

Sujet Oral ENSAM :

Analyse de documents (pages suivantes)

Résolution de problème :

Modulation/démodulation (avec brève explication)

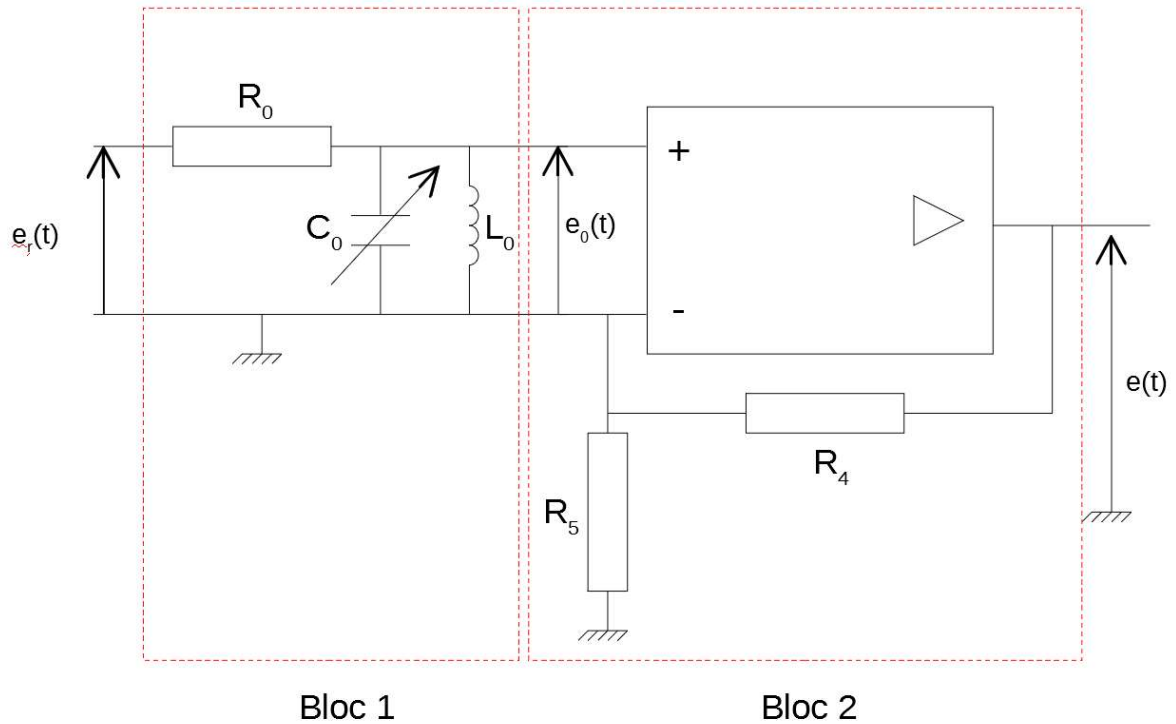
On veut transmettre un signal $e_{info}(t) = E_{info} \cos(2\pi f_m t)$.

On utilise une porteuse $e_{port}(t) = E_{port} \cos(2\pi f_p t)$.

On note alors le signal émis $e_a(t) = k \times e_m(t) \times e_{port}(t)$

où $e_m(t) = E_0 + e_{info}(t)$

On note $e_r(t)$ le signal reçu par l'antenne de réception et on suppose $e_a(t) = e_r(t)$.



- 1) Expliquer la fonction des deux blocs depuis la réception et justifier leur intérêt par rapport à $e_{info}(t)$.
- 2) Expliquer comment récupérer le signal $e_{info}(t)$ à partir de $e(t)$.



▲ Guglielmo Marconi
(1874-1937)

Est-il possible de transmettre des messages à distance sans lien matériel entre l'émetteur et le récepteur? Oui, répond en 1890 le physicien Édouard Branly à la communauté scientifique. L'ère des télécommunications s'ouvre alors.

La radio: une aventure collective

Marie-Christine de La Souchère, agrégée de physique



Le hasard ne sourit qu'aux esprits bien préparés, disait Louis Pasteur. Une maxime qui s'applique particulièrement à un de ses anciens élèves, le

physicien Édouard Branly. À l'automne 1890, dans un dortoir désaffecté de l'Institut catholique de Paris, le jeune Branly travaille à débrouiller les causes qui font varier la résistance électrique des « conducteurs imparfaits », tels les métaux réduits en limaille, c'est-à-dire en poudre. Dans le cadre de ses recherches, il expose à la lumière des tubes de verre de petit diamètre, de la taille d'un crayon, renfermant de la limaille de divers métaux : zinc, fer, aluminium, bismuth ou cuivre. Ces tubes sont insérés dans un circuit comportant une pile et un galvanomètre chargé de détecter le passage du courant. Lorsque l'étincelle d'un arc électrique éclate près de l'appareil, voire à plusieurs mètres de distance, la limaille devient fortement conductrice et l'aiguille du galvanomètre marque une nette déviation, signe d'une diminution importante de la résistance

électrique. Par acquit de conscience, Branly se livre à une contre-expérience en masquant la lumière avec un carton qu'il place entre le tube et l'étincelle. Contre toute attente, la résistance électrique diminue tout autant. Ce n'est donc pas la lumière en tant que telle mais l'influence électrique de l'étincelle et les oscillations dont elle est le siège qui génèrent l'effet constaté. Branly vient de trouver un moyen fiable de détecter ces ondes électromagnétiques dont l'existence avait été confirmée par le physicien allemand Heinrich Hertz deux ans auparavant. Croyant même avoir découvert un quatrième état de la matière, l'état radioconducteur, il fait part de sa découverte dans une note publiée le 24 novembre 1890 dans les comptes-rendus de l'Académie des sciences.

TUBES À LIMAILLE

En 1894, l'Anglais Oliver Lodge propose une explication au phénomène de radioconduction. Le champ électrique de l'onde produirait des forces attractives entre les grains de limaille, qui s'agglutineraient pour former des chaînes conductrices de courant. Et Lodge donne au dispositif de Branly le nom de « cohéreur », dérivé de l'anglais *cohere*, lui-même issu du latin *coherere*, qui signifie « adhérer ensemble ». Toutefois, les tubes à limaille de Branly ont un inconvénient. Après chaque étincelle, il faut redonner une légère secousse au tube pour le réactiver et le rendre propre à une nouvelle réception. Lodge automatise l'opération au moyen d'un vibreur à mouvement d'horlogerie. En tout état de cause, le radioconducteur de Branly permet de commander la fermeture d'un circuit électrique à distance, sans qu'il y ait de lien matériel entre le générateur d'étincelles, c'est-à-dire l'organe de commande, et le tube à limaille. Le système, dont la portée s'avère rapidement supérieure à celle des télégraphes optiques, permet ●●●

Le 27 mars 1899, Marconi envoie le premier télégramme entre l'Angleterre et la France. La transmission de messages à distance par ondes hertziennes précède d'une dizaine d'années celle de sons.



... d'actionner, via un relais ultrasensible, les inscripteurs Morse en vigueur dans l'administration des télégraphes.

Le physicien russe Alexandre Popov est l'un des premiers à se lancer dans cette aventure. Entré comme instructeur à l'Académie de marine de Kronstadt, près de Saint-Petersbourg, il cherche à prévoir à distance l'arrivée des orages afin d'en informer les navigateurs. Le 7 mai 1895, il présente devant la Société russe de physique et de chimie de Saint-Petersbourg un récepteur complet, comportant une haute antenne verticale (le fil d'un paratonnerre), reliée à la terre, et un cohéreur automatisé grâce à une sonnerie électrique dont le marteau frappe le tube en verre après réception. Le 24 mars 1896, Popov obtient une

portée de près de 250 mètres, entre deux bâtiments situés aux extrémités du campus de l'université de Saint-Petersbourg. « Heinrich Hertz » sont les premiers mots s'inscrivant sur la bande télégraphique. Six mois plus tard, il réussit une connexion d'une dizaine de kilomètres entre le port de Kronstadt et des navires croisant au large. De son côté, le 5 novembre 1898, l'industriel Eugène Ducretet, qui collabore avec Popov depuis 1895, réalise la première liaison sans fil en France, entre la tour Eiffel et le Panthéon. En 1899, Popov arrive à Paris, avec pour mission de passer

à Ducretet une commande d'appareils de radio pour la flotte russe et les stations côtières. Au tournant du siècle, le matériel Ducretet-Popov sauvera des centaines de vies, dont celles de l'équipage du cuirassé russe *Amiral Général Apraxine*, bloqué par les glaces dans le golfe de Finlande.

L'IMPULSION DE MARCONI

Les succès de Ducretet et de Popov se trouvent néanmoins éclipsés par l'ascension fulgurante d'un de leurs cadets, l'Italien Guglielmo Marconi. En 1894, le jeune Marconi se fait connaître par quelques essais de TSF (télégraphie sans fil) modestes mais fructueux, réalisés dans le grenier familial, puis à partir de la résidence d'été de ses parents, la villa Griffone, près de Bologne. Dans la foulée, le jeune homme propose ses services au ministre italien des Postes, qui l'éconduit. Mais la mère de Marconi, qui est d'origine irlandaise et a gardé des contacts à Londres, veille au grain : Marconi part poursuivre ses expériences en Angleterre, où il dépose plusieurs brevets. En 1897, il fonde sa société, la Wireless Telegraph & Signal Company, rebaptisée par la suite Marconi's Wireless Telegraph Company Ltd. Excellent homme d'affaires, pragmatique, aimant les mondanités, Marconi sait entourer ses essais de la publicité nécessaire. S'ensuivent quelques belles performances médiatiques. En juillet 1898, grâce à son intervention, la reine Victoria, qui séjourne dans sa résidence de l'île de Wight, envoie un message au prince de Galles, le

LA TOUR EIFFEL SAUVÉE PAR LA TSF

La tour Eiffel, « cette horreur qui défigure Paris » selon les intellectuels de l'époque, doit son salut à la TSF. Pour sauver sa dame de fer du démontage qui la guette à l'issue de l'Exposition universelle de 1889, Gustave Eiffel finance les essais militaires de TSF du polytechnicien Gustave Ferrié. Celui-ci a compris les avantages que l'armée pouvait en retirer : rapidité, souplesse de transmission, discrétion et sécuri-

té, lignes et câbles étant des cibles particulièrement vulnérables en temps de guerre. Le 21 janvier 1904, la tour Eiffel devient station de TSF pour la radiotélégraphie militaire. Des baraquements dressés sur le Champ-de-Mars abritent le matériel d'émission et de réception relié à l'antenne accrochée à la tour. Puis l'installation se perfectionne, les riverains se plaignant des nuisances occasionnées par les étincelles de

l'émetteur. Ce sont alors six fils d'acier de cinq millimètres de diamètre et 425 mètres de long qui s'épanouissent en éventail depuis le sommet du monument, où ils sont amarrés à un poteau métallique, avant de se réunir à un fil de descente qui pénètre dans un poste aménagé dans des locaux souterrains. Le 23 mai 1910, la tour Eiffel se voit confier une nouvelle tâche : l'émission de signaux horaires à destination des navires, pour

une détermination précise de la longitude, indispensable au repérage en mer. Tous les jours ouvrables, à minuit, une série de bips caractéristiques, commandés par l'Observatoire de Paris, donne l'heure à la demi-seconde près. Des signaux spéciaux, au centième de seconde, sont émis occasionnellement pour les besoins de la géodésie. La portée des ondes est de plusieurs milliers de kilomètres.

PHOTO JOSSE/LEBHAÏE

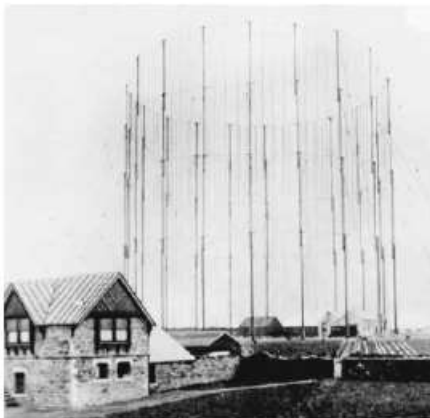


futur Edouard VII, en convalescence sur le yacht royal. Quelques mois plus tard, le 27 mars 1899, les signaux de Marconi traversent la Manche. Les étincelles qui ont éclaté entre deux boules de cuivre dans le phare de Douvres agissent sur un tube de verre rempli de limaille, à Wimereux, près de Boulogne-sur-Mer, à une cinquantaine de kilomètres de là. La teneur d'un des messages de Marconi, adressé avec un débit de quinze mots par minute, est la suivante : « *Monsieur Marconi envoie à Monsieur Branly ses respectueux compliments par le télégraphe sans fil à travers la Manche, ce beau résultat étant dû en partie aux remarquables travaux de Monsieur Branly.* » Après ce succès, plus rien ne semble devoir arrêter Marconi. Le printemps suivant voit le dépôt du brevet 7777, qui permet de sélectionner les messages en provenance d'émetteurs différents. Puis Marconi, persuadé que les ondes, du fait de la gravité, suivent la courbure de la Terre au lieu de se propager en ligne droite avant de se perdre dans l'espace, ambitionne de relier l'Europe au Nouveau Monde. L'expérience décisive a lieu le 12 décembre 1901. Soutenue par deux mâts

de 45 mètres de haut, l'antenne émettrice de Poldhu, au cap Lizard, à la pointe sud-ouest des Cornouailles, comporte 55 fils disposés en éventail de manière à augmenter la surface de rayonnement. À 3500 km de là, sur une colline qui surplombe la ville de Saint-Jean de Terre-Neuve, alors colonie britannique, une antenne portée par un cerf-volant est chargée de recueillir les ondes. Ce jour-là, Marconi attend, impatient. À 12h30, heure locale, il entend enfin dans son casque les trois points qui, en morse, marquent la lettre S. Une réussite qui n'est pas du goût de Nikola Tesla. « *Laissez-le continuer, il est en train d'utiliser 17 de mes brevets* », constate l'ingénieur américain d'origine serbe, spécialiste des hautes fréquences, dont Marconi s'est approprié le savoir-faire. Ce n'est qu'en 1943 que la Cour suprême des États-Unis rendra justice à Tesla en reconnaissant l'antériorité de ses travaux. Mais si, malgré ses ambitions, Marconi ne voit alors dans la TSF qu'un complément du télégraphe à l'usage des compagnies maritimes, toutes autres sont les motivations du Canadien Reginald Aubrey Fessenden. Celui-ci rêve ●●●

▲ *Edouard Branly dans son laboratoire, vers 1920. Avec son radioconducteur mis au point trente ans plus tôt, il est le précurseur de « la » radio.*

▼ C'est de la station de Poldhu, en Angleterre, qu'est effectuée en 1901 la première liaison radio transatlantique. L'émetteur conçu par Marconi est initialement relié à 20 mâts de 60 mètres. Abîmée par une rafale, l'installation fonctionnera finalement avec deux mâts.



Pour en savoir plus

■ Édouard Branly, *La TSF*, Payot, 1923.

■ Jean-Claude Boudenot,

Comment Branly a découvert la radio, EDP Sciences, 2005.

■ www.radiomarconi.com/marconi/testa/marconi.pdf

Giancarlo Morolli et Giuliano Nanni, *Giuglielmo Marconi, esploratore dell'etere*, *Giuglielmo Marconi, space explorer* (en anglais et italien).

... de transmettre la parole avec toutes ses inflexions. Les premiers essais de modulation d'amplitude, au cours desquels Fessenden insère un microphone dans le circuit de l'antenne émettrice, débutent dès 1900. Les variations de pression communiquées par la voix à la membrane du microphone modifient l'amplitude de l'onde émise. Les variations d'amplitude de cette onde, dite porteuse, reproduisent fidèlement le message sonore à transmettre. Et le soir de Noël 1906, des opérateurs radio à bord de navires croisant sur la côte nord-est des États-Unis, ainsi que quelques amateurs médusés, entendent dans leur casque la voix fantomatique d'un être humain. L'inconnu annonce un disque, un *largo* de Haendel. Lorsque les dernières notes se sont envolées, l'homme entame un solo de violon. Avant de lire un passage de la Bible et de présenter ses vœux aux auditeurs, les priant de lui adresser par lettre un rapport sur les conditions de réception de l'émission.

L'inconnu se présente enfin: il s'agit de Fessenden lui-même, au micro de la station de Brant Rock près de Boston, dans le Massachusetts.

À la même époque, une autre invention ouvre la porte à la transmission de la voix et de la musique: la lampe de radio, qui détrône le tube à limaille et ses successeurs, détecteur à électrolyse du général Ferré ou trépied-disque de Branly. En 1883, l'Américain Thomas Edison avait constaté le passage d'un léger courant entre le filament d'une lampe à incandescence et une feuille d'étain placée sur la surface intérieure de l'ampoule lorsque celle-ci était portée à un potentiel positif (les électrons négatifs émis par le filament chauffé sont attirés par la feuille d'étain, de polarité opposée). En 1889, Edison montre son expérience à l'ingénieur britannique Sir John Ambrose Fleming. La même année, Fleming rejoint la Wireless and Signal Company de Marconi. En 1904, chargé de mettre sur pied un bon détecteur d'ondes hertziennes, Fleming reprend, en la perfectionnant, la lampe d'Edison, réalisant une « valve » détectrice (ou diode) qui récupère les alternances

positives de l'onde modulée, dont les variations commandent les vibrations d'un écouteur ou d'un haut-parleur.

Cependant, sans amplification, la réception reste une gageure, les ondes étant affaiblies par la distance. L'Américain Lee de Forest perfectionne la valve (ou diode) de Fleming en 1906 en y incorporant une troisième électrode, la grille, raccordée à l'antenne du récepteur de TSF. Des variations minimales du potentiel électrique de la grille induisent des variations importantes du courant qui traverse la lampe. Le tube (ou triode) de Forest, qui amplifie les signaux faibles, est breveté sous le nom d'Audion. En 1908, Lee de Forest diffuse du haut de la tour Eiffel la musique d'un phonographe et, deux ans plus tard, transmet à plus de vingt kilomètres le chant du ténor Enrico Caruso depuis le Metropolitan Opera de New York.

DÉTECTEURS À GALÈNE

Parallèlement aux tubes de radio, les détecteurs à sulfure de plomb ou galène, qui fonctionnent avec l'énergie captée par l'antenne, connaissent leur heure de gloire. Comme la diode de Fleming, ils récupèrent les alternances positives de l'onde modulée. Le cristal de galène est bloqué par une vis dans un support. L'opérateur déplace, sur la surface du cristal, une pointe métallique dite moustache de chat, portée par un levier conducteur, et cherche pas à pas les points qui procurent une bonne détection. Jusqu'à l'avènement du transistor, association compacte de trois lamelles de matériaux semi-conducteurs, les détecteurs à galène équipent navires, ballons dirigeables et stations mobiles de TSF; tout en faisant le bonheur des amateurs. Lors de la Première Guerre mondiale, ils jouent un rôle stratégique dans la diffusion des messages dans les tranchées.

Dans la décennie qui suit le conflit, la TSF, devenue « la radio », investit peu à peu le quotidien. En 1920 a lieu aux États-Unis une véritable retransmission radiodiffusée: un reportage en direct sur l'élection du président Warren Harding. Sur le territoire français, les émissions quotidiennes de la tour Eiffel débutent officiellement le 6 février 1922 (lire p. 78), devançant de peu celles de la BBC. Radiola, qui deviendra Radio-Paris, Radio PTT et Le Poste Parisien lui emboîtent le pas, tandis que se concrétisent les premiers essais de transmission de l'image... ■