

Ondes électromagnétiques

1 – Existence et génération d'ondes électromagnétiques

D'une manière générale, toute charge électrique accélérée donne naissance à une onde électromagnétique (OEM) en convertissant en énergie rayonnée une autre forme d'énergie. Ces OEM présentent une grande diversité, allant des ondes radio jusqu'aux rayons gamma hautement énergétiques, en passant par les micro-ondes, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets et les rayons X. En dépit de leur grande diversité, ces signaux partagent la même structure profonde régie par les équations de Maxwell. Deux champs y sont indissolublement liés : les champs électrique et magnétique sont les deux acteurs de ces OEM qui se propagent dans le vide sans avoir besoin de support matériel.

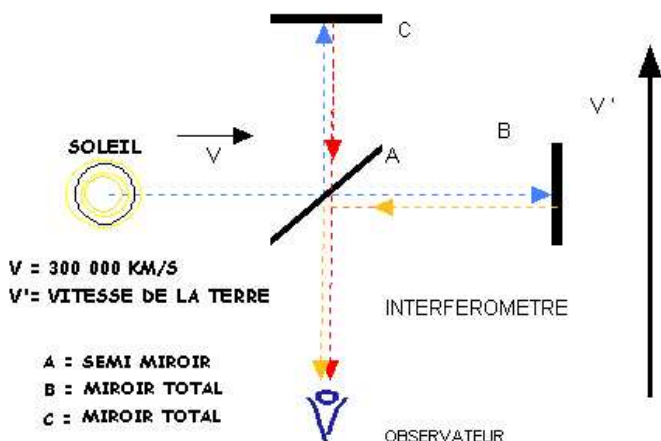
$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	équation de Maxwell-Gauss
$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	équation de Maxwell-Faraday
$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	équation de Maxwell-Thomson
$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	équation de Maxwell-Ampère

Les équations locales de Maxwell (1865)

Remarque

On a bien longtemps essayé de se convaincre que même le vide contenait un fond indétectable, **l'éther**, à l'aide duquel les OEM étaient capables de se propager, comme le son a besoin de matière pour se propager. C'est Michelson et Morley qui, à l'aide d'une expérience célèbre en physique, ont permis de trancher la question dans les années 1880 : l'éther n'existe pas, et les OEM se propagent bel et bien dans le vide à une vitesse constante et limite, aujourd'hui définie par $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$.

EXPERIENCE DE MICHELSON ET MORLEY



L'expérience de Albert Michelson et Edward Morley (1881-1887)

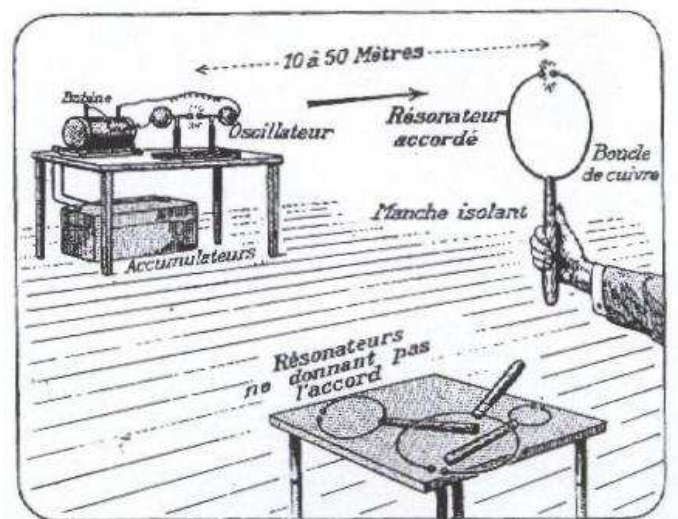
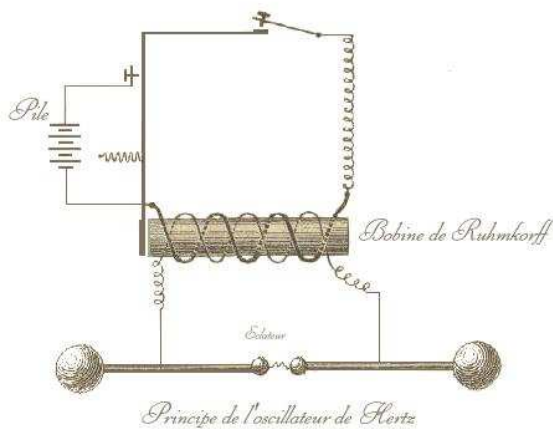
À leur époque on croyait que la lumière avait besoin d'un médium pour voyager. On proposa l'existence de l'éther. Le but de l'expérience de Michelson et Morley était de déterminer si la terre se déplaçait dans l'éther. On peut calculer la vitesse de rotation de la terre autour du soleil à partir du rayon de son orbite. Du temps pour faire un tour, soit un an, on calcul sa vitesse tangentielle de 30 km.s^{-1} et à cela on ajoute la vitesse de rotation de $.5 \text{ km.s}^{-1}$. Si l'éther existe, il est impensable qu'il soit lié à la Terre. A la limite, on peut admettre une immobilité accidentelle, à un instant donné, de la Terre par rapport à " l'éther " mais elle ne saurait se maintenir dans le temps.

Maintenant, si on regarde le diagramme, on voit les deux miroirs totaux B et C. La lumière du Soleil en bleu frappe le miroir semi-réfléchissant A pour être divisé en deux faisceaux. Le premier faisceau continue sa course jusqu'au miroir B et le deuxième au miroir C. Les bras AB et AC sont placés parallèlement ou à la perpendiculaire de la direction de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil. Michelson a alors obtenu un résultat auquel il ne s'attendait pas : à cause de la vitesse de la Terre, on aurait dû constater un changement de phase quand les rayons sont juxtaposés au retour où se trouve l'observateur ; mais quelle que soit la position des bras de l'interféromètre, Michelson et Morley constatent que la figure d'interférences n'est pas modifiée...

A leur époque, ils pouvaient détecter des vitesses de l'ordre de 15 km.s^{-1} . L'explication que l'éther se confond avec un référentiel lié à la Terre est inadmissible. Einstein proposera de faire varier le temps et l'espace pour expliquer les résultats et définitivement asseoir la vitesse de la lumière dans le vide comme une constante de la nature.

En fait, pour produire des OEM, il n'est pas nécessaire que la charge électrique se déplace dans le vide. Tout porteur de charge électrique accélérée émet un signal électromagnétique, même s'il se déplace dans un matériau conducteur. Tout circuit parcouru par un courant d'intensité variable dans le temps émet des OEM : les électrons sont secoués par une tension électrique imposée par le générateur.

Pour ces émetteurs, la puissance émise augmente très rapidement avec la fréquence : chaque fois que la fréquence d'oscillation des courants dans le circuit est multipliée par 10, la puissance rayonnée est multipliée par $10^4 = 10\,000$! La chasse aux ondes radio prévue par Maxwell passait donc par une montée en fréquence des courants alternatifs, et à ce jeu-là, c'est Heinrich Hertz (ci-contre) qui sera le plus fort : en 1888, il met en évidence ces ondes. Si une particule chargée accélérée dans une antenne d'émission émet une OEM, la réciproque est vraie : une telle onde met en mouvement des charges électriques dans les antennes de réception.



L'expérience de Hertz (1888).

Dans l'exemple de la règle chargée puis agitée, les signaux électromagnétiques émis emportent de l'énergie, que vos muscles doivent fournir. De même, pour maintenir les électrons du métal en oscillation, le générateur électrique doit fournir de l'énergie. Les équations de Maxwell donnent une bonne description des champs émis par des courants circulant dans des conducteurs.

Leur application directe aux échelles atomiques a constitué un gros problème de la physique du XIX^{ème} siècle. En effet, un électron, s'il gravitait sur son orbite, serait nécessairement

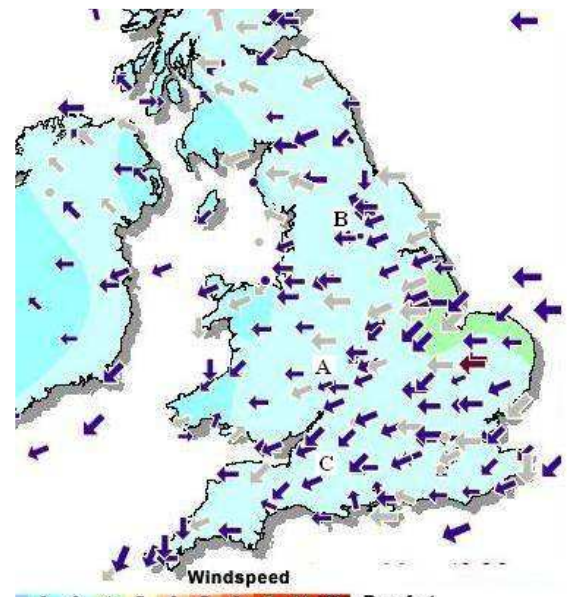
accélération (du fait d'une rotation, comme dans les manèges, il y a un effet *centrifuge*, signe de l'existence d'une accélération). L'atome devrait donc émettre en continu et l'électron se rapprocherait inexorablement du noyau pour payer la facture énergétique de l'émission. L'association électron-proton est donc instable d'après les lois de l'électromagnétisme.

L'approche quantique, qui a suivi, a éliminé les concepts de particule et de trajectoire électroniques pour surmonter cette difficulté. Aux fréquences optiques, c'est un peu plus compliqué. Pour expliquer l'émission d'énergie lumineuse par un atome ou une molécule, il faut utiliser une description quantique qui consiste à associer à l'électron une onde. Sous l'action d'un stimulus extérieur, les électrons des atomes ou des molécules peuvent changer d'état énergétique. Comme des livres sur une étagère, ils peuvent accéder à des niveaux d'énergie différents (il faut fournir un peu d'énergie pour placer un livre sur une étagère supérieure, et vous récupérez spontanément l'énergie du livre qui vous arrive sur le pied en provenance d'une étagère élevée...). Si les électrons perdent de l'énergie, il est possible d'observer une émission lumineuse...

2 – La structure des ondes électromagnétiques

Une onde à deux champs

La notion de **champ** est utilisée en physique pour traduire l'existence d'une grandeur définie en chaque point de l'espace et du temps. Une carte météo donnant les températures est une représentation d'un champ scalaire : à chaque lieu est associé un nombre. On peut aussi définir des champs plus compliqués, comme des champs vectoriels, une sorte de forêt de flèches, plus ou moins longues selon la valeur du champ, et dont l'orientation donne sa direction. La carte météo des vents ci-contre en est un exemple.



Non pas un, mais deux champs

Pour décrire l'action d'une particule électrique chargée immobile sur une autre charge électrique, on peut d'abord considérer une seule particule chargée. Sa présence va modifier son environnement en créant un champ électrique dans son voisinage.

Si une autre particule pointe le bout de son nez, elle va subir l'action du champ créé par la première charge. Le champ électrique devient une entité autonome que l'on peut étudier en connaissant la position des différentes charges qui le créent.

Le champ magnétique apparaît lorsque les charges électriques se déplacent. Les courants électriques circulant dans les circuits électriques sont des exemples de sources de champs magnétiques, dont l'intensité se mesure en teslas (T). La longueur de la flèche, qui représente le champ magnétique, est directement proportionnelle à l'intensité du courant électrique exprimée en ampères. Comme pour le champ électrique, l'intensité du champ magnétique décroît rapidement avec la distance entre la source du champ et le point où on mesure le champ.

Les champs électriques et magnétiques coexistent souvent, y compris dans le vide : ils n'ont pas besoin de milieu matériel comme support (contrairement aux ondes sonores). Des charges immobiles et des courants constants ne créent pas d'ondes électromagnétiques.

Pour émettre une onde radio, il faut que les sources des champs (charges et courants électriques) varient au cours du temps. Dès que les courants sont variables, il y a création simultanée des deux champs. Le champ électrique variable a besoin du champ magnétique et vice versa.

C'est un peu comme une chorégraphie liant deux groupes de danseurs se faisant face, chaque danseur doit rester sur place et exécuter des gestes, qui dépendent uniquement du groupe d'en face ; pour savoir ce qu'il doit faire, un danseur donné n'observe pas ses propres voisins, mais les danseurs qui lui font face. Le geste qu'il va effectuer ne dépend que de la position des voisins du danseur opposé à cet instant donné. La photographie d'un groupe permet de prévoir l'évolution des danseurs de l'autre groupe dans les instants qui vont suivre. Réciproquement, le film d'un quelconque des danseurs donne une idée des gestes de quelques danseurs les plus proches de l'autre groupe. On ne peut donc pas isoler la chorégraphie d'une rangée, car les deux sous-groupes sont liés dans le temps et dans l'espace.

De même, on ne peut pas séparer le champ électrique du champ magnétique dans l'onde électromagnétique.

C'est Maxwell qui a trouvé les règles du jeu suivies par les deux parties du champ électromagnétique. Une variation du champ magnétique dans l'espace entraîne une évolution dans le temps du champ électrique et réciproquement. C'est un mécanisme analogue aux chorégraphies couplées des deux rangées de danseurs qui est à l'origine de la propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide. Une variation spatiale du champ magnétique entraîne un changement du champ électrique dans le temps. Comme le champ électrique varie aussi dans l'espace, il en résulte une évolution temporelle du champ magnétique.

On peut se représenter une onde électromagnétique en dessinant en chaque point deux flèches, l'une représentant \vec{E} et l'autre \vec{B} . Dans le vide, loin des charges en mouvement qui ont créé l'onde, ces deux flèches sont perpendiculaires entre elles et perpendiculaires à la direction de propagation. Les amplitudes des deux champs (les longueurs des flèches) sont reliées, c'est pourquoi on se contente généralement de donner ou de mesurer celle du champ électrique.

Par exemple, sous une ligne à haute tension de 400 000 V, règne un champ électrique oscillant de 5 000 V/m. Un téléphone portable ne doit pas dépasser une amplitude de 40 V/m selon la norme OMS.

Les vibrations des champs

Les flèches qui représentent l'onde électromagnétique en un point atteint par le signal oscillent au même rythme que les courants dans l'émetteur : l'onde reproduit en quelque sorte le mouvement de la source avec un certain retard dû à la propagation. Pour caractériser un phénomène périodique, on définit la fréquence f en hertz (Hz) pour désigner le nombre de fois où il se reproduit par unité de temps. On utilise alors des multiples du hertz, comme le mégahertz (1 MHz = 10^6 Hz, un million de hertz) ou encore le gigahertz (1 GHz = 10^9 Hz, un milliard de hertz). La fréquence f est l'inverse de la période T donnée en secondes,

$$f = \frac{1}{T}$$

La période traduit la durée qui sépare deux instants pour lesquels l'onde est dans le même état.

Le logo signalant la présence des radars routiers fixes de la gendarmerie est une illustration directe de la propagation des ondes radio émises par l'émetteur du radar.

Tous les points situés à la même distance de l'émetteur sont atteints par l'onde en même temps. C'est pour cela que le logo des radars présente des arcs de cercle centrés sur l'émetteur. Les flèches du champ électromagnétique sont les mêmes en ces divers points ; pour retrouver le même état vibratoire, il faut s'éloigner ou se rapprocher davantage de la source d'une distance égale à celle parcourue par l'onde durant une oscillation des courants dans l'émetteur. Cette distance entre deux maximums successifs de l'onde est la **longueur d'onde**, notée λ (« lambda ») et mesurée en mètres.



La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde durant une période. La vitesse de propagation des OEM peut dépendre du milieu traversé ; la fréquence reste fixée par la source même si on passe d'un milieu à un autre (c'est une propriété intrinsèque de l'onde), mais la longueur d'onde, elle, change. En règle générale, quand on donne la longueur d'onde d'une OEM, on se réfère implicitement au vide. La relation entre longueur d'onde dans le vide et période (ou fréquence) s'écrit donc, dans le vide,

$$\lambda_0 = c \times T = \frac{c}{f}$$

La fréquence peut varier dans un rapport énorme : de un à un milliard de milliards... Les processus d'émission et de détection sont très différents selon le domaine de fréquence : les antennes de nos téléphones portables sont pour les ondes radio ce qu'est l'atome ou la molécule pour les ondes lumineuses ou le noyau atomique pour les rayons gamma. C'est également ainsi qu'on peut comprendre pourquoi les ondes les plus courtes sont aussi les plus pénétrantes : les rayonnements X ou gamma sont potentiellement bien plus dangereux que les rayonnements micro-onde ou radio.

Pour des fréquences assez faibles, le fonctionnement des émetteurs et des récepteurs peut être compris à partir de l'électromagnétisme classique. La quantification des échanges énergétiques entre l'OEM et la matière, c'est-à-dire le fait que l'énergie ne s'échange pas continûment mais par paquets, va se mettre en évidence pour des ondes plus énergétiques, à partir du domaine visible du spectre. Il en est de même pour la longueur d'onde. En théorie, il n'y a aucune limite – ni vers le bas, ni vers le haut. Nous vivons dans un bain d'OEM de longueurs allant de plusieurs milliers de kilomètres (voire davantage) à quelques millièmes de milliardièmes de mètre.

Le spectre électromagnétique est extrêmement large, mais ces ondes sont toutes de même nature. Quelle que soit la longueur d'onde, la structure est la même. En Physique, il est rare qu'un même modèle théorique décrive des phénomènes s'étalant sur des échelles de temps et de distance aussi différentes.

La délimitation de diverses zones dans le spectre n'a aucune raison physique, car les propriétés des ondes sont continues d'une zone à l'autre. Cependant, les ondes radio ne sont pas analysées avec le même matériel que les UV ou les rayons gamma.

On peut globalement délimiter quelques sous-branches techniques,

- Les **ondes radio** (et **micro-ondes**)

Les ondes de votre station radio correspondent à des longueurs d'onde supérieures au centimètre. C'est une zone de fréquence si importante dans les applications technologiques, qu'elle est elle-même subdivisée en sous-bandes : en particulier, le créneau de longueur d'onde aux environs de dix centimètres est très chargé avec des applications que vous connaissez bien : le téléphone portable, le Wi-Fi, le four à micro-ondes...

- Les **infrarouges**, de longueur d'onde comprise entre 0,8 et 500 microns

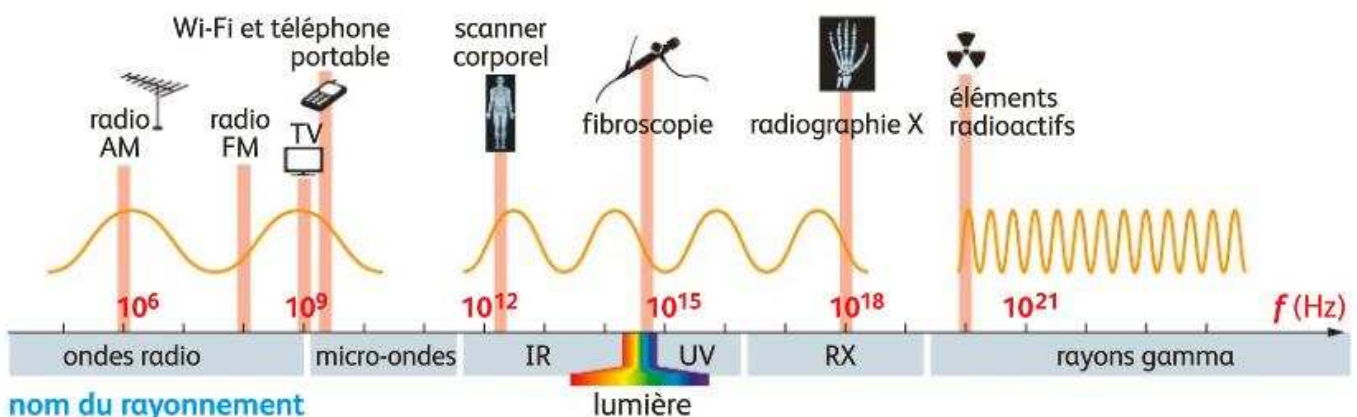
Comme tous les corps chauds, vous êtes un émetteur d'infrarouges sur une longueur d'onde voisine de dix microns. Ce rayonnement thermique peut être capté par des caméras spéciales, qui vous localisent même par la nuit la plus noire. Le signal de votre télécommande dans le proche infrarouge est détecté par les capteurs des appareils photos numériques : filmez votre télécommande en action dans une pièce noire, effet garanti !

- De 400 à 700 nanomètres, c'est le domaine du **visible**.

C'est dans cette zone de longueur d'onde que le Soleil émet un maximum de puissance. L'évolution naturelle a calé la sensibilité maximale de la rétine humaine sur le maximum du spectre solaire.

- De 10 à 400 nanomètres (le milliardième de mètre), on trouve les **ultraviolets** (UV). Ces ondes peuvent provoquer des coups de soleil ou casser des molécules avec une meilleure efficacité que la lumière visible, car elles sont plus énergétiques.

- Plus bas, pour une longueur d'onde entre dix et un centième de milliardième de mètre, ce sont les fameux **rayons X** utilisés pour ces radiographies. Nos os arrêtent ces ondes, mais pas le reste de notre corps. Encore plus bas, c'est le domaine des **rayons gamma** produits par des processus nucléaires et qui accompagnent la radioactivité.



La puissance des ondes

L'énergie de l'impulsion électromagnétique se déplace avec l'onde. La puissance d'émission représente l'énergie rayonnée par seconde et se répartit dans l'espace, sur une sphère de plus en plus grande, au cours de sa propagation. On devine que l'onde va devenir de moins en moins intense, donc potentiellement moins dangereuse, à mesure que l'on s'éloigne de la source. En allant deux fois plus loin, la puissance est divisée par quatre : c'est du moins une approximation permettant de fixer les idées, l'antenne n'émettant objectivement pas de la même manière dans toutes les directions.

Station radio	Satellite TV	Téléphone portable	Laser de poche	Wi-Fi
100 kW	100 W	1 W	1 mW	100 mW

Pour une lampe de 100W, à une distance d'un mètre, la puissance est de 8 W/m^2 ; pour les satellites de télécommunications, à 36 000 km d'altitude, l'intensité de l'onde radio à la réception est très faible.

Pour un petit laser de 10 mW, qui produit un faisceau d'un millimètre carré, l'intensité atteint $10\,000 \text{ W}$ au mètre-carré : si le pointeur est finalement peu puissant, la forte concentration de l'onde dans une direction donnée conduit à des puissances très importantes.

La répartition de l'onde sur une surface de plus en plus grande va de pair avec une diminution de son amplitude. Pour comparer l'intensité de deux ondes à fréquence donnée, on utilise l'amplitude E du champ électrique (en volts par mètre) ou la puissance par unité de surface P_{surface} , grandeurs liées par la relation

$$P_{\text{surface}} = \frac{E^2}{377}$$

Ainsi, le champ électrique maximal autorisé par la norme de protection électromagnétique à 2,4 GHz, vaut 40 V/m : la puissance par unité de surface est alors de 4 W/m^2 .

Là où il y a un champ, il y a de l'énergie. L'énergie électromagnétique n'est pas concentrée dans une petite zone de l'espace, mais répartie dans tout l'espace occupé par l'onde associée au signal électromagnétique, mais il y a davantage d'énergie aux endroits où le champ est intense. L'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ ; ainsi, si vous multipliez par deux l'amplitude de l'onde, vous avez quatre fois plus d'énergie au mètre-cube. Dans une OEM, l'énergie se répartit équitablement entre les deux formes électrique et magnétique.

Comme pour les ondes du domaine optique, il est possible de parler de photons radio, mais leur énergie est extrêmement faible devant l'énergie nécessaire pour provoquer un saut d'énergie des électrons dans l'atome. Typiquement, l'énergie du photon émis par votre téléphone portable est un million de fois plus petite que l'énergie requise pour arracher un électron d'un atome. On pourrait cependant penser qu'une attaque conjointe d'un régiment de photons radio pourrait avoir raison d'un atome, mais l'ensemble d'un million de milliards de milliards de photons de basse énergie n'a pas l'effet d'un photon unique ayant l'énergie équivalente à la somme de ces énergies...

Transmettre l'information par les fils

En électromagnétisme, tout est, en dernière analyse, une question d'onde. Votre lampe de chevet reçoit de l'énergie électrique de la part du secteur EDF, via la prise de courant. Le générateur crée une OEM, qui se propage au voisinage des fils de liaison. La rallonge électrique guide l'OEM au moyen des conducteurs métalliques jusqu'au récepteur, qui va l'absorber.

Dans l'histoire de l'électromagnétisme, le courant électrique a d'abord été fourni par les piles (la première, inventée par Volta, date de 1800). Comme la puissance était très limitée, les premières applications étaient des applications de courant faible consacrées essentiellement à transmettre de l'information. L'électroaimant sera pendant longtemps le récepteur adapté à ces lignes de transmission.

L'une des premières tentatives pour transmettre un message par l'intermédiaire d'un courant électrique a eu lieu à Göttingen en Allemagne, vers 1830. Wilhelm Weber et Johann Karl Friedrich Gauss ont construit une ligne de deux fils conducteurs longue de 3 kilomètres. Une batterie et un interrupteur étaient placés à une extrémité, le circuit se refermant sur un électroaimant à l'autre bout de la ligne. L'expérience a parfaitement réussi, mais les deux physiciens n'ont pas pressenti la révolution qui allait suivre.

Pour rendre le système de transmission à distance efficace, il fallait trouver un codage à l'information. C'est un peintre, créateur de la Société des beaux-arts à New York, Samuel Morse, qui a imaginé en 1837 le premier télégraphe électrique fiable. Un courant fourni par des piles passe par un petit appareil à main, nommé manipulateur, qui permet à l'opérateur d'interrompre le courant à volonté. Chaque impulsion de courant entraîne ensuite une action à distance via le fil sur l'électroaimant récepteur. Dans les récepteurs Morse, les électroaimants transforment des signaux électriques en des combinaisons de traits et de points. Le télégraphe est sans doute l'une des premières réussites pratiques et économiques liées à l'invention de la pile.

Il n'était pas nécessaire de poser deux fils pour établir la liaison. Un fil suffit si le retour se fait par la terre. C'est pour cela que Lucky Luke ne coupe qu'un fil dans l'album *Le Fil qui chante*. Les premiers messages télégraphiques servent dans un premier temps à avertir de l'arrivée d'un train ou d'un problème technique. Mais la circulation des informations à grande vitesse intéresse aussi les banquiers. Et Marx ne va pas s'y tromper : pour lui, le télégraphe électrique est un des fondements du capitalisme.

Une liaison sous-marine transocéanique

Le premier essai de câble sous-marin relie en 1850 la France à l'Angleterre et montre qu'un signal peut être détecté sur une distance de 40 kilomètres dans un câble sous-marin en dépit d'une atténuation importante. Il fallait compter une bonne semaine pour que le courrier soit acheminé outre-Atlantique. Un télégraphe sous-marin semblait une opération économiquement viable en réduisant cette durée à quelques minutes, du moins en théorie. Mais la distance à parcourir est importante, ce qui laisse augurer une très forte atténuation. Un physicien anglais William Thomson, anobli en Lord Kelvin plus tard, va établir la théorie des lignes de transmission en écrivant « l'équation du télégraphiste ». Les calculs théoriques ont montré qu'on devait pouvoir détecter un signal se propageant sur plus de 4 000 km à condition d'augmenter la pureté du cuivre et le diamètre du câble.