependant, leurs réponses sont méconnues, sans doute en raison du fait que la curiosité est souvent freinée par la crainte *a priori* de ne pas comprendre. Il convient donc d'apporter un éclairage didactique à un domaine, certes complexe sur de nombreux aspects, mais dont les principes de base peuvent être compris par tous.

Dans cet exposé, nous nous intéresserons aux télécommunications modernes, telles que définies en 1904 par Édouard Estaunié, alors directeur de l'École Professionnelle Supérieure des Postes et Télégraphes. Mot créé du grec *tele*, loin, et du latin *communicare*, partager, les télécommunications sont définies comme la transmission à distance d'informations dans un canal filaire, électromagnétique ou optique, au moyen d'instruments électroniques et/ou d'informatique. Cela inclut donc, entre autres, la radio, la télévision, la téléphonie, l'internet, mais pas la communication sensorielle telle que la parole ou la communication sur un support physique tel que le papier.

Il conviendra cependant d'exposer, dans une première partie, un historique des procédés menant des télécommunications antiques aux modernes. Dans une deuxième partie, nous introduirons trois définitions comme un prérequis à la bonne compréhension de la suite de l'exposé. Ainsi, nous détaillerons des concepts tels qu'onde hertziennne, signal analogique et signal numérique, qui sont souvent confondus. Sur ce socle commun, certains principes de base des télécommunications seront abordés de manière didactique, bien qu'avec rigueur et dans le détail, à travers un cas pratique qui est l'envoi, le transport, et la réception d'un texto. Ce sont ces définitions et ce cas pratiques qui permettront d'y voir plus clair dans l'immensité et la complexité du domaine. Enfin, nous traiterons, dans une quatrième et dernière partie, de l'impact des télécommunications sur l'humain. Plus précisément, nous tenterons de répondre aux questions ayant trait aux problèmes de santé (corporels et psychiques) inhérents à l'utilisation de cette technologie.

BREF HISTORIQUE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

À la suite d'Édouard Estaunié, nous définirons les télécommunications comme le moyen de communiquer à distance avec ou sans dispositifs électriques. Si on excepte les communications du type pigeon voyageur, les méthodes non électriques ont le plus souvent comme source le feu ou le son. Pour les premières, on peut citer dès l'Antiquité, les phares, la communication codée par torches enflammées utilisée par les Grecs dès le III^e siècle avant J.-C.¹, mais aussi les signaux de fumée des peuples amérindiens (ce qui aurait mené à la dénomination des îles du sud du continent américain *Terre de feu* par Magellan). Les signaux sonores, eux, sont notamment d'usage militaire ou religieux. En France, les tambours de guerre sont utilisés pour la première fois sous François I^{er}, à la bataille de Marignan. Enfin, on peut noter que le résultat du Conclave, au Vatican, est annoncé par une double signalisation : la fameuse fumée blanche est accompagnée du son des cloches de la basilique Saint-Pierre depuis 2005 afin d'éviter la confusion chez les spectateurs.

Il faudra attendre le XVIII^e siècle et le sémaphore ou télégraphe optique pour voir apparaître un système sophistiqué de communication à distance en Europe. Inventé en France par les Frères Chappe (notamment Claude Chappe) et mis en service en 1794, le télégraphe était constitué d'une tour surmontée par le mécanisme à bras, un long et deux courts à chaque extrémité du bras long (fig. 1), qui permettaient la transmission de 196 symboles. Les sémaphores étaient espacés d'une dizaine de kilomètres sur des axes stratégiques (fig. 1). Les communications à travers la France via le télégraphe de Chappe ne prenaient qu'un temps de l'ordre de la dizaine de minutes, quand il fallait un temps de transport terrestre (par cheval) ou aérien (par pigeon voyageur) de l'ordre de la journée. Cependant, le télégraphe optique ne pouvait pas être utilisé la nuit ni par mauvaise visibilité, et son fonctionnement nécessitait deux opérateurs tous les dix kilomètres environ. Au plus fort de son utilisation en 1844, on compte 543 tours sur le territoire français, mais elle entre en déclin dès l'année suivante avec l'arrivée du télégraphe électrique. Une vingtaine de tours d'époque sont encore visibles en France, et visitables pour certaines, et de nombreuses reproductions de sémaphores ont été construites depuis, comme celle visible à Chambray-les-Tours (fig. 1).

1. Polybe, Histoire X, 45-47.



Fig. 1 (de gauche à droite) : sémaphore du Louvre; carte des axes suivis par les télégraphes; reproduction d'un sémaphore à Chambray-les-Tours, près de l'emplacement originel.

Le début du XIX^e siècle annonce l'avènement de l'électricité, à partir des travaux de Volta et sa pile dès 1799. Tout en étant encore une science expérimentale, les télécommunications voient rapidement des avancées majeures sur les plans théoriques et pratiques. En 1832, Samuel Morse propose un télégraphe électrique et un code, qui reste aujourd'hui utilisé; en 1860, James Clerk Maxwell décrit l'électromagnétisme à travers trois lois connues sous le nom de « lois de Maxwell »; en 1876, le brevet du téléphone est déposé par Graham Bell. Il est à noter que la paternité de l'invention du téléphone a été depuis peu remise en question. Elle semblerait en effet revenir à Antonio Meucci, ingénieur italien, qui a créé des prototypes de téléphones dès 1855, et aurait été spolié par Bell, lorsque Meucci entreposait ses prototypes à la Western Union dans les années 1870 en attendant une expertise qui ne vint jamais. La paternité de Meucci a été reconnue par la Chambre des Représentants du Congrès américain le 11 juin 2002.

En 1897, Heinrich Rudlof Hertz met en évidence l'existence des ondes radioélectriques (communément appelées ondes Hertiennes). À ce sujet, il aurait dit « C'est juste une expérience qui permet de prouver que le maître Maxwell avait raison » [1], n'entrevoquant pas la multitude d'applications qu'auront les télécommunications sans fil. À partir des travaux de Hertz, les avancées dans le domaine des télécommunications sans fil vont s'accélérer. Ainsi, 1901 connaît la première transmission sans fil transatlantique. Suivront

les deux guerres mondiales et leurs lots de percées techniques, telles que la première radio militaire d'Auguste Ferrié en 1917 ou le radar (à l'origine acronyme anglais de *radio detection and ranging*), dont l'utilisation à grande échelle sur le sol britannique en 1941 a joué un rôle important dans l'issue de la bataille d'Angleterre.

C'est après-guerre que les télécommunications passeront des sciences expérimentales aux sciences appliquées avec l'élaboration de la théorie de l'information en 1948 par Claude Shannon, notamment à partir de son article «A Mathematical Model of Information» [2], où sont introduits les schémas élémentaires de communication entre émetteurs et récepteurs, la notion d'entropie d'un signal, dont il montre qu'elle est équivalente à l'entropie thermodynamique de Boltzmann, ou encore la limite de performance théorique atteignable par un signal aléatoire (en erreur binaire par exemple). Il est aussi à l'origine du théorème fondamental d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, qui pose que la fréquence d'échantillonnage d'un signal analogique (continu) doit être supérieure au double de la fréquence maximale de ce même signal. En 1947, William Shockley et d'autres ingénieurs des laboratoires Bell avaient inventé le transistor, dispositif électronique qui permet de contrôler un courant, et en particulier de l'amplifier. C'est ce composant qui permettra par la suite la miniaturisation de tous les appareils électroniques. Au même moment, l'informatique est naissante, notamment à la suite des travaux d'Allan Mathison Turing pendant la seconde guerre mondiale. Ainsi, dès 1949, IBM crée l'ordinateur à mémoire et la puissance de calcul des machines ne cessera de croître, permettant l'analyse d'une quantité toujours plus grande d'information. C'est de la convergence de ces trois domaines que naîtront les télécommunications modernes, en alliant théorisation des concepts, miniaturisation et grande capacité de traitement des dispositifs radioélectriques. D'après Shannon, un message (texte, voix, images, etc.) pourra être transmis selon un grand nombre de formats différents (suivant par exemple les évolutions technologiques des télécommunications) sans que sa nature ne change.

Les découvertes et inventions qui découlent de ce changement de paradigme scientifique et technique ne cesseront de s'accélérer, pour ensuite provoquer un changement sociétal avec la démocratisation, dans les foyers, d'appareils tels que le téléphone fixe, la télévision, puis plus tard l'ordinateur personnel. À partir des années 1980 s'opère un nouveau tournant avec l'accès

à des données et à des services toujours en plus grand nombre, via le minitel en France puis par l'avènement d'internet. Dans cette décennie apparaît aussi la téléphonie mobile de première génération (1G), technologie analogique de faible capacité et peu sécurisée. Très vite, la deuxième génération (2G) supplante la première en offrant une communication numérique vocale et écrite (via les SMS, ou *short message service* en anglais) fiable dès 1990. Tous les dix ans, une nouvelle génération de téléphonie mobile dépasse la précédente, avec, à partir de la 3G, un accès à internet sur téléphones mobiles de plus en plus performants, notamment en termes de débit avec la 4G en 2010, avant la 5G en 2020. Aujourd'hui, une grande majorité des êtres humains peut instantanément communiquer et interagir avec les autres grâce à leur téléphone ou à leur ordinateur, connectés à internet, ou au moins grâce au réseau téléphonique mobile. Il convient donc d'expliquer, de manière simple et didactique, comment ces appareils fonctionnent pour rendre possibles ces interactions.

Nous avons mentionné précédemment les ondes électromagnétiques, les signaux analogiques et numériques. Ce sont des concepts fondamentaux à la description des télécommunications modernes qui doivent être précisément définis, avant d'être replacé dans le cas concret de l'envoi, l'acheminement et la réception d'un SMS. Grâce à cet exemple, on pourra entrevoir l'ensemble des applications inhérentes aux télécommunications modernes.

QUELQUES DÉFINITIONS

Ondes hertziennes

On appelle « ondes hertziennes » les ondes électromagnétiques créées par l'humain. La terminologie est source de confusion, en ce sens qu'on confond parfois ondes hertziennes et signal analogique, en opposition au signal numérique. Or, ce sont trois concepts distincts. Le concept d'onde est intuitif car il peut désigner des représentations concrètes (une onde sur l'eau par exemple), alors que celui d'électromagnétisme est flou, car lié à des événements invisibles et intangibles. Les champs électriques (électrostatiques) et magnétiques sont pourtant des phénomènes physiques auxquels nous sommes confrontés quotidiennement. Ainsi, le magnétisme terrestre fait bouger l'aiguille de la boussole dans la direction du nord, suivant un ensemble de

lignes dirigées du sud vers le nord et qu'on appelle champ magnétique. De la même manière, tout le monde a déjà fait l'expérience de ses cheveux se dressant (littéralement) sur la tête après qu'on les a frottés à un vêtement ou à un ballon de baudruche. Cette force qui attire les cheveux vers le ballon est appelée champ électrostatique et est due à une différence de charge électrique entre les deux éléments en jeu, car en frottant un ballon de baudruche sur les cheveux, on vient arracher des électrons à ceux-ci. Le ballon se retrouve donc bénéficiaire en électrons et est chargé négativement, tandis que les cheveux sont déficitaires et chargés positivement, d'où la différence de charge.

Si le champ ainsi créé est statique, on est aussi capable de créer des champs électriques et magnétiques (dit électromagnétiques) artificiellement, dont l'intensité varie au cours du temps. Pour ce faire, plus de ballon ni de cheveux, mais un générateur de tension alternatif et une antenne composée de brins métalliques (fig. 2). Le générateur de tension engendre une différence de charge entre les deux brins de l'antenne, créant donc un champ (une force) électrique dirigé du brin déficitaire en électrons vers le brin bénéficiaire en électrons. La tension étant alternative, cette différence de charge varie dans le temps, ainsi que l'intensité et la direction du champ électrique E engendré. C'est ce champ électrique variant dans le temps qu'on appelle onde électrique. La direction de propagation de cette onde est perpendiculaire à la droite formée par les brins de l'antenne.

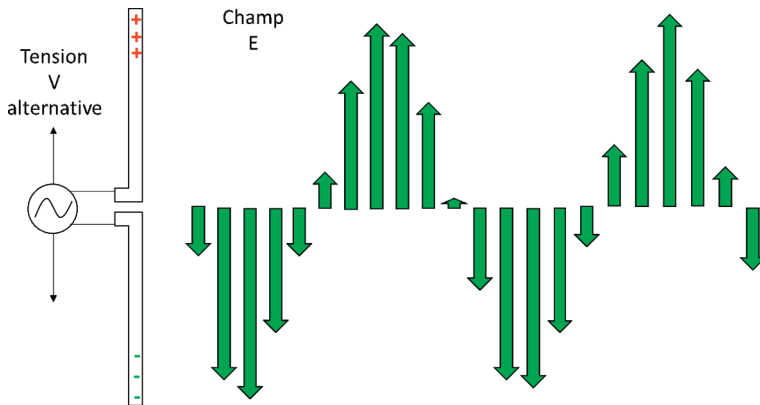


Fig. 2 : Tension alternative générant un champ électrique variant dans le temps, appelée onde électrique.

En plus de générer une onde électrique, un courant électrique alternatif dans une antenne crée aussi une onde magnétique (c'est-à-dire un champ ou force magnétique variant dans le temps), dont le sens de propagation est le même que celui du champ E, mais dont le champ est dirigé perpendiculairement à celui-ci (fig. 3). C'est la composition de ces deux champs qu'on appelle onde électromagnétique, dans un cas général, et onde hertzienne quand elle est générée par l'humain. Celle-ci se caractérise par sa longueur d'onde (la même pour les deux composantes), qu'on définit comme le rapport de la vitesse de la lumière et de la fréquence de l'onde. À l'instar des ondes sonores, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte, et inversement.

Si une tension alternative crée une onde hertzienne, cette dernière, réciproquement, est capable d'induire une tension alternative dans une antenne. En effet, de la même manière qu'un champ électrostatique peut faire se dresser des cheveux sur une tête, un champ électromagnétique variant dans le temps peut faire se déplacer des électrons dans deux brins d'antenne et générer un courant et une tension électrique. On déduit alors qu'on est capable de transmettre de l'information d'une antenne dite « antenne d'émission » à une autre antenne dite « antenne de réception », en modulant l'onde électromagnétique. C'est cette onde modulée qu'on appelle signal, et dont le caractère analogique ou numérique dépend du type de modulation choisie.

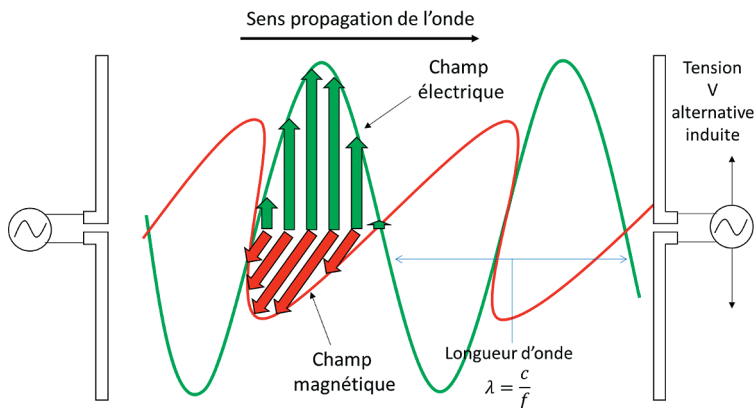


Fig. 3 : Sens de propagation, direction, et longueur d'onde d'une onde électromagnétique induisant une tension dans une antenne de réception.

Signal analogique

La modulation d'un signal analogique reflète souvent le caractère continu de l'information à transmettre, et on parvient à transformer les paramètres physiques de l'onde électromagnétique (amplitude, fréquence) directement à partir de ceux de l'information à transmettre. Par exemple en radio, l'amplitude du son d'une voix ou de la musique peut directement être calquée sur celle de l'onde transmise : c'est ce qu'on appelle modulation d'amplitude, ou radio AM (*amplitude modulation* en anglais). Pour la FM (*frequency modulation*), c'est la fréquence de l'onde porteuse qui varie en fonction du signal sonore. En télévision analogique, c'est l'intensité de luminosité (luminance) et de couleur (chrominance) qui modulait l'amplitude et la fréquence de l'onde électromagnétique. On peut alors, en réception, récupérer le signal sonore et/ou visuel par filtrage de l'onde électromagnétique via sa variation d'amplitude ou de fréquence.

Ces systèmes ont l'avantage d'être simples (en terme technologique) et peu coûteux à mettre en œuvre, pour les plus basiques. Un récepteur de radio AM peut ainsi être construit dès un niveau d'étude secondaire. Cependant, ils sont limités par leur sensibilité aux interférences, qui se traduit par l'apparition de bruits en radio, ou de neige sur les écrans de télévision cathodiques. Cette sensibilité est aussi une raison de la limitation du débit de ce type de modulation. Enfin, les signaux analogiques sont par nature conçus pour transporter de l'information continue, donc peu ou pas adaptés à la transmission de signaux discontinus (discrets) comme du texte ou des d'autres types de données.

Signal numérique

Les signaux numériques reflètent les caractères discrets et quantifiés de l'information à transmettre. En effet, tout message, qu'il s'agisse de texte, d'images, de son ou de données plus abstraites, peut se définir comme une chaîne plus ou moins longue de quanta d'information qu'on appelle bits. Les bits se représentent généralement par zéro (0) et un (1), et se manipulent selon une logique (un algèbre) spécifique, qu'on appelle algèbre de Boole, en référence au mathématicien anglais Georges Boole qui l'a introduite. On trouvera

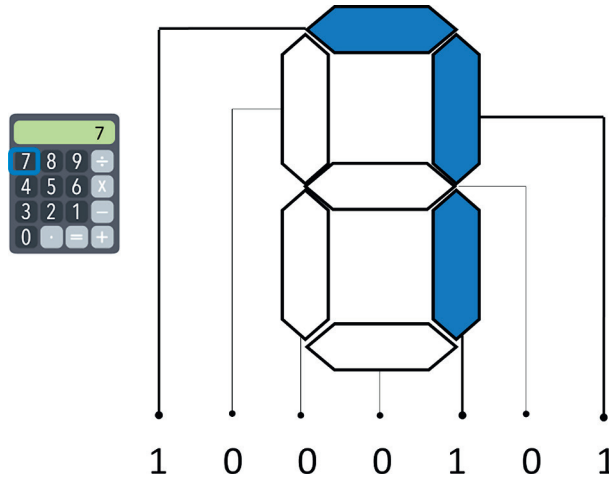


Fig. 4 : Représentation binaire du chiffre 7 sur un écran à cristaux liquide.

ci-dessous (fig. 4) un exemple de représentation binaire du chiffre 7 comme pourrait l’afficher un écran de calculatrice à cristaux liquides. Ici, on a arbitrairement choisi de représenter les cristaux «éteints» par zéro et les cristaux «allumés» par un.

À ce stade, nous n’avons qu’une représentation logique du message à transmettre ; il va falloir lui donner une réalité physique, ce qui revient à transformer la chaîne binaire en signal électrique, qui pourra alors moduler une onde électromagnétique. Il existe potentiellement une infinité de manières de transformer un message binaire en signal électrique. On ne peut donc pas en dresser une liste exhaustive, mais on peut retenir, d’une part, que ces transformations sont généralement spécifiques aux technologies, elles-mêmes adaptées au cas d’utilisation visé : on n’utilise pas le même signal pour transmettre un signal en WiFi (*Wireless Fidelity* en anglais) qu’en bluetooth. D’autre part, il faut noter que, dans l’absolu, une technique de transformation des bits en signal sera valide dès lors qu’elle est bijective, c’est-à-dire que pour un signal obtenu, il n’existe en retour qu’un unique message binaire correspondant. En reprenant l’exemple ci-dessus, définissons la règle de transformation suivante : à un bit 0 correspond une pulsation électrique «qui commence par décroître», et à un bit 1 correspond la pulsation opposée. Ainsi,

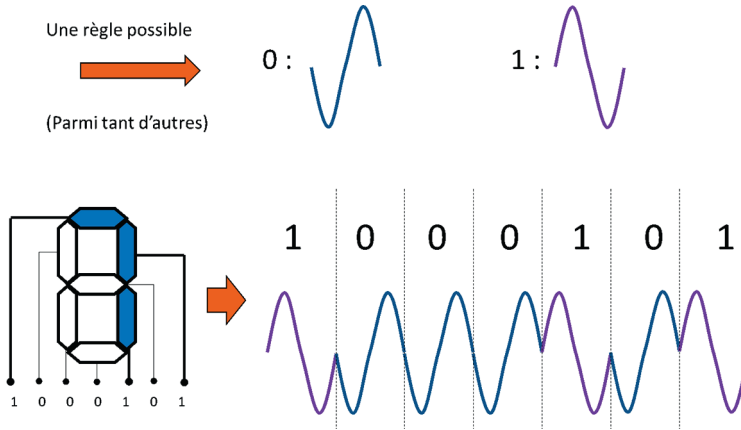


Fig. 5 : Une règle possible de transformation d'un message binaire en signal ; à un bit 0 correspond une pulsation donnée, à un bit 1 correspond la pulsation opposée.

le message binaire correspondant au chiffre 7 peut se représenter sous forme de courant électrique par une succession de pulsations (fig. 5).

Dès lors qu'on a un signal électrique, on peut moduler une onde électromagnétique, que ce soit en amplitude, en fréquence ou les deux. Ainsi, de la même manière que le signal électrique obtenu à partir d'un microphone d'une station radio peut moduler une onde en AM ou FM, un signal numérique provenant de la transformation d'un message binaire en courant électrique peut moduler une onde électromagnétique. L'onde hertzienne envoyée par une antenne peut donc tout aussi bien transporter un signal analogique qu'un signal numérique. C'est de cette manière que nous sommes passés de la télévision analogique à la télévision numérique terrestre en France en 2011 : l'information intrinsèque n'a pas ou peu changé (on envoie toujours de la vidéo et du son), ni le transport par onde hertzienne, c'est seulement la nature du signal transporté qui diffère.

Les avantages d'un signal numérique, notamment face à un signal analogique, sont sa grande résistance aux interférences et la multitude de modulations possibles permettant d'adapter le signal à transmettre aux contraintes de l'environnement de propagation de l'onde hertzienne, le tout pour un faible coût. De plus, tout signal numérique permet de transmettre n'importe quel type d'information, qu'elle soit discrète ou continue (voir plus

loin le principe de quantification), et les informations, puisque binaires, peuvent être traitées à l'aide d'outils informatiques. La résistance des signaux numériques face aux perturbations est inhérente à leur nature : là où un récepteur de signal analogique démodulera le signal reçu sans distinguer le signal utile d'une interférence additionnelle, le récepteur de signal numérique s'attend *in fine* à recevoir un signal traduisible en message binaire. Dans notre exemple, peu importe la perturbation, si le morceau de signal reçu « ressemble » plus à l'une ou l'autre des pulsations, alors le récepteur décidera 0 ou 1. Si les perturbations sont faibles, le message binaire sera alors exempt de toute erreur et l'information parfaitement récupérée, là où ces mêmes perturbations seraient « visibles » dans l'information récupérée d'un signal analogique. De plus, comme nous allons le décrire plus loin, il existe des méthodes de renforcement des signaux numériques pour supprimer ou détecter des erreurs éventuelles. C'est notamment ce qui fait que les technologies numériques, comparativement aux technologies analogiques, sont plus complexes à mettre en œuvre.

ENVOI, CHEMINEMENT ET RÉCEPTION D'UN TEXTE

Intéressons-nous à la manière dont sont envoyés, acheminés sur de longues distances et reçus les messages utilisant des signaux numériques. Pour cela, on prendra le cas d'un SMS, mais les principes présentés resteront suffisamment généraux pour être transposés à tout type d'information. Auparavant, introduisons la notion de quantification de l'information, qui permet d'obtenir un message binaire à partir de n'importe quelle source d'information (texte, image, son, etc.). Pour du texte ou des types de données similaires, la conversion est simple, puisqu'un alphabet est déjà une quantification de l'information. À chaque lettre sera attribuée une « lettre » binaire unique (c'est-à-dire une chaîne binaire) composée de plusieurs bits. A titre d'exemple, il suffit de 5 bits pour représenter les 26 lettres de l'alphabet latin : 1 bit peut prendre deux valeurs (0 et 1), donc une chaîne de 5 bits peut prendre $2^5 = 32$ valeurs différentes. Pour aller plus loin, si on considère les lettres minuscules et majuscules, on double le nombre de lettres (en tant que symboles), il faudrait donc 6 bits pour toutes les représenter de manière unique. Plus généralement, si on souhaite représenter N symboles (comprenant des lettres accentuées,

différents types d'alphabets), il faudra considérer des chaînes binaires de n bits tel que 2^n soit supérieur à N .

Pour convertir du son ou de l'image en message binaire, il faut passer d'une information continue à une information discrète. Pour cela, on doit échantillonner le signal électrique continu en respectant le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon, comme évoqué dans la Section 2. Un échantillonnage suffisamment fin garantit que la totalité de l'information comprise dans le signal continu se retrouve dans un ensemble discret d'échantillons, ce qui permet en retour de reconstituer parfaitement un signal continu à partir de cet ensemble par interpolation. De plus, la valeur de chaque échantillon doit être quantifiée sur un nombre fini d'états, afin d'attribuer à chaque état une chaîne binaire unique. Le message binaire à transmettre est la concaténation de toutes ces chaînes binaires (fig. 6). On passe ainsi d'un signal physique à sa représentation binaire, qui peut alors suivre les étapes de transformation en signal numérique précédemment décrites.

Considérons maintenant le cas pratique de l'émission et de la réception d'un SMS. Comme évoqué plus haut, un message peut toujours être représenté sous forme binaire. Cependant, avant d'être modulé en signal numérique, il va subir plusieurs transformations. En premier lieu, on adjoint au message d'origine un « mot » binaire connu à la fois de l'émetteur et du récepteur. Par une opération binaire dont les détails sont donnés dans l'article sur le contrôle de redondance cyclique, ou CRC (*cyclic redundancy check* [3]), le récepteur vérifie l'intégrité du message d'origine. Ensuite, le message et son adjonction sont encodés par un code correcteur d'erreur, dont le but est de supprimer les

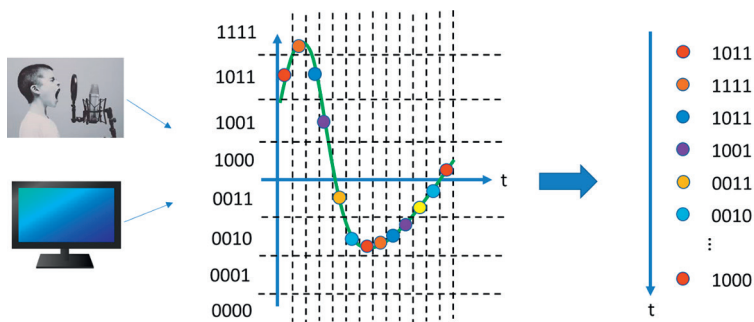


Fig. 6 : Échantillonnage et quantification d'un signal continu.

éventuelles erreurs (on appelle erreur un bit 1 reçu comme étant 0 et inversement) dont les origines diverses sont décrites plus loin. Il existe un grand nombre de codes correcteurs d'erreurs, mais leur principe commun est d'ajouter de la redondance au message d'origine : le message encodé est toujours plus long que l'original. C'est ce système d'encodage qui permet l'écoute d'un CD (*compact disk*), même en présence de rayures sur la surface de lecture. En plus du code correcteur, un entrelacement des bits à transmettre est généralement effectué, afin d'éclater les blocs d'erreur, et d'améliorer les performances du codage.

Ainsi renforcé, le message peut alors être envoyé à l'antenne relai la plus proche, aussi appelée station de base, et qui est reliée au réseau des autres antennes. Pour la téléphonie, on les observe souvent sur les toits des villes, sur les châteaux d'eau ou sur des pylônes proches des routes. Une fois reçu et démodulé par la station de base, le message n'est pas encore prêt à être acheminé au destinataire. Il va être encapsulé avec plusieurs autres données nécessaires à son transport dans le réseau : une clé de sécurité unique, le nom de l'émetteur, « l'adresse » du destinataire, un signal dit « pilote » permettant la correction physique des erreurs en réception, etc. L'adresse du destinataire, c'est-à-dire sa situation géographique, est déduite de son numéro transmis lors de l'envoi via un annuaire commun à toutes les stations de base du réseau. Cependant, contrairement à l'annuaire téléphonique des lignes fixes, celui-ci est mis à jour constamment, afin de suivre en temps réel les déplacements des téléphones sur le territoire. Ainsi, l'adresse de chaque téléphone correspond à la station de base à laquelle il est rattaché à un moment donné. Une adresse de destinataire, bien que binaire, est similaire à une adresse postale : une partie des bits indiquera le pays, une autre la région, et ainsi de suite jusqu'à l'indicatif de la station de base la plus proche du destinataire.

Une fois la station de base de rattachement du destinataire atteinte, celle-ci désencapsule le message et le module à nouveau pour le transmettre via son antenne d'émission. À ce stade, tous les utilisateurs de la cellule autour de l'antenne relai peuvent capter le message, mais seul le destinataire possédant la clé peut le décoder (on parle ici de décodage en termes de sécurité, non de décodage du code correcteur). Cependant, le signal a subi des perturbations de plusieurs natures, notamment dans le médium entre la station de base et le téléphone destinataire. Ainsi, ce médium, qu'on appelle canal de propagation, est à l'origine d'échos générant des fluctuations dans le signal

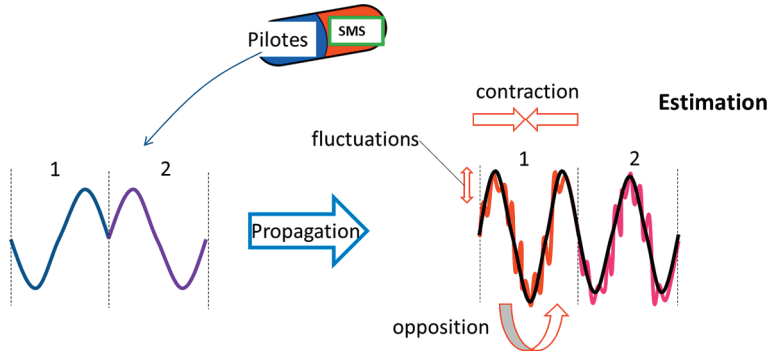


Fig. 7 : Estimation des perturbations dues au canal de propagation à l'aide de pilotes.

reçu, d'opposition de phase due aux réflexions (sur les bâtiments par exemple), ou encore de contraction ou de dilatation du signal dues à l'effet Doppler. C'est ce même effet qui change la sonorité d'une sirène en contractant ou dilatant l'onde sonore quand un camion de pompier s'approche ou s'éloigne. À ces perturbations s'additionnent les interférences évoquées précédemment. Les codes correcteurs seuls ne permettent pas de lutter contre toutes les perturbations. Il est nécessaire de les estimer et de les atténuer dans l'étape de démodulation, à l'aide de pilotes. Ce sont des séquences connues à la fois de l'émetteur et du récepteur, et qui sont accolées au signal contenant le message utile (le SMS). En comparant les pilotes reçus et ceux hypothétiquement reçus sans perturbation, le récepteur peut estimer les perturbations (fig. 7), où on rappelle les trois perturbations mentionnées.

Il est raisonnable de supposer, par principe de proximité, que les perturbations affectant les pilotes sont les mêmes que celles affectant le signal utile. À partir de leurs estimations, le récepteur peut directement inverser les perturbations sur l'ensemble du signal reçu afin d'atténuer, voire supprimer leurs effets indésirables. Cette étape est appelée égalisation et précède l'étape de transposition du signal électrique en message binaire. S'ensuit l'exact inverse des étapes effectuées en émission : l'éventuel désentrelacement, le décodage du code correcteur, et la vérification de l'intégrité du message reçu. Si le message ne contient pas d'erreur, alors le téléphone envoie généralement un *acknowledgement* à la station de base, afin d'indiquer que le message est bien

reçu. Dans le cas contraire, le récepteur indique à la station de base que le message a été reçu avec des erreurs, et celle-ci le renverra jusqu'à bonne réception. Il est à noter que ce processus existe notamment en téléphonie mobile, où les dispositifs peuvent communiquer à la fois en liaisons descendantes et montantes, c'est-à-dire de la station de base vers le téléphone et inversement. D'autres technologies ne peuvent pas appliquer ce système, comme la télévision numérique terrestre, où le même signal est diffusé à tous les utilisateurs : il ne peut pas y avoir, individuellement, d'indication de bonne ou mauvaise réception et donc de répétition. C'est pour cette raison que, dans de mauvaises conditions les étapes d'égalisation et de décodage ne suffisent pas à éliminer les erreurs, et que l'image et le son peuvent être très dégradés.

AVANTAGES, INCONVÉNIENTS DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Il n'existe pas de domaine où les télécommunications n'aient pas trouvé une application, au point de révolutionner nos habitudes, comme pour la géolocalisation pour laquelle le GPS ou Gallileo ont remplacé la carte papier. Si les nouvelles technologies numériques au sens large ont permis de faciliter le travail ou le quotidien de milliards d'utilisateurs, ce n'est pas sans faire naître questionnements et doutes sur les impacts liés à leur utilisation. Sur certains aspects, la situation est ambivalente, comme pour l'impact écologique des technologies de l'information et de la communication (TIC). Il est incontestable que les télécommunications sont largement utilisées pour réduire l'impact écologique de l'humain : effectuer une vidéo-conférence est moins polluant qu'un long déplacement, notamment s'il inclut un voyage en avion ; des réseaux de capteurs permettent de détecter et prévenir des fuites d'eau ou de produits chimiques.

À l'opposé, on a pu estimer depuis une dizaine d'année que l'ensemble des TICs est responsable d'au moins 2 % des émissions de CO₂ mondiales, soit au moins autant que l'aviation civile [5, 6]. Sont responsables la production et l'alimentation des appareils électroniques, mais aussi les serveurs de stockage de données, qu'il est nécessaire de refroidir. De plus, comme l'a rappelé par Mathieu Vidard dans son édito [7], les TICs sont de gros consommateurs de métaux et de terres rares, très peu recyclés à l'échelle mondiale, et donc localement responsables de guerres et de pollutions. Cependant,

aucune étude n'a pu faire le bilan de l'impact global des télécommunications sur l'environnement, qui tienne à la fois les gains et les effets négatifs qui y sont liés.

En plus du problème avéré de la pollution, l'omniprésence d'appareils rayonnant des ondes électromagnétiques peut parfois inquiéter les usagers quant à leur influence sur la santé physique. Sur ce point, la conclusion raisonnable est de ne pas avoir d'inquiétude, les quantités d'ondes reçues étant très faibles. En premier lieu, rappelons que les ondes électromagnétiques utilisées en télécommunications vont des fréquences correspondant à la radio AM jusqu'à la lumière visible [8]. Celles-ci ne sont pas ionisantes, c'est-à-dire elles n'agissent pas directement sur la matière, et donc pas sur les cellules de notre corps. À l'inverse, chacun sait que les ondes aux fréquences plus élevées, comme les ultra-violets ou les rayonnements gamma, communément appelés radioactivité, sont notamment sources de cancers. Ensuite, on peut s'interroger sur l'effet « micro-onde » des ondes de téléphone ou du WiFi. C'est cet effet qui fait « vibrer » et se froter les molécules d'eau, réchauffant ainsi nos aliments. Il est vrai que les longueurs d'ondes en jeu peuvent être similaires, mais les puissances ne sont pas du même ordre de grandeur : un four émet à une puissance entre 100 et 1000 watts, et les ondes sont confinées dans un espace clos, tandis que les téléphones ou les box WiFi émettent à une puissance comprise entre 10 et 600 milliwatts, soit de l'ordre de 1000 à 100 000 fois plus faible. De plus, dans un espace ouvert, même en intérieur, la puissance des ondes décroît très rapidement en fonction de l'écartement la source. On est là en présence de radiations très faibles comparées à celles reçues pendant un bain de Soleil (sans même parler des rayonnements ionisants) ou devant un bon feu de bois.

Malgré tout, certaines personnes sont électrosensibles et développent des symptômes lorsqu'elles peuvent être en présence d'ondes électromagnétiques, comme des gênes ou des maux de tête. L'organisation mondiale de la santé reconnaît effectivement ces symptômes, mais aucune étude n'a pu faire le lien entre électrosensibilité et ondes électromagnétiques. De plus, des essais cliniques menés en double aveugle auraient montré que les patients électrosensibles étaient incapables de distinguer une exposition réelle aux ondes électromagnétiques d'une exposition simulée (voir [9] et articles liés), révélant des troubles potentiellement dus à un effet nocebo. L'OMS suggère d'ailleurs que les maux peuvent être liés à la crainte des ondes plutôt qu'aux

rayonnements électromagnétiques eux-mêmes. Le meilleur moyen de se prémunir de ces troubles pourrait donc être de s'informer sur le sujet.

Outre de potentiels effets physiologiques, les télécommunications peuvent avoir des effets psychologiques avérés, notamment chez les plus jeunes. Compte tenu de la facilité avec laquelle chacun peut se connecter à internet via un ordinateur ou son téléphone portable, l'hyperconnectivité peut porter atteinte à notre santé mentale. Cyrus North et Léo Grasset, vidéastes de vulgarisation de philosophie et de biologie, analysent respectivement l'addiction aux réseaux comme le moyen facile de combattre l'ennui, mais de manière stérile, et comme une boulimie mentale pour un cerveau avide mais inadapté à autant de stimuli [10, 11]. Si, pour les adultes, être attentif et raisonnable permet à la fois de prévenir une forme d'addiction et de se protéger au sens propre contre les différentes cyber-agressions, une vraie hygiène numérique semble devoir s'imposer chez l'enfant, notamment pour les plus jeunes. Le Dr Ducanda, médecin de protection maternelle et infantile, alerte : chez le jeune enfant, six à douze heures d'écrans par jour pourraient induire des troubles comparables à ceux du spectre autistique, à savoir des troubles de la communication, des relations sociales, et de la stéréotypie [12]. Cependant, l'analyse du Dr Ducanda est loin de faire l'unanimité et est critiquée sur la comparaison des troubles observés dans l'autisme. Le médecin indique néanmoins que, contrairement à l'autisme, un comportement normal de l'enfant est retrouvé après sevrage des écrans.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Eugenii Katz, «[Heinrich Rudolf Hertz](#)» [[archive](#)], sur Biographies of Famous Electrochemists and Physicists Contributed to Understanding of Electricity, Biosensors & Bioelectronics
- [2] A Mathematical Model of Information, Claude Shannon (The Bell Technical Journal), 1948
- [3] Cyclic Redundancy Check, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check
- [4] Code Correcteur, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Code_correcteur
- [5] Frédéric Bordage, Télécoms : 183 millions de tonnes de CO2, 2009, <https://www.greenit.fr/2009/07/29/telecoms-183-millions-de-tonnes-de-co2/>

- [6] Nouvelles technologies, nouveaux usages :les TIC, quels impacts ?, ADEME, Juillet 2011, http://www.bastamag.net/IMG/pdf/guide_ademe_tic_impacts.pdf
- [7] Matieu Vidard, Les TIC qui polluent la planète, édito du 11 octobre 2017, France Inter, <https://www.franceinter.fr/emissions/l-edito-carre/l-edito-carre-11-octobre-2017>
- [8] Spectre électromagnétique, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique
- [9] Sensibilité électromagnétique, Wikipédia, https://fr.wikipedia.org/wiki/Sensibilit%C3%A9_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique
- [10] Cyrus North, Ca m'ennuie de vous dire ça, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=EcT8IG59kSA>
- [11] Léo Grasset (Dirty Biology), Le problème des super-stimulus – DBY #49, <https://www.youtube.com/watch?v=H5LpKMAzFL4&vl=fr>
- [12] Dr Ducanda et Dr Terrasse, les écrans : un danger pour les enfants de 0 à 4 ans/ Screens: danger for the 0 to 4 year olds, https://www.youtube.com/watch?-time_continue=70&v=9-eIdSE57Jw

