

Ferdinand Braun et la saga de la TSF

Il nous est donné ici l'occasion de parler d'un des aspects pédagogiques de l'exposition développé lors de sa première présentation au public à Strasbourg : il s'agit des ateliers. Dans une salle attenante à l'exposition une série d'ateliers constitués d'un ensemble d'expériences autour d'un thème donné était proposé aux scolaires : des primaires CM 1 et 2 aux classes de terminales. Parmi les thèmes proposés citons par exemple : le magnétisme, la cartographie, la pesanteur, la polarisation et la chiralité (cf pages 60-61), la télévision et les ondes électromagnétiques. Des documents pédagogiques détaillés, élaborés par des chercheurs et des enseignants du secondaire et correspondant à différents niveaux scolaires étaient disponibles sur le site WEB de l'AMUSS, à partir d'un mot de passe donné aux enseignants pour préparer leur visite. Outre les professeurs, des chercheurs et des animateurs qui avaient suivi un stage de formation, prenaient en charge les élèves pendant une heure et demie. Etant donné les prérequis, la procédure de visite différait selon les niveaux scolaires. Nous vous présentons ici un exemple d'une de ces visites sous la conduite d'un physicien qui accompagnait les élèves de la salle d'ateliers à celle de l'expo en leur narrant par exemple la saga de la TSF. Laissons le parler !



Photo Jean-Louis Hess

L'histoire commence en 1887 par les expériences que l'allemand Heinrich Hertz faisait à Karlsruhe sur l'*induction magnétique* à la suite de travaux des pionniers Lenz, Faraday, Henry (durant la décennie 1830-40). Hertz, successeur de Ferdinand Braun appelé à Strasbourg, étudiait plus particulièrement les courants électriques alternatifs de *haute fréquence* en relation avec la théorie de l'*électromagnétisme* de l'anglais James Maxwell (1873). Il utilisait une bobine de Ruhmkorff, un ancêtre du transformateur électrique, produisant de fortes tensions électriques et qu'on trouve encore de nos jours comme bobine d'allumage pour les moteurs à essence. Quand les bornes de cette bobine sont reliées à un éclateur, deux sphères métalliques face à face, des étincelles apparaissent entre ces sphères comme sur la machine vue ci-dessous et figure 1 - et comme sur les bougies des moteurs. Selon Maxwell ces étincelles devaient perturber la nature électrique et magnétique de l'espace environnant et Hertz essayait de détecter cette perturbation à distance. Pour cela il avait disposé, non loin de son éclateur, un cercle métallique fendu sans aucun contact électrique avec la bobine. Pourtant, quand l'éclateur fonctionnait, des étincelles apparaissaient aussi dans la petite fente du cercle métallique. L'expérience lui montra que ces étincelles secondaires se produisaient même à une distance *considérable* - quelques mètres - de l'éclateur. Distance *considérable* parce qu'à l'époque on ne



connaissait que l'effet, à une distance n'excédant pas quelques centimètres, de l'induction magnétique : le courant électrique produit dans une bobine de fil métallique par un aimant mobile, ou par une autre bobine parcourue par un courant alternatif. De fait l'étincelle produite dans l'éclateur porte un courant alternatif à haute fréquence et d'intensité décroissante qu'on appelle *onde amortie*. Cette impulsion de courant avait bien les propriétés, prédites par Maxwell, de propagation à longue distance. A l'époque on n'imaginait ce genre de perturbation à distance que de nature mécanique. Comme un caillou jeté dans l'eau provoque une série de vaguelettes, d'ondes concentriques se propageant à la surface de l'eau, l'étincelle était supposée *choquer* un milieu inconnu et produire des *ondes* se propageant dans ce milieu. On leur donna le nom d'*ondes hertziennes* et on chercha quel était le milieu dans lequel ces ondes se propageaient. Contrairement aux ondes sonores propagées par la matière solide, liquide, ou gazeuse on s'aperçut que les ondes hertziennes, ainsi que la lumière, se propageaient aussi bien à travers le vide... que l'on s'empressa de remplir mentalement d'une "atmosphère" de nature inconnue qu'on nomma *éther*. Plus tard on adopta le concept de *champ électrique, magnétique, et électromagnétique* présent dans le vide et se propageant sans support matériel. On découvrira d'ailleurs qu'ondes hertziennes et lumière sont de même nature ainsi que ces rayons inconnus que Roentgen découvrit et baptisa rayons X.

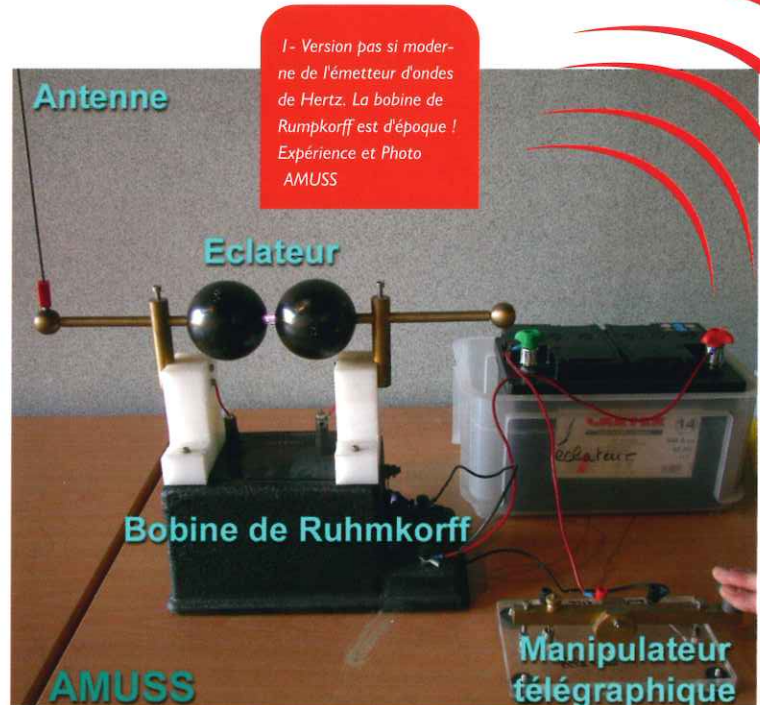
Au temps de Hertz le télégraphe électrique, inventé par Wheatstone et perfectionné par Morse connaissait déjà un fort développement. Le télégraphe (de télé : loin et graphe : écrire) permettait d'écrire à distance en utilisant le code "Morse" représentant toutes les lettres par des traits et des points. Ainsi SMS s'écrit " . . . - - . . . " en morse et s'entend "dididi dahdah didi-di" comme la sonnerie des téléphones mobiles à la réception

>>> d'un SMS, précisément ! Pratique cette communication à distance mais il fallait pour ça poser un fil électrique et les poteaux pour le soutenir sur des milliers de kilomètres. Les gens qui connaissaient l'expérience de Hertz se sont dit «Voilà un moyen de communiquer à distance sans avoir besoin de fil !» et ils ont cherché à utiliser les ondes hertziennes pour faire de la *télégraphie sans fil*. Mais l'étincelle du cercle métallique de Hertz ne permettait pas de commander la sonnette ou d'inscrire traits et points du télégraphe à fil. C'est Edouard Branly qui, à Paris, fit faire un pas décisif à la télégraphie sans fil en inventant en 1890 ce qu'on appela plus tard le *cohéreur à limaille*. Ce dispositif, qu'on peut voir sur l'image page suivante (figure 2), est une capsule contenant de la poudre de fer, fermée par deux électrodes métalliques et qui remplace la petite fente de la boucle de Hertz. La limaille en vrac qu'il contient n'est pas assez tassée pour faire contact électrique franc entre les deux électrodes.

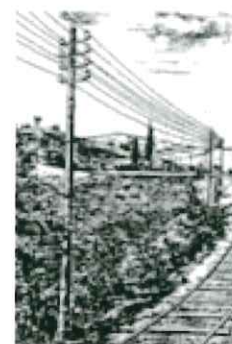
Mais, lorsqu'une étincelle est produite dans l'émetteur de Hertz, le champ électromagnétique reçu par le cohéreur modifie le contact entre les grains métalliques du cohéreur qui laisse alors passer le courant d'une pile dans une sonnette électrique et... ding. Le poste *récepteur* du télégraphe sans fil était né tel qu'on le voit sur le montage (figure 2). Pour émettre en télégraphie on appuyait donc un bref instant sur le contacteur de l'émetteur, on attendait, puis on appuyait de nouveau... en distinguant points et traits du code morse par un délai court ou long entre appuis successifs. La réception, comme pour le télégraphe à fil, se faisait soit au son soit par écrit en plaçant une plume mobile à la place du heurtoir de sonnette. Celle-ci se relevait à chaque impulsion et traçait, entre temps, traits et points sur une bande de papier déroulante. Sur la base de l'éclateur de Hertz et du cohéreur de Branly la *télégraphie sans fil* se développa rapidement. Les inventions et améliorations qui suivirent, augmentèrent sa portée de quelques mètres en 1887 avec Hertz à quelques dizaines (Branly 1890), puis quelques centaines de mètres (Lodge 1891) pour atteindre une portée transatlantique en 1901. En 1920 on inaugura la première liaison radiotélégraphique France-Amérique publique dont la station située à Bordeaux était équipée d'un émetteur de 1 Mégawatt à arc électrique (on ne parle plus d'étincelle !) avec une antenne déployée sur 48 hectares !

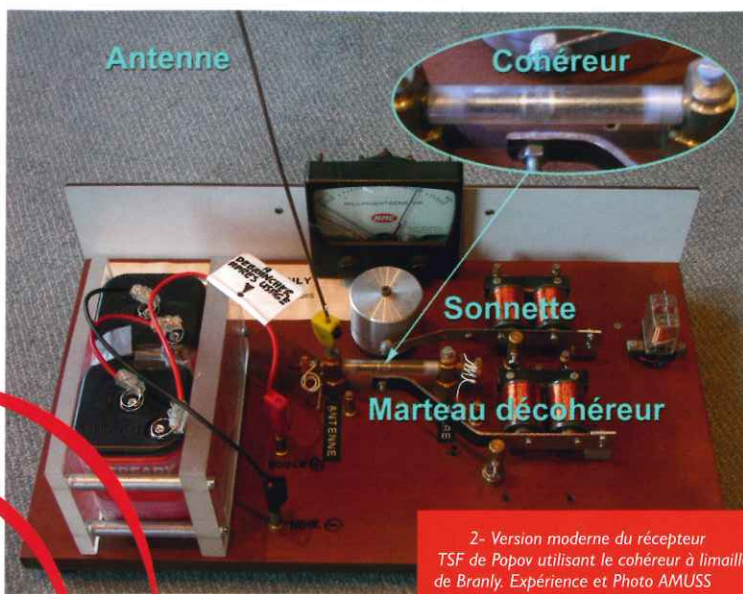
Dans le cohéreur de Branly la poudre de fer n'est pas assez tassée pour permettre au courant électrique de le traverser mais si l'on approche un aimant le contact électrique s'établit. Que se passe-t-il ? Vous vous êtes sans doute déjà amusés à attirer un trombone avec un aimant. Mieux encore vous avez constaté que l'on peut coller un deuxième trombone au bout du premier, un troisième sur le second... et former ainsi une chaîne de trombones collés les uns aux autres. C'est ce qui se passe avec les particules métalliques quand on approche l'aimant : elles s'agglomèrent, forment des chaînes continues et laissent passer le courant électrique au travers du tube. Dans le récepteur d'ondes hertziennes ce n'est pas un aimant qui agglomère les particules métalliques mais le champ électromagnétique, très faible. En fait les déplacements des particules et les modifications du contact entre elles sont de nature très subtile – à l'échelle de l'atome – et le passage de l'état isolant à l'état conducteur n'a pu être expliqué que dans le cadre de la mécanique quantique. Par ailleurs le cohéreur de Branly avait un défaut : après une impulsion d'ondes hertziennes les particules métalliques restaient conductrices de même que, dans l'expérience des trombones, ceux-ci restent aimantés et s'attirent encore entre eux même si l'on retire l'aimant. Le courant passait donc en permanence dans le cohéreur après l'impulsion et Branly devait frapper sa capsule avec un petit marteau pour que le courant cesse et que le dispositif soit prêt à recevoir l'impulsion suivante. Pas commode ! L'anglais Oliver Lodge se servit d'un dispositif d'horlogerie pour frapper la capsule à intervalles réguliers, comme celui qui, dans nos clochers, frappe les heures. Puis le russe Alexandre Popov utilisa le heurtoir de la sonnette, il suffisait d'y penser, pour taper sur le cohéreur et rompre le courant sitôt l'impulsion passée.

Les grands noms de la décennie 1890-1900 furent le russe Alexandre Popov qui introduisit le principe des antennes, longs fils métalliques soutenus par un ballon et reliés à un pôle de l'éclateur, le français Eugène Ducretet (4 km à Paris en 1897) qui s'associa à Popov pour développer les premiers systèmes émetteur/récepteur "clefs en main" et surtout Ferdinand Braun (62 km en 1899) et l'italien Guglielmo Marconi (message trans-Manche en 1899 et trans-Atlantique en 1901) qui établirent les records de portée successifs et reçurent conjointement le prix Nobel de physique en 1909. Braun s'intéressa particulièrement à améliorer le rendement de l'émetteur et la sélection des ondes hertziennes par le récepteur. La



multiplication des stations de TSF et l'augmentation des puissances posèrent en effet rapidement des problèmes : de fait, si deux personnes jouaient en même temps d'une machine de Hertz, un récepteur situé à distance comparable des deux recevait aussi bien l'une que l'autre. Difficile, dans ces conditions de passer plusieurs messages télégraphiques simultanément. D'ailleurs ce n'était pas simple non plus pour le télégraphe ou le téléphone à fil : il fallait un fil par communication, des centaines de fils posés sur des milliers de kilomètres. Il a fallu faire d'énormes progrès pour permettre les centaines de conversations téléphoniques mobiles simultanées dans un seul centre-ville. A l'origine la sélection d'un émetteur particulier se faisait seulement en adaptant, plus ou moins bien, la longueur de l'antenne





L'analogie mécanique du circuit résonant, dont chacun a l'expérience, est celui de la balançoire. Lorsque vous êtes sur celle-ci et qu'un ami la tire puis la lâche, vous vous balancez à une cadence, dite *fréquence propre*, déterminée par votre masse et la longueur des cordes de la balançoire. Si vous êtes seul et vous agitez de manière désordonnée, la balançoire s'agite aussi, mais fort peu. Même si vous faites des mouvements réguliers, la balançoire n'oscillera que faiblement, en général. Si, en revanche, vous coordonnez vos mouvements à la bonne et unique cadence, à la fréquence propre de la balançoire, celle-ci acquiert alors un mouvement de plus en plus ample. Les oscillations d'un circuit résonnant correspondent à un échange alterné entre deux formes d'énergie. Pour la balançoire il s'agit de l'énergie potentielle, la hauteur atteinte, et de l'énergie cinétique, la vitesse acquise; lorsque l'une est forte l'autre est faible et vice versa. Lorsque la balançoire est au plus haut de sa course sa vitesse est nulle et, réciproquement, lorsqu'elle est au plus bas de sa course sa vitesse est maximale. Pour le circuit électrique il s'agit des énergies électrostatique d'une part, la tension stockée dans le condensateur, et magnétique d'autre part, le courant stocké dans la bobine.

réceptrice à la longueur d'onde de l'émetteur, procédé peu pratique et peu efficace. Braun, Marconi, Ducretet mirent alors en oeuvre de nouveaux procédés pour *accorder* de plus en plus précisément, on dira aussi *syntoniser*, les stations d'émission et de réception sur des longueurs d'ondes choisies. Ils furent aidés en cela par les travaux effectués par Tesla, Oudin et d'Arsonval pour l'utilisation des ondes à haute fréquence en médecine. En fait le principe de base du dispositif d'accord était déjà présent dans le cercle fendu de Hertz : un circuit dit *résonant* ou *oscillant* formé d'une boucle ou bobine de fil conducteur, appelée inductance, aux bornes de laquelle est branché un condensateur électrique constitué de deux sphères ou plaques métalliques en regard.

Ce circuit n'est parcouru par un courant alternatif intense qu'à une seule fréquence, dite de résonance, déterminée par la nature de ses deux composants. S'il reçoit un champ électromagnétique à toute autre fréquence il ne sera parcouru que par un courant faible. Le sélecteur de station de TSF était inventé. La nouvelle technique portait remède aux risques d'interférences entre émetteurs, diminuaient les troubles causés par les parasites atmosphériques, et augmentait notablement la portée par mise en résonance des stations d'émission et de réception. Dans son principe c'est toujours ce dispositif qui est derrière le bouton de réglage ou la télécommande des postes de radio ou de télévision.

Braun améliorera encore le récepteur en remplaçant en 1906 le cohéreur détecteur d'ondes par un cristal de *galène*, un sulfure de plomb, (voir page 76) dont il avait découvert en 1878 les propriétés de *semi-conducteur*, ne laissant passer le courant alternatif que dans un sens.

Ce cristal sera l'ancêtre de toute l'électronique dite "solide", par opposition au "vide" des tubes électroniques, et dont l'essor ne débutera qu'en 1948 avec l'invention du *transistor* par les américains Bardeen, Brattain et Shockley.

Comme l'humain est par nature insatisfait, les gens se sont dit «on ne va pas s'arrêter là ! Transmettre sans fil les traits et les points du morse c'est bien, mais faire passer du son dans l'éther c'est mieux !». Depuis 1876 on savait, grâce à l'américain Graham Bell, faire des microphones, qui font varier, qui *modulent*, l'intensité d'un courant électrique au rythme du son, et des écouteurs qui retransforment ce courant variable en ondes sonores. On pouvait donc transmettre le son par un "fil électrique". Un *téléphone*, utilisable à courte distance, était ainsi né en 1876. Puis, en 1878, le téléphone prit sa forme définitive

avec les microphones à charbon de l'anglais David Hughes et de l'américain Thomas Edison, sans modification notable pendant un siècle! Cependant faire passer des impulsions par ondes hertziennes est chose aisée parce qu'on travaille en tout ou rien : onde à pleine puissance, ou pas d'onde du tout. Faire passer du son, c'est une autre affaire, il faut émettre l'onde électromagnétique en permanence, on dit alors *onde entretenue*, et avec une intensité plus ou moins forte, proportionnelle à celle de l'onde acoustique. Donc, pour faire de la *téléphonie sans fil*, il faut moduler le champ électromagnétique comme on module le courant électrique dans un microphone, proportionnellement à l'intensité de l'onde acoustique. Il faudra attendre l'invention du *tube électronique*, la *triode* de l'américain Lee de Forest (1906) et la naissance de l'*électronique* pour que l'on sache produire des ondes électromagnétiques permanentes et les moduler par le courant d'un microphone. Du côté récepteur le cohéreur, dispositif en tout ou rien, était inutilisable. C'est alors que le cristal de galène de Braun fera la joie des amateurs de TSF : il permettait de détecter simplement l'amplitude du champ électromagnétique modulé, de le transformer en courant continu modulé qu'un écouteur, à son tour, transformait en son. Dans son expression la plus simple le récepteur à galène (voir page 76) comprenait une antenne (de Popov) reliée à un circuit résonant (de Braun) sur lequel on branchait un écouteur (de Bell) via le cristal (de Braun).

Si l'on pouvait transmettre le son sans fil, il restait à transmettre l'image. Autour de 1905, année phare d'Albert Einstein, se développaient les travaux sur la *photo-électricité*, génération de courant électrique par la lumière, qu'étudia particulièrement Hallwachs à Strasbourg et dont Einstein fit la théorie. On sut donc vite *moduler* un courant électrique par l'intensité lumineuse, la transmettre et la recevoir comme le son sous forme d'ondes hertziennes modulées. Mais pour produire une image il ne suffit pas d'allumer plus ou moins fort une lampe électrique; il faut des millions de points, on dit aujourd'hui des *pixels*, plus ou moins lumineux sur un écran. Or Braun, encore lui, avait inventé dès 1898 le tube *cathodique*, un tube à vide dans lequel un faisceau d'électrons (identifiés à peine un an plus tôt par l'anglais J. J. Thompson) produit un point lumineux sur l'écran de verre qu'il frappe. Il avait aussi développé les moyens de déplacer ce point sur l'écran en appliquant un champ magnétique créé par ce qu'on nomme maintenant des bobines de déviation ou de balayage (voir expérience). Tous les ingrédients de notre tube de *télévision* moderne étaient là ! Les premières transmissions d'images auront lieu dans le second quart du XX^e siècle. ■