André Ducluzaux

L'électricité

Découvreurs et Inventeurs

Tome V - Vecteur d'information

LES ÉDITIONS DU NET

André Ducluzaux

L’électricité

Découvreurs et Inventeurs

Cent aventures de
physiciens, autodidactes,
ingénieurs, techniciens

Tome V

Vecteur d’information

LES ÉDITIONS DU NET
22, rue Édouard Nieuport 92150 Suresnes

À Françoise

Du même auteur :

La mesure électrique au temps des pionniers
ed. RGE -1990

Une histoire pour l'avenir - Merlin Gerin - 1920 -1992
(sous la direction de) ed. Albin Michel - 1992

La Houille blanche de Belledonne en Romanche
Aristide Bergès du mythe à la réalité
ed. de Belledonne - 1998

Histoires d'industries en Dauphiné
(collectif) ed. APHID - 2002

Renvois dans le texte :
(k) = voir figure repère k
(5) = voir complément 5 en fin de chapitre
(II-4) = voir tome II, chapitre 4

© Les Éditions du Net, 2014
ISBN : 978-2-312-02564-3

Au lecteur

Ce livre, genèse des découvertes et des inventions, constitue peut-être une vingt sixième Histoire de l'électricité depuis la première, celle de Joseph Priestley en 1771.

Alors, qu'apporte-t-il d'autre, par rapport aux précédents ?

Comprendre le pourquoi et le comment de l'émergence de l'une des sciences physiques, l'électricité, et des techniques qui l'ont mise au service de l'homme par l'industrie, tel est l'objectif central de cette histoire.

Elle retrace l'étonnante aventure intellectuelle et matérielle des pionniers, découvreurs et inventeurs de Thalès au transistor. Les premiers cherchaient à soulever un coin du voile cachant cet univers infini des connaissances, les seconds s'appliquaient à les traduire pratiquement en machines et objets utiles, souvent par passion, ou pour gagner leur vie, en facilitant celle de leurs contemporains.

Cette ambition m'a conduit à ne pas rééditer une histoire classique, limitée à un catalogue chronologique de faits, dates, événements, personnages et machines. Aussi ce livre ne se propose pas de s'ajouter à d'autres histoires essentiellement descriptives, mais d'en être complémentaire sur deux aspects :

– D'abord, approfondir l'histoire des longs et laborieux processus qui ont déclenché chacune des découvertes et inventions de l'électricité, analyser avant leurs causes, après leurs conséquences, pour mieux en percevoir l'originalité et le mystère. Des exemples pour le chercheur d'aujourd'hui, qui y retrouvera ses propres cheminements intellectuels.

– Ensuite, après le début du développement industriel des inventions, survoler seulement leurs perfectionnements successifs, mieux connus car plus proches de nous et déjà bien décrits.

Finalement, il en résulte une histoire de l'électricité analytique, non simplement descriptive. Avant de relater chaque découverte ou invention, il faut rechercher ses raisons et les difficultés latentes, humer *l'air du temps* ; essayer de dégager ensuite le *fil rouge*, la démarche incertaine ou rapide qu'avaient suivi leurs auteurs, puis les conséquences qu'elle a entraînées. Une telle analyse permet au lecteur d'intégrer à sa place chacune de ces briques éparses, dans la construction progressive, mais désordonnée et sans logique apparente, du système électrique global. La forêt est autre chose qu'une somme d'arbres.

Comprendre une invention nécessite de l'analyser bien au-delà de l'angle scientifique ou technique. Tout y intervient, la formation et l'expérience des hommes, leur méthodologie, motivations et environnement ; ainsi que les aspects commerciaux, financiers et même nationaux, transformant parfois l'invention en un véritable thriller.

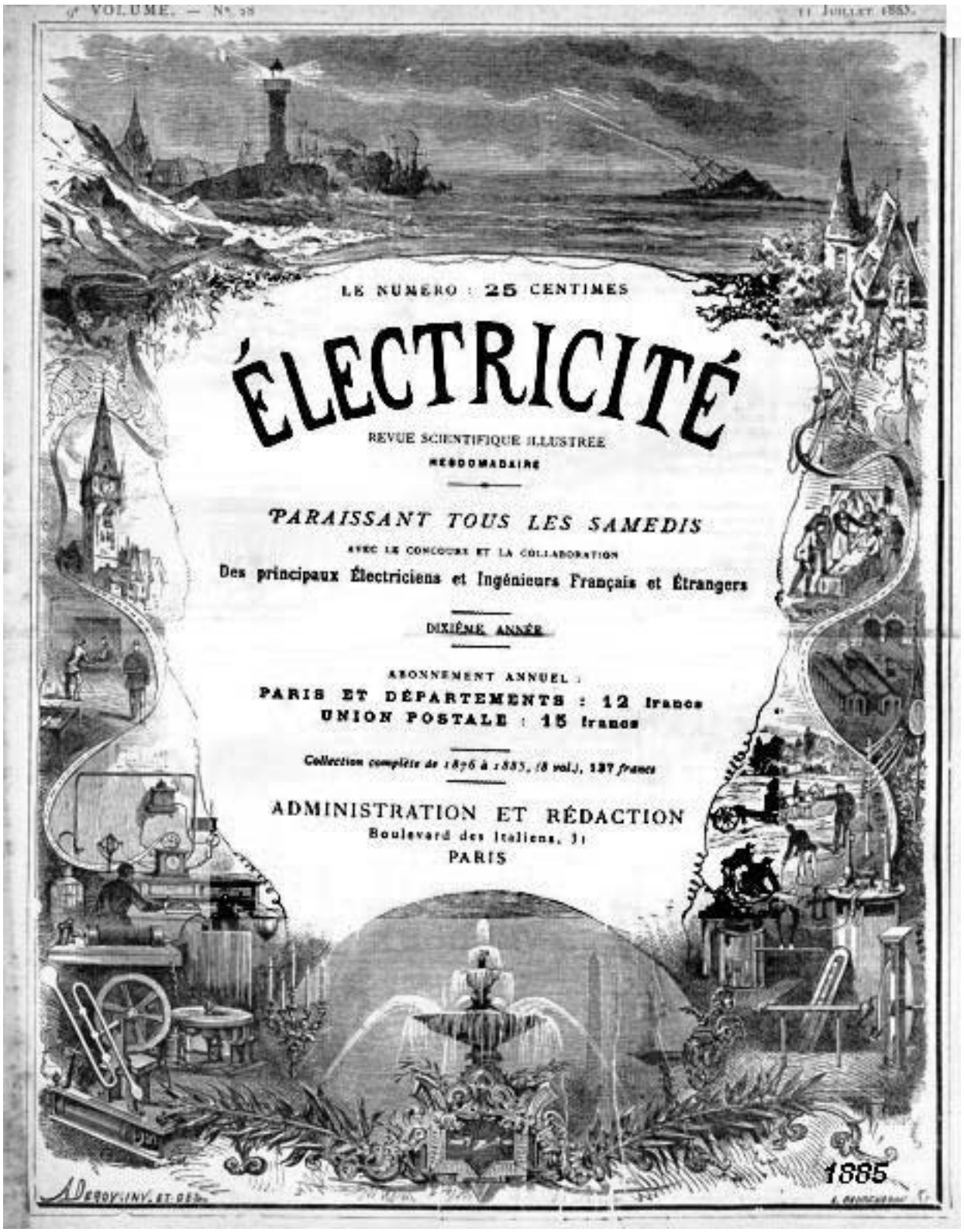
La finalité de l'histoire des sciences et techniques est d'essayer de comprendre le cheminement intellectuel qui a conduit le cerveau du découvreur ou de l'inventeur jusqu'à l'éclosion de sa recherche, une passionnante aventure de l'intelligence humaine, quels que soient l'époque et les moyens, comme le précisait le philosophe Heidegger :

L'essence de la technique n'est rien de technique,

c'est le fonctionnement mystérieux du cerveau humain.

André Ducluzaux 2010

Suite de l'avant-propos, voir tome I


LE NUMERO : 25 CENTIMES
ÉLECTRICITÉ
REVUE SCIENTIFIQUE ILLUSTRÉE
HEBDOMADAIRE
PARAISSANT TOUS LES SAMEDIS
AVEC LE CONCOURS ET LA COLLABORATION
Des principaux Électriciens et Ingénieurs Français et Étrangers
DIXIÈME ANNÉE
ABONNEMENT ANNUEL :
PARIS ET DÉPARTEMENTS : 12 francs
UNION POSTALE : 15 francs
Collection complète de 1876 à 1885, (8 vol.), 137 francs
ADMINISTRATION ET RÉDACTION
Boulevard des Italiens, 31
PARIS
1885

Sommaire

Tome I – Défricheurs de l'inconnu

Tome II – Générer l'électricité

Tome III – Et la lumière fut

Tome IV – Vecteur d'énergie

Tome V – Vecteur d'information

Vecteurs d'information primitifs 10

1 – Télégraphe électrique.....13

Premiers télégraphes – Systèmes : anglais à aiguilles et cadrans Wheatstone, USA enregistreur Morse, français Bréguet et Morse, allemand Siemens. Télégraphie s/marine – Accroitre le transfert – L'image – Auxiliaires

2 - Téléphone.....43

Téléphone musical de Reis – Téléphones de Gray, de Bell – Procès. Micro à charbons – Développement – Antériorité Meucci – Au XX^{E} siècle.

3 - Les ondes électromagnétiques.....67

Propagation des phénomènes physiques – Maxwell : les équations, la lumière, l'éther – Les maxwelliens – Découvertes de Lodge, Hertz.

4 – Rayons cathodiques - Matière radiante 81

Matière radiante – Effet Edison – Découverte des rayons X – Tube de Braun. Découverte de l'électron par J.J.Thomson – Conséquences.

5 – TSF - Radiophonie 95

Précurseurs – Expérience de Lodge, 1894 – Antenne de Popov – Marconi. Perfectionnements – Liaisons transmanche, transatlantique – Nouveaux détecteurs. Ondes entretenues – Radiophonie de Fessenden – Audion de Lee de Forest – Triode.

6 - Télévision 155

Problèmes – Précurseurs – Systèmes électromécaniques : Rosing, Baird, Barthélémy, Jenkins – Systèmes électroniques : Dissector de Farnsworth, Tihanyl, iconoscope de Zworykin, émitron de EMI.

7 - Effet transistor - Semi-conducteurs 177

Précurseurs – Recherche d'une théorie – Transistor à pointes, transistron, bipolaire à jonction, à effet de champ – Circuits intégrés –Microprocesseurs. Domaines d'applications –Numérique.

Le sommaire général des 5 tomes figure en fin de livre.

VECTEURS D'INFORMATION PRIMITIFS

La transmission de l'information au loin et rapide a été l'une des grandes préoccupations de toutes les civilisations, pour des motifs politiques, guerriers ou commerciaux ou plus simplement individuels. (1)

Le messager à cheval était le moyen le plus rapide, jusqu'à 100 km par jour, s'il disposait de bons relais pour changer de cheval et de cavalier (a).

– Le grec Phidippides informa les Athéniens de leur victoire sur les Perses (– 490), en courant sur 40 km depuis Marathon pendant trois heures.

– L'annonce de la victoire de Napoléon à Austerlitz mit 10 jours pour parvenir à Paris à 400 lieues.

– La malle-poste en France roulait à 10 km/h, de jour.

– Pour traverser les mers, le bateau à voile ou à rame était encore plus lent.

a en 1750, le courrier mettait 15 jours de Paris à Marseille

– Les pigeons voyageurs étaient utilisés lors du siège de Paris en 1870, et encore par les Anglais au début de WW2.

La transmission optique a été pratiquée depuis l'Antiquité, le jour par fumées, la nuit par feux. La communication militaire entre bateaux ou avec la terre se faisait par sémaphore, une série de fanions hissés sur un mat, dont chacun signifiait un message conventionnel.

La transmission acoustique par la voix aurait été pratiqué dans l'empire Perse, d'après l'historien Diodore, sur des distances de 2000 km de Suse à la Grèce ; les hommes-relais étaient disposés à plusieurs km et transmettaient les messages, sans doute avec des porte-voix ; la distance franchie en un jour équivalait à 30 journées de marche.

– La suprématie d'Alexandre le Grand dans les batailles venait peut-être aussi du *tuba stentorophonica,* porte-voix qui lui permettait de donner ses ordres et d'exhorter ses troupes à quatre lieues de distance, dans une langue incomprise des ennemis.

– Dans les vallées montagneuses, les habitants échangeaient par la voix ou le cor des informations simples, codées.

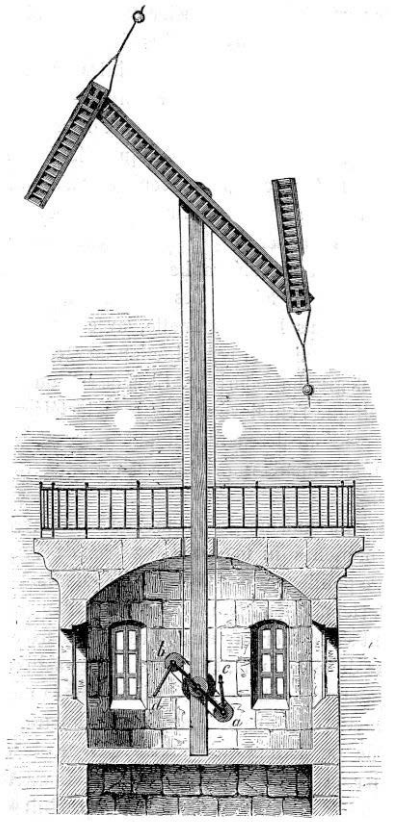
– Dans les forêts africaines, l'arrivée des explorateurs était signalée longtemps à l'avance par le tam-tam.

Télégraphe optique Chappe

Le rappel de ses **c**aractéristiques permet de situer ses possibilités restreintes par rapport à son futur concurrent électrique. Ce système français original, simple et assez efficace, ne s'est développé que partiellement dans d'autres pays limitrophes. Il correspondait au besoin spécifique de cette nation en guerre avec presque tous ses voisins, suite à sa révolution de 1789. Les troupes étaient aux frontières, à des centaines de km de Paris, donc à plusieurs jours de cheval pour la réception des informations militaires et la transmission des ordres

Les frères Chappe envisageaient d'installer un appareil dans une station à la fois réceptrice et émettrice, un relais, située sur des tours existantes, ou à construire sur les points hauts du relief, environ tous les 10 à 15 km.

L'appareil, placé en haut d'une échelle utile pour l'entretien, comprenait une planche de bois de 4 m pivotant en son milieu, le régulateur ; à chaque extrémité pivotait une planche de 2 m, l'aile. Le tout était manœuvré par un système de cordes, poulies et contrepoids, depuis un abri installé au sommet de la tour. Avec deux positions à 90° du régulateur et quatre positions à 45° de chaque aile, on transmettait 98 signaux ou chiffres. À chaque station, une lunette à fort grossissement permettait d'observer les deux stations voisines (b).



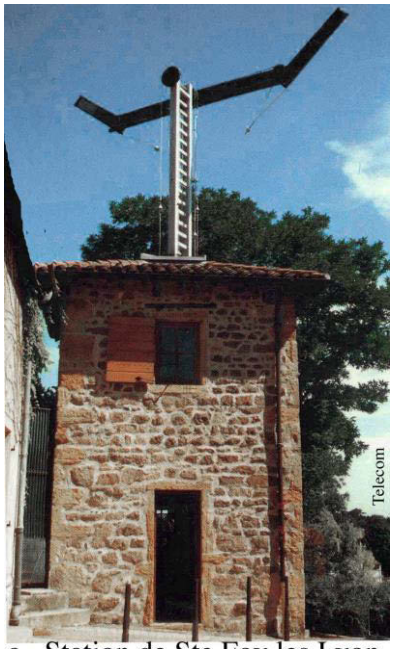
b Télégraphe de Chappe

Le procédé est présenté à l'Assemblée en mars 1792, une commission est chargée de procéder à un essai, réussi en juillet 1793. La première ligne Lille à Paris, avec 16 stations, a transmis en deux heures un premier message important, le 1er septembre 1794, la reprise de la ville de Condé aux Autrichiens. La Convention l'accueillit avec un tonnerre d'applaudissements, autant pour la victoire que pour l'invention contribuant au salut de la jeune République.

Le codage secret des signaux fut progressivement affiné. Il y avait trois livres de vocabulaire de 92 pages avec 92 lignes, soit 20 000 mots, expressions ou lieux. Les signaux donnaient trois chiffres permettant de trouver dans les livres le mot transmis.

Le télégraphe constitua un bouleversement de l'art de gouverner et surtout de faire la guerre, que Napoléon su bien exploiter.

Le réseau s'étendait sur tout le territoire avec 5000 km de lignes et 550 stations jusqu'à Amsterdam, Anvers et Venise. Une dépêche de 25 mots parvenait à Paris depuis Strasbourg au mieux en six heures, en passant par 52 *stations*. Ce n'était pas toujours les cas : le débarquement de Napoléon revenant de son exil à l'île d'Elbe, le 1er septembre 1815, ne fut connu que le 4 septembre à Paris, où il arriva le 20 septembre.



c Station de Ste Foy les Lyon

Le système, rigoureusement secret, n'était exploité que pour le service de l'Etat, d'abord la République, puis l'Empire et le Royaume. Les *stationnaires* assurant le service étaient près d'un millier ; choisis dans des milieux sans éducation, ils étaient soumis à une discipline militaire et ignoraient le code. Seuls les traducteurs et directeurs des stations de départ et d'arrivée possédaient les trois livres de vocabulaire et traduisaient les signaux codés.

L'inconvénient majeur du système était évidemment la nuit et la visibilité réduite par mauvais temps ou brouillard. Le débit des communications restait très faible et aléatoire.

Le télégraphe Chappe résista quelques années à son concurrent le télégraphe électrique, dont la première ligne Paris - Rouen fut mise en service en 1845. Après 1850, Louis Napoléon Bonaparte, ouvert aux nouvelles techniques, signa sa rapide disparition.

Une dizaine de stations Chappe ont été restaurées, portant témoignage d'une technique de communication optique originale (c).

1883
RÉSEAU TÉLÉGRAPHIQUE
DU GLOBE
d'après la Carte de M. WILLIAM HUBER
Insérée dans le bulletin de la Société de géographie
Mai 1873.
(Mise au courant en 1883.)
Lignes exécutées
Lignes projetées
SCANDINAVIE
ALLEMAGNE
AUTRICHE
FRANCE
LES BRITANNIQUES
OCÉAN
ESPAGNE
ITALIE
TURQUIE
AFRIQUE
C. Farewell
Açores
Madère
Canaries
C. Vert
Is. du C. Vert
Archangel
Perm
Tomsk
Omsk
Orenbourg
Kiakhta
Albazin
Nicolajewsk
Petropavlovsk
Yokohama
Nagasaki
Manille
Saigon
Malacca
Singapore
Batavia
Port Darwin
Geralton
Augusta
Adelaide
Melbourne
Tasmanie
Brisbane
Rockhampton
I. Fidji
Nlle Calédonie
Ceylan
Madras
Bombay
Kurratchy
Aden
I. Socotra
Zanzibar
Is. Séchelles
Is. Comores
Mozambique
I. Maurice
I. de la Réunion
Natal
Calvinia
Senaar
Kena
Tripoli
Alexandrie
Suez
Bagdad
Téhéran
Tiflis
Samarkand
Caboul
Agra
Moscou
Kazan
Victoria
Héléna
Lac salé
Albuquerque
Chicago
Québec
Montréal
Boston
Washington
Savannah
Nlle Orléans
Is. Bermudes
Durango
Tampico
Vera Cruz
La Havane
Haïti
Jamaïque
Porto Rico
St Thomas
Guadeloupe
Martinique
Panama
Colon
Demerara
Cayenne
Bogota
Georgetown
Buenaventura
Lima
Para
C. S. Roque
Pernambuco
Bahia
Victoria
Jujuy
Assomption
Santos
Valparaiso
Montevideo
Conception
I. Sandwich
Madrid
Barcelone
Marseille
Toulon
Macinaggio
Ajaccio
Livourne
Rome
Naples
Valence
Ivice
Javea
Carthagène
Mahon
Cagliari
Trapani
Marsala
Messine
Modica
Malte
Oran
Alger
Bône
Bizerte
Tunis
Laghouat
Otrante
Valona
Corfou
Zante
Nissa
Serajewo
Is. Shetland
Orcades
Thurso
Peterhead
Valencia
Whitehaven
Holyhead
Falmouth
Brest
Cherbourg
Boulogne
Bruxelles
Harlem
Berlin
Copenhague
Christiania
Sondervig
Norderney

1 – Télégraphe électrique

L'électricité, vecteur d'information

Il était assez prévisible que l'électricité, fluide se propageant à très grande vitesse dans de simples fils, devienne un moyen privilégié pour la transmission d'informations au loin. Chaque découverte importante dans le domaine électrique ouvrait alors une nouvelle piste aux inventeurs pour cette transmission de l'information.

– L'électrostatique du 18e siècle fut peu féconde.

– En 1800, la découverte du courant électrique par Volta ouvrait des perspectives, mais au début, le seul moyen pour détecter un courant était l'électrochimie.

– En 1820, Oersted constatait qu'une aiguille aimantée est mystérieusement déviée par la circulation d'un courant dans un fil proche. Ampère l'explique avec toutes les conséquences qui en découlaient, dont l'électroaimant d'Arago et le multiplicateur de Sweigger, simple bobinage au milieu duquel une aiguille aimantée pivotait sous l'action du champ magnétique d'un courant, le galvanomètre.

Ces deux pistes conduisirent les inventeurs aux télégraphes électriques, puis au téléphone

– En 1831, l'induction de Faraday fut à la base du téléphone de Bell.

– En 1888, Hertz découvrait les ondes électromagnétiques, prévues par Maxwell, permettant la transmission d'information par la Télégraphie Sans Fil, la TSF, puis la télévision.

Soixante ans plus tard,

– En 1948, les trois découvreurs du transistor déclenchaient une nouvelle vague d'inventions dans le domaine du traitement de l'information, devenu l'informatique. Puis le codage numérique du signal électrique nécessaire à l'ordinateur, initia le téléphone portable, l'internet et les multiples applications que nous connaissons.

Le télégraphe a été la première grande application de l'électricité, car elle ne nécessitait que très peu d'énergie ; même les piles peu puissantes étaient suffisantes, sans attendre l'apparition des générateurs électromécaniques. Cette invention n'est pas sortie d'un coup, finalisée, du cerveau et des mains d'un inventeur génial ; elle est le type même des inventions longues à se concrétiser en passant par nombre d'états provisoires et imparfaits. La réflexion du physicien Georges Claude en 1952 la définissait bien : *La recette de l'invention est de mêler une partie d'inspiration à neuf parties de transpiration.*

Même si quelques noms sont souvent cités comme les principaux promoteurs du procédé, Wheatstone, Morse, Bréguet, Hughes, Siemens, Baudot, il s'agit là d'une grande œuvre collective portée par des dizaines d'hommes de plusieurs nations, dont chacun a apporté une contribution plus ou moins importante. Bien qu'il y ait eu quelques classiques querelles de brevets, ou bien sur le premier qui…, Il ne sera guère possible au lecteur de discerner qui en est le principal inventeur.

Émergence des premiers télégraphes électriques

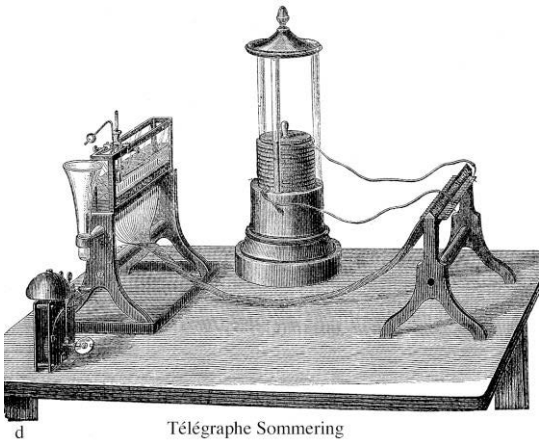
Cette première période, jusqu'en 1837, a permis de valider les principes avec des prototypes peu élaborés. Après deux procédés aléatoires, deux systèmes basés sur l'électromagnétisme ont émergé, sans que l'un apparaisse supérieur à l'autre : système à aiguille ou à électro-aimant.

Télégraphe électrostatique

Dès la préhistoire électrique, au siècle de l'électrostatique, en 1774, **Lesage,** à Genève, arrivait à faire bouger des balles de sureau à une dizaine de mètres. Une simple curiosité.

Télégraphe électrochimique

Le premier effet connu, capable de traduire la circulation d'un courant était la décomposition de l'eau par électrolyse. Le docteur **Sömmering** de Münich écrivait en 1808 *« Je ne me suis pas reposé jusqu'à j'ai pu réaliser mon idée de faire un télégraphe au moyen de l'évolution du gaz »*. Le 28 août 1809 il présentait à l'Académie de Bavière son appareil capable d'envoyer un message à deux mille pieds. Le courant d'une pile était transmis par l'intermédiaire d'un interrupteur à 35 positions (25 lettres et 10 chiffres), jusqu'aux 35 tiges d'or contenues dans la cuve à eau acidulée. Le câble joignant les deux appareils regroupait 36 fils isolés au fil de soie et recouvert de gomme laque. On observait le gaz qui se formait sur les tiges immergées pour connaître la lettre transmise (d).


d Télégraphe Sommering

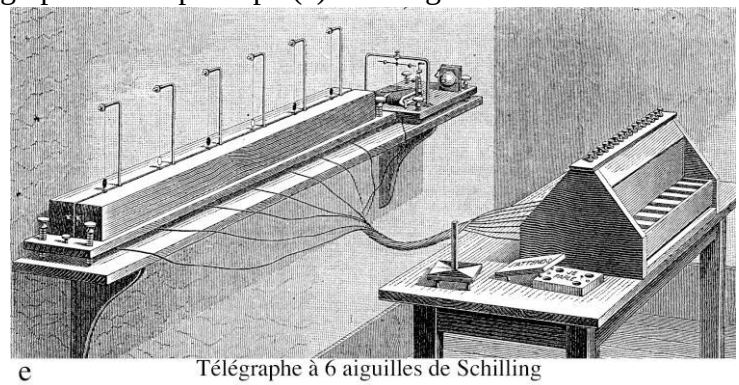
L'appareil fut emmené à Paris par Larrey, puis à Vienne en 1811. Malgré quelques perfectionnements, cette voie de l'électrochimie fut abandonnée, vraiment trop complexe.

Pourtant le baron russe Pavel Schilling, ambassadeur à Vienne, fut très intéressé par l'appareil. Il améliora avec Sömmering l'isolation des fils, en les recouvrant de caoutchouc et de vernis, permettant ainsi de conduire l'électricité sous l'eau. Mais ses fils isolés servirent simplement à faire sauter des mines à distance.

Télégraphe électromagnétique à aiguilles

Le galvanomètre ou multiplicateur de Sweigger était un moyen approprié pour détecter une impulsion électrique, un signal, transmis par des fils depuis une pile même très éloignée. Ampère, dont la théorie électromagnétique était à l'origine du galvanomètre, imagina un télégraphe basé sur ce principe (ch.II-2). Les utilisations pratiques de la science ne l'intéressaient pas beaucoup. D'autres mirent l'idée en application.

Schilling réalisa en 1832 le premier télégraphe sur ce principe (e). Des aiguilles aimantées étaient suspendues horizontalement au centre d'une bobine, un multiplicateur de Sweigger, ou galvanomètre. Avec 6 aiguilles, il pouvait transmettre l'ensemble des chiffres et des lettres. Chaque aiguille portait un petit disque réglé pour être vu au repos seulement par la tranche ; une impulsion de courant le faisait pivoter pour qu'apparaisse sa face blanche ; un courant de sens inverse rendait visible la face noire. Un codage des rotations successives des disques, noir-blanc, donnait la lettre transmise.


e Télégraphe à 6 aiguilles de Schilling

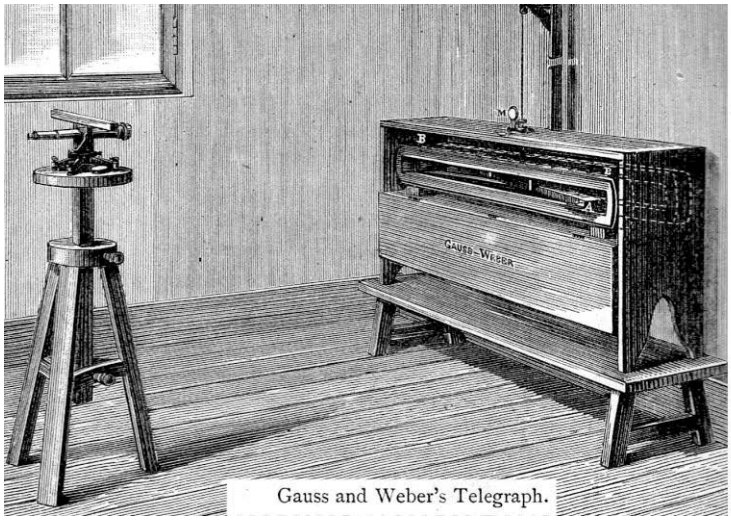
Le transmetteur, à droite, était une sorte de clavier de piano avec 8 touches noires et autant de blanches, elles établissaient le courant d'une pile dans un sens ou l'autre, par l'un des 8 fils, vers l'un des galvanomètres visibles à gauche. Deux touches servaient à déclencher une sonnerie d'appel, deux autres au courant de retour.

En 1835 Schilling se rend à Bonn à un congrès de naturalistes avec son appareil, il y rencontre Georg W. Müncke, professeur à Heidelberg, qui séduit, lui demande de le présenter à sa conférence du 23 septembre. Un modèle amélioré, avec seulement trois aiguilles, est réalisé pour rester à Heidelberg. Peu après, un étudiant anglais, William F. Cooke, ancien officier des Indes, venu se perfectionner en anatomie, assiste à l'une des présentations de Müncke, il est passionné par l'appareil, en fait faire une copie qu'il emmènera à son retour à Londres en avril 1836.

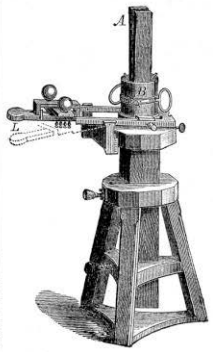
Schilling retourne à St Petersbourg en 1836, établit une liaison expérimentale traversant un canal entre deux pièces éloignées du palais de l'Amirauté. L'Empereur lui commande alors l'établissement d'une liaison télégraphique sous-marine entre Petersbourg et Kronstadt. Il meurt en 1837 avant de la réaliser.

L'appareil était encore loin d'un produit industriel, mais ce premier télégraphe définissait les composants que nombre de successeurs amélioreront progressivement : un générateur de courant, un manipulateur d'émission des messages, le câble de liaison, le récepteur de signaux électriques, un code de traduction des signaux élémentaires en lettres et chiffres. Un inconvénient cependant, le destinataire devait observer les signaux à vue, il n'y avait pas de trace enregistrée.

Karl F. Gauss et Wilhelm Weber, deux célèbres professeurs de l'université de Göttingen, avaient conçu en 1833 un système semblable. Le courant de la pile était transmis par deux fils au récepteur éloigné, un grand cadre rectangulaire bobiné, à l'intérieur duquel était suspendu un barreau magnétique de 1,2 m, par un fil de soie muni d'un miroir tournant avec le fil. Une lunette permettait d'observer la rotation du barreau aimanté dans un sens ou l'autre (f). Plus tard, la pile fut remplacée par un générateur original à courant induit. Ce transmetteur, figurant à droite, était constitué par deux forts aimants permanents sur lesquels pouvait coulisser, dans un sens ou l'autre, une bobine manœuvrée à main par un levier. Le courant induit fugitif qui naissait ainsi circulait dans un sens ou son contraire par deux fils jusqu'au récepteur.

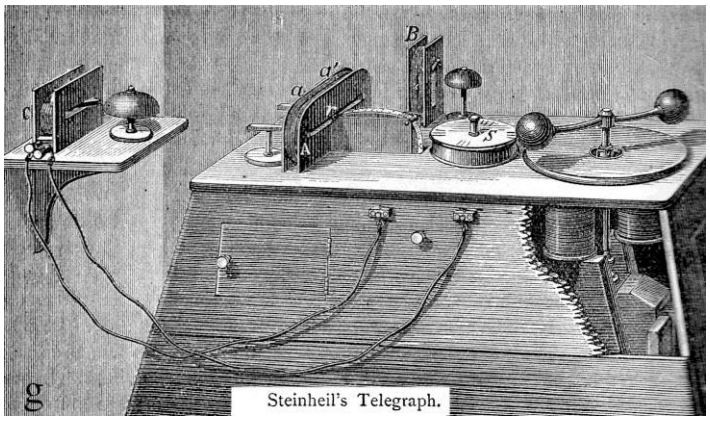


Gauss and Weber's Telegraph.

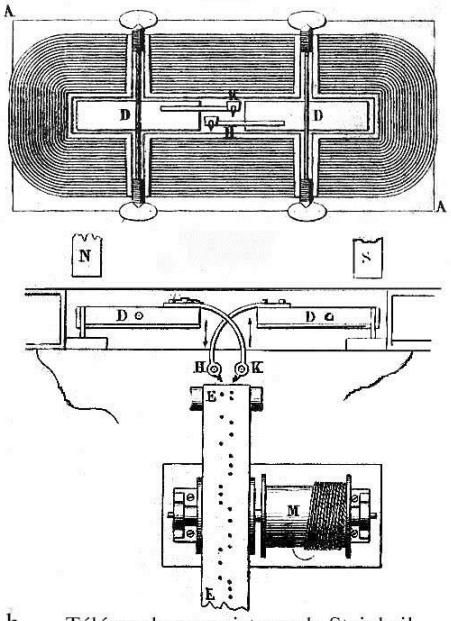

Sending Apparatus.

Ces fils de transmission reliaient l'observatoire au cabinet de physique, distant de 9000 pieds. Les deux professeurs échangèrent ainsi des messages jusqu'en 1838, mais il n'y avait pas de sonnerie d'appel pour prévenir le correspondant de se tenir prêt à recevoir un message à l'autre bout de la ligne.

L'observation à la lunette de la rotation du miroir solidaire de l'aiguille aimantée peut paraître inutilement compliquée, elle était très précise. C'est le procédé qu'adoptera W.Thomson pour détecter les faibles signaux transmis par les câbles transatlantiques.



Carl von Steinheil, autre professeur de physique de Münich, réalisait vers 1836, sur le même principe, un télégraphe enregistreur (g). Le courant induit était généré par la rotation manuelle de deux bobines (à droite) devant un aimant permanent, comme dans une machine de Pixii. Ce courant avait un sens ou son contraire suivant le sens de rotation du volant de manœuvre. Le récepteur était le bobinage de multiplicateur A, à l'intérieur duquel deux aiguilles pouvaient tourner en sens contraire. Elles portaient à leur extrémité un petit encrier qui marquait un point, à droite ou à gauche, sur une bande de papier se déroulant avec un mécanisme d'horlogerie (h). Le système était aussi acoustique, deux sonnettes B et C, avec un son différent d'une sixte, tintaient à l'inscription de chaque point sous l'effet d'un barreau de fer pivotant dans un petit bobinage, en série avec le bobinage principal. Un vocabulaire de codage permettait d'interpréter la succession et l'intervalle des points noirs imprimés sur un côté ou l'autre de la bande.



h Télégraphe enregistreur de Steinheil

Le système fonctionnait en 1837 entre l'observatoire de Bogenhausen et la résidence de Steinheil sur 37 000 pieds, soit 8 km. Il comportait des innovations notables : la possibilité de transmettre et enregistrer tous les signaux sur papier avec un code peu compliqué, doublé d'une réception sonore tenant lieu de sonnerie d'appel, mais l'apport principal de Steinheil fut la suppression, en 1838, de l'un des deux fils en le remplaçant par la terre. Aux deux extrémités, le fil de terre était relié à une plaque de cuivre enterrée dans un sol humide. Tous les télégraphes l'adopteront, et bien d'autres systèmes encore aujourd'hui.

Malgré une fabrication très artisanale, ce fut le système le plus évolué de son époque, un *monument historique* comme l'écrivait Th. du Moncel, mais Steinheil était un scientifique qui ne se préoccupait guère de la diffusion pratique de son invention.

D'autres expérimentateurs ont fait aussi des essais de télégraphe à aiguilles ; parmi eux on cite deux écossais, Richtie et Alexander.

Télégraphe Morse à électro-aimant

Conséquence directe des découvertes d'Ampère, Arago avait inventé l'électro-aimant. Une tige de fer entourée d'une bobine parcourue par un courant attirait une pièce en fer. Cette armature de l'électro pouvait alors faire une action mécanique pour enregistrer le signal électrique.

Déjà en 1831 à Albany, le professeur J. Henry communiquait entre son laboratoire et son domicile éloigné de 150 m, par une impulsion électrique transmise par deux fils à un petit électro-aimant, se traduisant par un clic audible. Sa femme l'avertissait ainsi quand le repas était prêt.

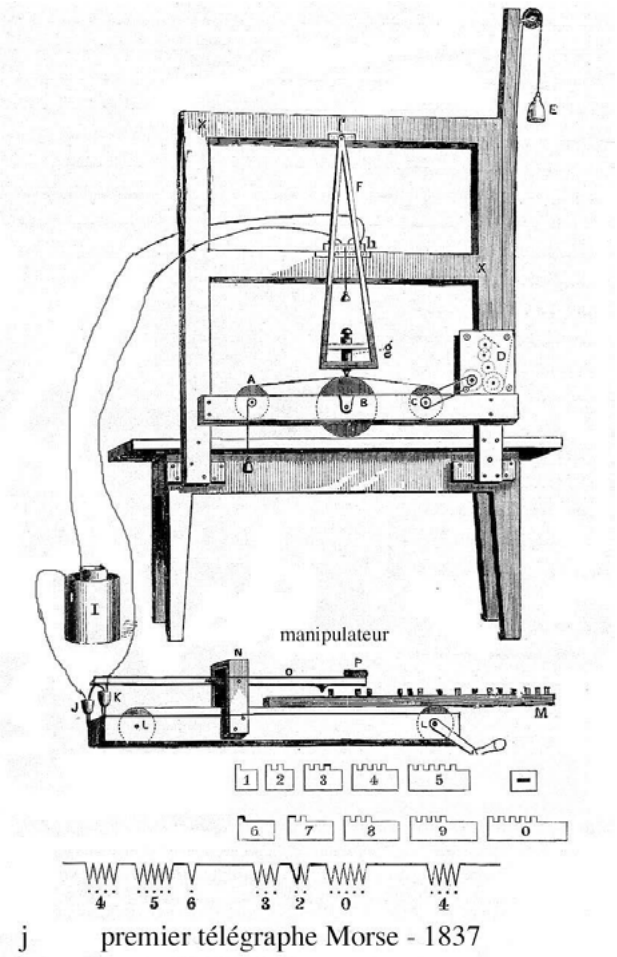
En août 1837, un journal américain publiait une traduction du *Neue Würzburger Zeitung* du 30 juin, relatant les expériences de télégraphie faites par Gauss et Steinheil. Le lendemain Samuel F. B. Morse et son frère, éditeur de journal y reprochait : « *ceux qui copient ces articles des journaux européens ignorent que le télégraphe électrique, cette merveille de notre temps, qui excite en Europe*

l'attention du public scientifique est une découverte américaine. Le professeur Morse l'a inventé, il y a cinq ans, lors de son retour de France en Amérique sur le paquebot Sully ».

Morse, peintre et professeur de dessin, revenant de France en 1832, rencontra sur le Sully le géologue Charles Jackson de Boston qui avait suivi à la Sorbonne des conférences de Mathias Pouillet sur les électro-aimants. Il avait aussi acheté chez Pixii un petit électro-aimant et une pile et exposa longuement ces nouveautés à Morse. Leurs discussions pendant les cinq semaines de traversée portaient souvent sur la possibilité de transmettre ainsi des signaux électriques. À l'arrivée, Morse reprit sa profession de peintre ; il essaya en 1835 de fabriquer l'appareil discuté avec Jackson, mais sans succès, ses connaissances en électricité étant trop sommaires.

En 1837, apprenant les découvertes faites en Europe, il reprend ses travaux avec l'aide de son voisin, le professeur Léonard Gale, qui lui apprend à mieux fabriquer un électro-aimant. Finalement, c'est un jeune mécanicien intéressé par le procédé, Alfred Vail qui lui construisit dans l'usine de son père, *Speedwell Ironworks*, un appareil qui fut capable de transmettre une phrase : *Successful expériment with télégraph September 4, 1837* (j).

L'interrupteur envoyant des impulsions de courant était une planche de bois M coulissant à la main ; elle portait une série d'ergots en saillie qui soulevaient au passage un levier P, lequel établissait et coupait à son extrémité le contact de la pile avec l'électro par deux coupelles de mercure J et K. L'appareil récepteur consistait en un électro-aimant portant un crayon sur son armature mobile suspendue à un pendule. Au repos, sans courant, le crayon inscrivait une ligne continue sur un ruban de papier entraîné par un mécanisme d'horlogerie. Une impulsion de courant sur l'électro faisait inscrire par le crayon une sorte de dent-de-scie. Les signaux représentaient les 10 chiffres ; chaque groupe de chiffres se traduisait par des mots à trouver dans un vocabulaire créé à cet effet.



j premier télégraphe Morse - 1837

Le 4 septembre, l'appareil arriva à transmettre les cinq mots et deux chiffres du message cité avec 62 lignes en dents-de-scie et 15 lignes droites représentant des nombres à interpréter par le vocabulaire.

Ce système répondait au problème, mais d'une façon encore plus artisanale que les précédents. Ses deux caractéristiques essentielles étaient l'utilisation d'un électro-aimant et l'enregistrement des messages sur papier.

La première était plutôt un handicap, ce qu'ignorait Morse, peu averti des techniques électriques. Si ses prédécesseurs avaient adopté de préférence la déviation d'une aiguille dans un bobinage, c'est qu'ils estimaient que l'électro-aimant, nécessitant de l'énergie, ne pourrait pas être commandé de très loin, ce qui se confirma. La seconde était un avantage pratique certain, mais nécessitant un codage, qui s'avérait très compliqué sur ce prototype. Beaucoup de progrès restaient à faire avant un essai réel de transmission à distance.

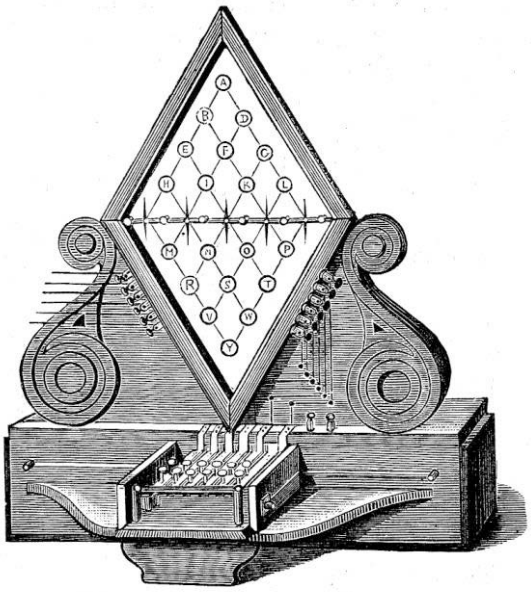
Développement des systèmes télégraphiques

Après 1837 plusieurs systèmes vont coexister en s'améliorant progressivement, pour équiper des premières liaisons expérimentales : systèmes à aiguilles - à cadran - enregistreurs.

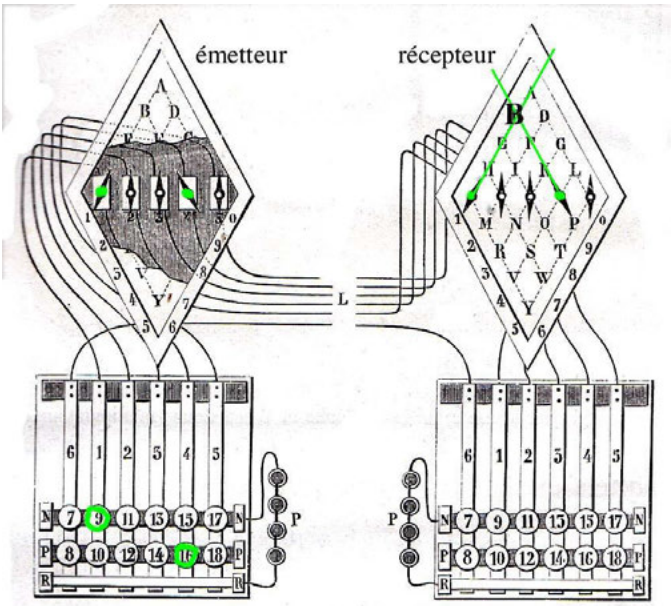
Systèmes à aiguilles et à cadrans de Cooke et Wheatstone

William Cooke, à peine rentré à Londres, en avril 1836, après son séjour à Heidelberg, mais avec un télégraphe à trois aiguilles dans ses bagages, rêve de le diffuser. Il réalise un appareil à électro-aimant et le propose sans succès aux directeurs du chemin de fer pour résoudre leur problème de signalisation des trains.

Après avoir consulté Faraday et Roget, il rencontre Charles Wheatstone, professeur de physique au *King's Collège* et s'associe en mai 1837 avec ce dernier pour développer le télégraphe électrique en Angleterre. Cette association fut bénéfique, Wheatstone était un scientifique, intéressé par les applications pratiques. Bien qu'à l'époque les notions d'énergie et la loi de circulation des courant n'étaient encore qu'intuitives, il estimait que l'électro-aimant qu'on bobinait avec du gros fil, pensant lui donner ainsi plus de puissance, nécessiterait un courant trop élevé pour fonctionner à grande distance.



k Cooke and Wheatstone's Five-Needle Telegraph.



l Télégraphe à cinq aiguilles de Wheatstone.

Aussi Cooke réalisa une version améliorée, à quatre aiguilles, du télégraphe ramené d'Heidelberg et l'essaye entre deux stations du *London and Birmingham Railway*, distantes de 1,25 mille. Le 12 décembre les associés envoient au Patent Office la description d'un appareil à cinq aiguilles, perfectionnement du précédent.

L'appareil Cooke et Wheatstone (k-l) avait un codage relativement simple grâce à la forme de son cadran en losange. Les aiguilles, verticales au repos, tournent à droite ou à gauche suivant que l'on appuie sur une touche de la ligne N ou la ligne P. L'exemple d'envoi de la lettre B, tracé en vert, consiste à appuyer sur les 2 touches 9 et 16 de l'émetteur ; sur le récepteur on lit la lettre B, à l'intersection des directions des aiguilles 1 et 4.

Il fallait 6 fils, alors un **système à 2 aiguilles** fut ensuite développé (m) ;

m Télégraphe Cooke et Wheatstone -1840

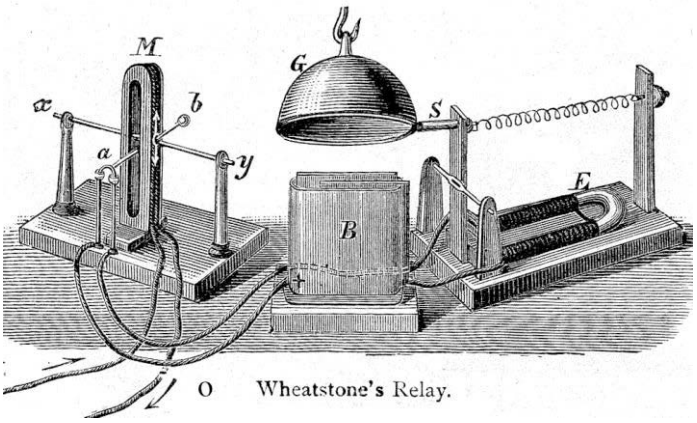
chacune des deux manettes pivotant à droite ou à gauche faisait tourner l'aiguille correspondante d'un côté ou de l'autre avec un codage plus complexe (n) nécessitant une à trois impulsion de levier par lettre transmise. Ce système s'est généralisé bien qu'un appareil à une seule aiguille a été aussi proposé, mais peu utilisé.

Aiguille gauche		*Les deux aiguilles ensemble*		*Aiguille droite*	
+	\	R ou 8	\ \	\	H ou 4
A	\\	S	\\ \\	\\	I
B	\\\	T	\\\ \\\	\\\	K
C ou 1	↘	U ou 9	↘ ↘	↘	L ou 5
D ou 2	✓	V ou 0	✓ ✓	✓	M ou 6
E ou 3	/	W	/ /	/	N ou 7
F	//	X	// //	//	O
G	///	Y	/// ///	///	P
		Z	/ \		
		Q	\ /		

n Vocabulaire du télégraphe à deux aiguilles.

Le premiers essais à Birmingham furent satisfaisants, sauf sur un point apparemment de détail, mais dont la résolution fit faire un Wheatstone une petite découverte d'un grand intérêt.

Depuis les deux extrémités de la liaison télégraphique, Il fallait avertir un correspondant à l'autre bout de la ligne de se tenir prêt à recevoir un message. Wheatstone avait prévu d'envoyer un signal qui actionnait un électro-aimant dont la palette mobile venait frapper une cloche, mais cela marchait mal, la longueur de la ligne affaiblissait l'intensité du courant qui n'avait pas l'énergie pour actionner la palette.



o Wheatstone's Relay.

Il imagina alors un intermédiaire, un ***relais,*** capable de relayer le signal insuffisant par un autre plus fort. (o) Le signal affaibli parvenait au bobinage très sensible d'un multiplicateur semblable à ceux qui faisaient pivoter les aiguilles ; une petite palette en fer déviait et établissait un contact en trempant son extrémité dans une coupelle de mercure. Ce contact envoyait alors le courant plus puissant d'une pile locale à l'électro de la cloche.

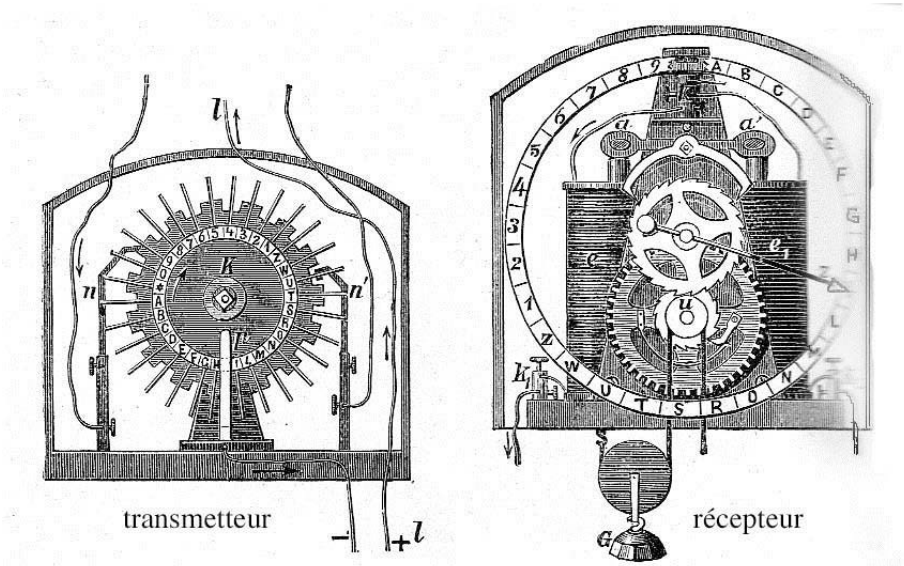
Il breveta ce relais en 1837, car il entrevoyait son importance pour la manœuvre des électro-aimants à distance. Intuitivement il remplaça le bobinage par un électroaimant avec un grand nombre de tours de fils fins, le rendant sensible à de faibles impulsions, sans comprendre exactement pourquoi. En effet, dans ces années 1840 les lois de l'électrocinétique étaient encore à peine connues.

Nous savons l'importance qu'à pris le relais jusqu'à nos jours dans tous les automatismes. Pour le télégraphe, au delà de l'application marginale qu'en fit son inventeur Wheatstone, il fut pour le système Morse l'auxiliaire indispensable sans lequel sa portée n'aurait guère dépassé le kilomètre.

Le système anglais trouva rapidement des clients dans les compagnies de chemin de fer. L'Angleterre était à la pointe du développement de ce nouveau moyen de locomotion qui posait un important problème de sécurité, la signalisation de la présence d'un convoi en sens inverse sur les voies uniques, les plus nombreuses, ou d'un train arrêté, en panne. La communication de gare en gare des départs ou arrivées n'était pas possible sans le télégraphe. D'ou l'établissement des lignes sur poteaux le long des voies, procédé qui fut longtemps utilisé. L'histoire des chemins de fer au XIX^{E} est émaillée de nombreux accidents mortels, résultant de collisions par défaut de signalisation.

Système à cadran

Le système à aiguilles nécessitait un personnel spécialisé pour éviter les erreurs d'observation du mouvement des aiguilles et la nécessité de les traduire avec un code. Les chemins de fer souhaitaient un système plus pratique et simple, exploitable avec sûreté par tout employé. Wheatstone imagina alors en 1839 le système à cadran ou à index (*pointer*). (p)



p Télégraphe Wheatstone à cadran - 1839

Dans ce premier modèle, l'émetteur était constitué d'un cadran rotatif K, tourné à la main, qui pouvait prendre l'une des 35 positions correspondant chacune à une lettre ou un chiffre, lorsque ce signe gravé sur le cadran était masqué derrière l'index vertical p. Au cours de la rotation, à chaque passage d'un signe derrière l'index, un contact était alternativement établi ou coupé par les ressorts de contact n et n'. Le signal électrique était transmis par la ligne aux électroaimants du récepteur, qui par l'intermédiaire d'un système d'horlogerie à poids, faisaient tourner d'un cran une aiguille indiquant le chiffre ou la lettre voisine.

q Manipulateur-récepteur à cadran - 1858

Avant chaque envoi d'une lettre de l'alphabet, il fallait remettre au point de départ le cadran de l'émetteur comme l'aiguille du récepteur. Le système n'était pas très rapide, mais simple d'utilisation ; il fonctionna longtemps dans les *Railway* (q).

C'est ainsi que Cooke et Wheatstone installèrent en 1838-1839 les premiers télégraphes opérationnels en Angleterre, pour la *Great Western Railway*, sur 20 km entre Londres et West-Drayton. Puis ce fut Blackwall en 1840, Édimbourg et Glasgow en 1841.

L'Angleterre fut ainsi le premier pays à bénéficier du télégraphe électrique pour ses chemins de fer.

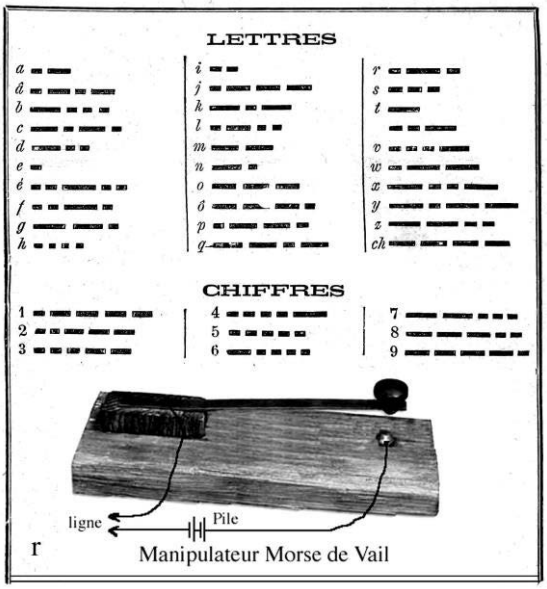
Système enregistreur Morse, aux États-Unis

Le prototype amélioré par Vail en 1837 fut présenté à différentes personnes, en particulier une commission du Congrès, car Morse espérait obtenir une subvention fédérale pour réaliser une ligne expérimentale.

Pour augmenter ses chances, il proposa au président de la commission, Francis Smith, de l'associer personnellement à son équipe avec 5/16 des futurs profits. Elle comprenait Alfred Vail, mécanicien, qui devait assurer l'ensemble de la conception et la fabrication, peu du domaine du peintre Morse, et ne devait plus n'en recevoir que 3/16, son frère George, de même le professeur Gale, conseiller électricien, ami du physicien Joseph Henry.

Manipulateur, code Morse et enregistreur

Vail reprit toute la conception, le récepteur-enregistreur dont le crayon s'usait vite fut remplacé par une pointe, un style arrondi, creusant dans le papier une empreinte en relief, sorte de gaufrage. Cela nécessitait de renforcer la force de l'électro-aimant et accrut un problème latent, mais pas encore bien perçu par Morse, augmenter la force de l'électro-aimant.



r
Manipulateur Morse de Vail

Le système compliqué d'envoi des impulsions électriques fut remplacé par un contact trempant dans le mercure, puis par un simple contact métallique établi par un levier. Ainsi Vail conçut ce *manipulateur Morse*, qui deviendra célèbre par sa simplicité et son ergonomie.

S'imposait alors la nécessité de coder les impulsions de courant envoyées par le manipulateur. Morse s'obstinait à établir un code basé sur des chiffres, le nombre d'impulsions correspondant à un chiffre de 1 à 9 ; un ensemble de 3 à 5 chiffres représentait un mot, puis on devrait aller chercher la traduction des chiffres en mot dans un dictionnaire de 5000 mots usuels.

Par contre, Vail proposait à Morse un code *binaire double*, basé sur des impulsions de courant courtes ou longues et des absences de courant courtes ou longues. Elles se traduisaient simplement sur le papier par des points, traits, espaces brefs, espaces longs. Ce fut vraiment un coup de génie. (r) (2).

Cet alphabet Morse inventé par Vail, progressivement amélioré, se révélera universel, facile à mémoriser à la lecture comme au son, les fameux *ti - ta - ta -ti* des *transmetteurs* de la future TSF. Il s'est bien adapté à d'autres systèmes de transmission, tel le projecteur optique dans la marine. Surtout, quand la télégraphie, perdant son fil, devient la T.S.F., le morse ne nécessitant qu'une qualité de liaison très sommaire, l'information se propageait dans le monde entier avec un appareillage plus rudimentaire que pour la phonie.

Ces progrès du système Morse n'intéressèrent ni les entreprises privées ni la Fédération des États-Unis qui refusa la subvention que Morse attendait.

Intermède

Pendant les six années qui suivirent, Vail reprit ses activités à la *Speedwell Iron works,* Morse retourna à sa peinture, après avoir traversé à nouveau l'Atlantique en 1839 pour vendre son télégraphe en Europe. En France Arago fut intéressé sur le plan technique, mais le système Chappe suffisait à l'administration centrale dirigée par Foy. L'accueil fut froid en Angleterre où le système Wheatstone commençait son développement, mais Morse y découvrit l'accessoire essentiel, le relais, sans lequel son récepteur n'aurait jamais transmis au-delà de quelques de km. (s) (3)

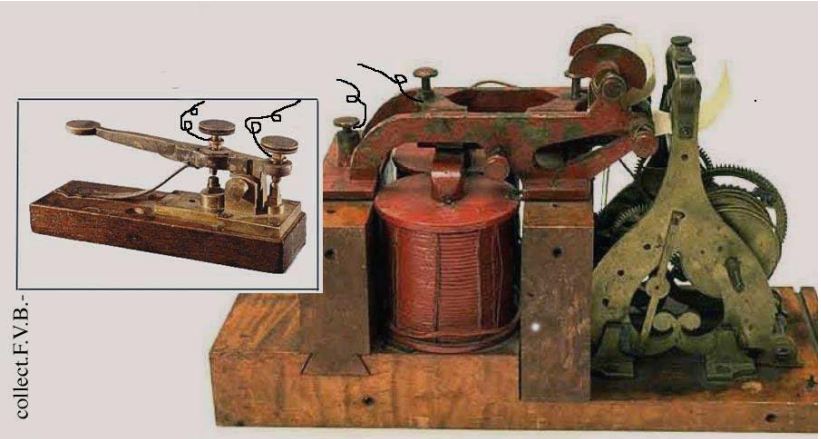
s Relais télégraphique - 1860

Lorsqu'en 1840 il breveta son appareil en Amérique, il y introduisit une copie du relais de Wheatstone, et de surcroît oublia d'y mentionner le nom d'Alfred Vail, le réalisateur.

Liaison Washington - Baltimore

Enfin, en mars 1843, sur les recommandations d'un ami de Morse, Elsworth, chef du Patent Office, le Congrès accorde enfin une subvention de 30 000 $ pour l'établissement d'une ligne télégraphique de 64 km entre Washington et Baltimore. Aussitôt Morse demande à Vail de prendre en charge toute la conception, mise au point et fabrication des appareils. Début 1844, tout est prêt et la pose de la ligne débute le 1er avril. Morse reçoit les informations que lui transmet Vial depuis les

sections d'avancement de la ligne ; il dispose à cet effet d'un récepteur au Capitole à Washington. Le 24 mai, la ligne arrive à Baltimore et Vial transmet le message inaugural convenu, extrait de la Bible : *What Hath God Wrought.*

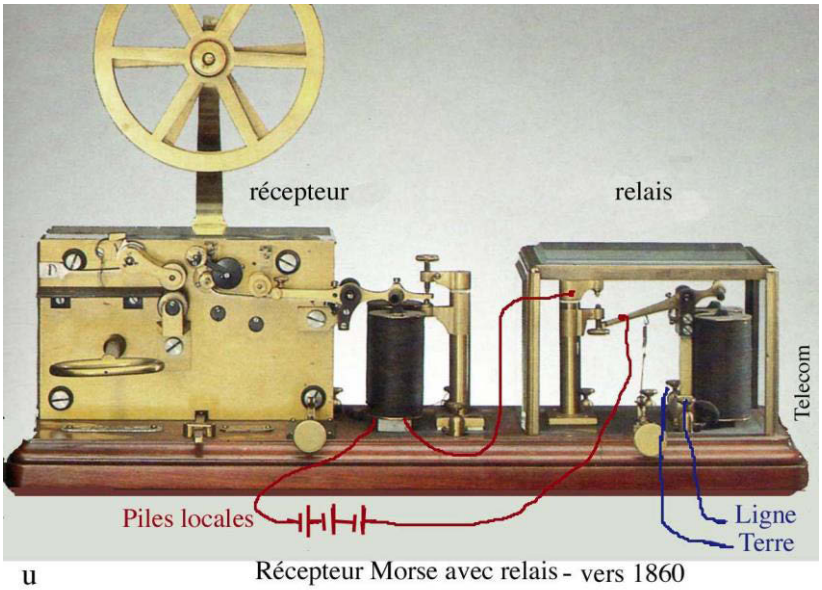


t Key and Embosser of Baltimore - 1844

Le récepteur, amélioré par Vial en 1844, a été conservé à l'université de Cornell. Avec quelques années de retard sur Wheatstone, Morse arrivait enfin à un appareil opérationnel (t).

Cet, *embosser*, imprimait sur papier une sorte de gaufrage en relief pour les points et les traits, nécessitant un électro-aimant assez puissant pour faire cette gravure.

On remarque que le fil du bobinage est d'un diamètre appréciable, nécessitant un courant d'intensité élevée que la ligne nécessairement longue ne pouvait transmettre. Celle-ci alimentait seulement un relais sensible à faible énergie, lequel connectait l'électro-aimant du récepteur sur une pile locale suffisamment puissante. La photo (u) d'un récepteur Morse plus tardif de 1860 illustre le montage.



u Récepteur Morse avec relais - vers 1860

Pour cette première installation, il fallut diviser la ligne en plusieurs sections ; à la jonction des sections l'on disposait aussi un relais avec une source locale, une sorte de *répéteur*, qui résolut le problème de la limitation de longueur de ligne du système

Le télégraphe Morse, assez simple, facile d'utilisation grâce à son alphabet et son manipulateur, d'une rapidité satisfaisante et donnant un enregistrement automatique des messages sur une bande de papier, fut le système le plus exploité dans le monde pendant des années, après divers perfectionnements.

Développement aux Etats-Unis

Aux États-Unis, le succès fut rapide dans cette jeune nation qui souhaitait égaler l'Europe, mais avait un certain retard dans les domaines techniques et industriels, retard qu'elle rattrapa vite à la fin du siècle avec le télégraphe sa première grande aventure industrielle dans le domaine électrique.

Un homme de la poste, Kendall prit en main les intérêts de Morse pour constituer la *Magnetic telegraph Company*, suivi par des dizaines de concurrents. Mais comme dans les autres pays, le réseau télégraphique imposait une indispensable concentration technique et financière, soit sous la coupe de l'Etat, soit celle du capitalisme privé. Après la guerre de sécession, en 1866, il ne resta que deux compagnies dont la dominante, la *Western Union*.

Devant la réussite de Morse, plusieurs contestations juridiques se sont élevées dans son pays, depuis celle du professeur Jackson qui lui avait expliqué sur le Sully en 1832 les possibilités de l'électro-aimant, ainsi que celle de Page, l'inventeur d'une bobine d'induction semblable à celle de Rhumkorff. Ils furent déboutés par l'arrêté de la Cour Suprême de 1854 qui reconnaissait à Morse la validité de son brevet de 1840, aux États-Unis.

Étrangement, Vail qui avait conçu et réalisé pratiquement tout le système : le premier prototype, le célèbre code, ainsi que le récepteur de la première liaison de Baltimore, ne réclama rien, sans doute trop préoccupé par des problèmes familiaux. Morse lui avait promis un quart des revenus, puis 3/16, qu'il n'a pas dû recevoir, étant mort dans la misère en 1859.

Morse fut comblé d'honneurs, en 1858, Napoléon III l'invite à Paris à un banquet d'honneur réunissant 10 pays européen qui lui remettent collectivement 400 000 F en remerciement de l'utilisation de son télégraphe qui n'avait été breveté qu'aux États-Unis. En 1871, c'est à Washington qu'au cours d'une cérémonie il envoie son dernier télégramme, devant 10 000 personnes.

En France, systèmes Bréguet, Morse, Hugues.

Déjà équipée avec le télégraphe optique Chappe, il fallait s'attendre à quelques résistances pour l'introduction du télégraphe électrique en France.

Une première ligne fut établie en 1842 par Wheatstone, avec son système à cadran, entre Paris, Saint Cloud et Versailles, le long du chemin de fer construit par une compagnie anglaise. Cette démonstration n'intéressa pas l'administration retranchée derrière son monopole d'état. Au contraire, Jules Guyot obtenait une subvention pour essayer un nouveau système permettant au Chappe de fonctionner la nuit.

En 1844, le gouvernement demande cependant à une commission comprenant des électriciens compétents, Arago, Becquerel et Pouillet d'étudier l'intérêt du télégraphe électrique.

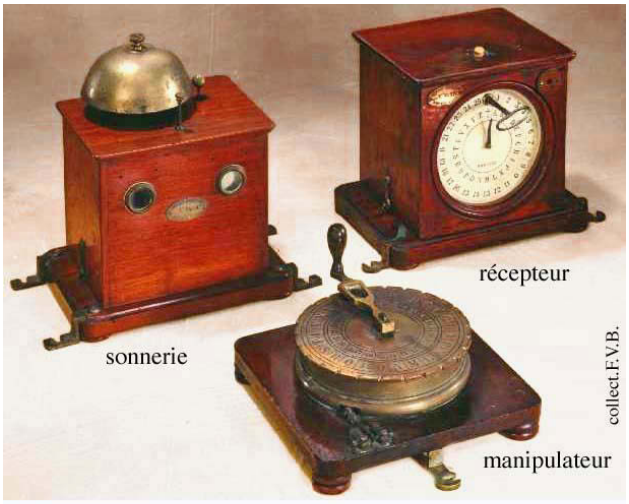
Malgré un enthousiasme mitigé, la décision est prise en novembre d'établir une ligne entre Paris et Rouen sous la direction de Bréguet et Gounelle, inspecteurs du télégraphe, avec un appareil à aiguilles semblable à ceux de Wheatstone.

Une ligne Paris – Lille est décidée en 1846, mais l'administration dirigée par Foy demande à Bréguet d'étudier un appareil hybride à deux aiguilles transmettant les signaux du télégraphe Chappe, pour éviter de changer les habitudes des télégraphistes. Ce système Foy-Bréguet ne fut qu'une transition.

Le télégraphe Bréguet à cadran, dérivé de celui de Wheatstone et amélioré par cet horloger réputé, marqua le démarrage du télégraphe électrique en France (v). Au poste émetteur l'employé tournait une aiguille devant un cadran jusqu'à la faire coïncider avec la lettre à transmettre. Deux fils de liaison étaient nécessaires, plus le retour par la terre. À l'arrivée le récepteur possédait le même cadran et une aiguille venait indiquer par sauts successifs la lettre reçue.

L'expansion du télégraphe électrique fut favorisée par une loi de 1851 organisant la *correspondance télégraphique privée*, sous l'impulsion de Louis Napoléon Bonaparte, président de la deuxième République.

Les types de télégraphes utilisés en France, d'abord Bréguet à cadran, seront ensuite en majorité du système Morse, plus rapides et surtout enregistreurs, conservant une trace du message.

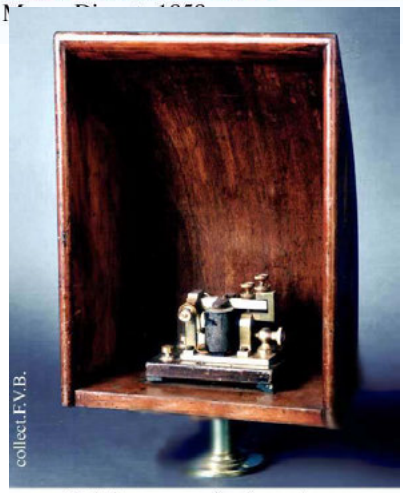


v Poste émission réception à cadran Bréguet - 1860

Le système Morse n'était pas breveté en dehors des Etats-Unis ; ailleurs, chaque constructeur perfectionnait sa fabrication. Un ingénieur autrichien, Thomas John apporta un perfectionnement notable en remplaçant l'impression en relief du papier par un système encreur fiable, de précédents essais n'ayant pas donné satisfaction. Un avantage indirect fut la possibilité de réduire l'énergie de l'électro-aimant, principal handicap du système ; il devenait alors souvent possible de supprimer le relais. Le procédé fut breveté en France, où Digney, constructeur d'appareils électriques obtint la licence de fabrication. (w)

w Poste M

Aux États-Unis, où le système Morse avait pratiquement le monopole, les opérateurs expérimentés étaient capables d'enregistrer un message simplement par l'écoute du claquement de l'électroaimant du relais à la réception de chaque point ou trait. De là, apparut à la fin du siècle, la possibilité de supprimer le récepteur imprimeur, lorsque l'enregistrement le message n'était pas nécessaire et de le remplacer par un "*sounder",* relais particulier produisant à la fermeture et l'ouverture un *clic* et un *clac* bien audible. Pour permettre au télégraphiste de travailler dans un local bruyant, ce relais sonore ou *parleur* était placé dans un résonateur (x).



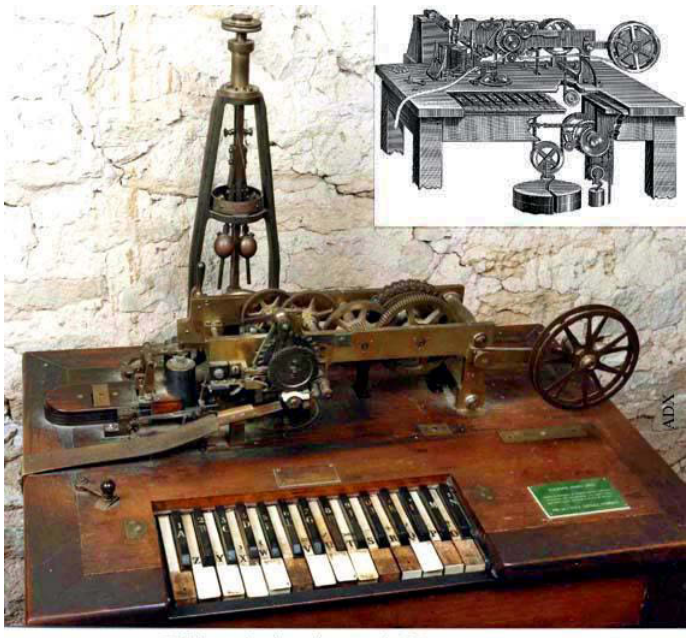
x Relais sonore à résonateur

Malgré cela la rapidité du système Morse restait limitée à une dizaine de mots par minute, au mieux, et la traduction du code nécessitait d'être initié.

Déjà en 1841, Wheatstone avait breveté un système qui permettait d'imprimer directement des lettres sur une bande de papier, plus d'une dizaine d'inventeurs avaient poursuivi l'idée avec un succès variable.

David Hughes mit au point en 1854 un appareil apportant la réponse attendue aux problèmes qui se révélaient après les dix premières années du télégraphe. Cet Américain du Kentucky, professeur de piano d'origine anglaise, ne pouvait pas exploiter son invention dans son pays, bloqué par le brevet de Morse. Il vint en France pour le faire fabriquer chez un constructeur d'appareils électriques réputé, Froment -Dumoulin.

Le cœur de l'appareil était un mécanisme très original et complexe, mis en mouvement permanent par un lourd contrepoids. L'opérateur disposait d'un clavier genre piano à 28 touches portant l'indication du signe, chiffre ou lettre, à transmettre.



y Télégraphe imprimeur de Hugues

À chaque extrémité de la ligne, il n'y avait qu'un seul appareil identique puisqu'il faisait fonction à la fois de transmetteur et de récepteur. Avant la mise en service assez longue, les deux opérateurs

devaient procéder à des réglages pour synchroniser exactement leurs deux appareils, cette contrainte imposait du personnel spécialement formé. (y)

Par contre la manipulation était simple, un seul appui sur une touche transmettait une lettre alors qu'en Morse il fallait en moyenne trois signaux, d'où une vitesse de transmission presque triple de 50 à 60 mots par minute. De plus, la dépêche envoyée était imprimée en caractère d'imprimerie sur la bande de papier, simultanément au départ et à l'arrivée, d'où contrôle facile des erreurs. La bande d'un message était simplement collée sur un papier sans recopie et transmise sous cette forme au destinataire.

C'était le premier télégraphe imprimeur vraiment opérationnel, utilisé sur les lignes chargées en Europe, surtout en France, après son agrément en 1860 par l'Administration des Postes et Télégraphes.

Système Siemens en Allemagne et Russie

À cette époque l'Allemagne n'était encore qu'un ensemble de petits États ou Royaumes, unis par la langue et le passé, que l'un d'eux, la Prusse, cherchait à dominer. Un jeune sous-lieutenant de l'artillerie prussienne, Werner Siemens, s'intéressait aux techniques nouvelles, il se procure en 1842 des appareils Wheatstone et cherche à les améliorer.

En 1847, il réalise un télégraphe à cadran et index, assez proche de ceux qu'avaient développés Wheatstone et Bréguet. Il s'associe au mécanicien berlinois Georg Halske pour le construire, créant la société Siemens et Halske qui deviendra la première multinationale à vocation électrique, une entreprise familiale dont les filiales de Londres et St Petersbourg seront dirigées par des frères Siemens.

Une première réalisation lui est confiée en 1848 par l'armée, pour permettre au gouvernement prussien à Berlin de suivre les travaux du premier parlement fédéral, la Diète de Francfort à 500 Km. L'objectif était politique et militaire, car c'est à Francfort que seront jeté les bases de l'Allemagne unifiée moderne. La ligne était si possible enterrée pour la protéger des saboteurs potentiels. Par la suite, le réseau télégraphique se construira en même temps que l'unité allemande, mais sous la direction de la poste prussienne.

En 1851, à la première exposition internationale industrielle de Londres, au Crystal Palace, la démonstration du télégraphe Siemens est remarquée, il reçoit alors la Council Medal ; le frère Wilhelm Siemens s'installe en Angleterre, il s'appellera alors William, puis épouse une écossaise.

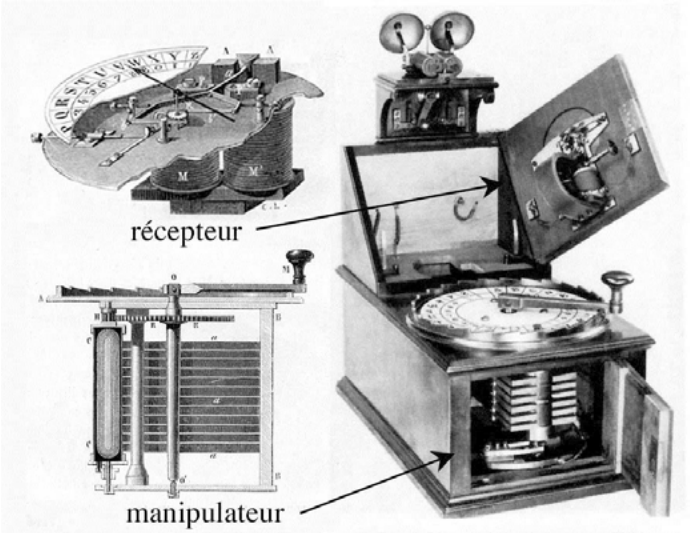
En 1852, Werner se rend en Russie et obtient du tsar la commande de la ligne stratégique St Petersbourg - Kronstadt que Schilling devait déjà réaliser en 1836. La traversée la Baltique nécessitera la mise au point de câbles immergés ; il inventa à cet effet une presse à gutta-percha pour les isoler ; c'était un nouveau matériau isolant et souple, un latex importé de Malaisie, indestructible en eau de mer - alors que le latex naturel de caoutchouc se dégradait rapidement, tant que la vulcanisation ne fut pas encore découverte par Goodyear. Son frère Carl dirigea la construction puis s'installa définitivement en Russie où il trouva une épouse. En quelques années des centaines d'appareils seront livrés et 5000 Km de lignes construites.

Siemens et son associé Halske firent avancer sensiblement la technique et les performances des appareils télégraphiques avec des variantes du système Morse.

Tout d'abord, dans le domaine du relais, composant important pour les lignes longues. En effet, sur les lignes longues dépassant une centaine de km, le signal transmis s'atténuait en raison de l'isolation médiocre des isolateurs des poteaux. De plus s'y superposaient des parasites électriques dus aux orages proches. La solution fut l'installation de relais dont la bobine était activée par le signal électrique transmis en aval, point ou trait ; le contact du relais fermait et ouvrait un autre circuit dans lequel une pile locale envoyait dans la ligne en aval un nouveau signal *régénéré*, identique à celui reçu, mais sans parasites. Mais il fallait deux relais, un pour chaque sens de transmission du signal.

L'invention de Siemens fut de concevoir un **relais polarisé** qui pouvait fonctionner dans les deux sens de la ligne.

Par ailleurs, les chemins de fer bavarois souhaitaient un télégraphe autonome fonctionnant sans pile. Il reprit l'idée de Steinheil d'intégrer dans son appareil une petite machine magnéto-électrique genre Pixii, dont une courte rotation à la main générait un courant comparable à celui d'une pile. Mais il alla beaucoup plus loin et repensa complètement la construction magnétique de sa machine pour lui donner une meilleure efficacité. Le résultat dépassait l'objectif initial et Siemens réalisa par surcroît la meilleure dynamo à courant continu de l'époque (1856) en redressant, avec un commutateur à bague, le courant naturellement alternatif du modèle utilisé dans le télégraphe. (II-3)



z Télégraphe autonome à cadran Siemens -1856

Sur la photo (z) figure à gauche le détail du manipulateur et celui du récepteur, à droite l'appareil complet avec au-dessus la sonnerie d'appel.

La rotation de la manivelle du manipulateur d'un cran sur la roue à rochet à 26 crans, fait tourner le cylindre portant l'enroulement induit de juste un demi-tour. L'inducteur est une série d'aimants permanents. Cette courte impulsion de courant, de sens inverse à chaque demi-tour, est envoyée sur les électros du récepteur, lesquels par un système de fourchette font tourner l'aiguille d'une lettre.

Télégraphie sous-marine

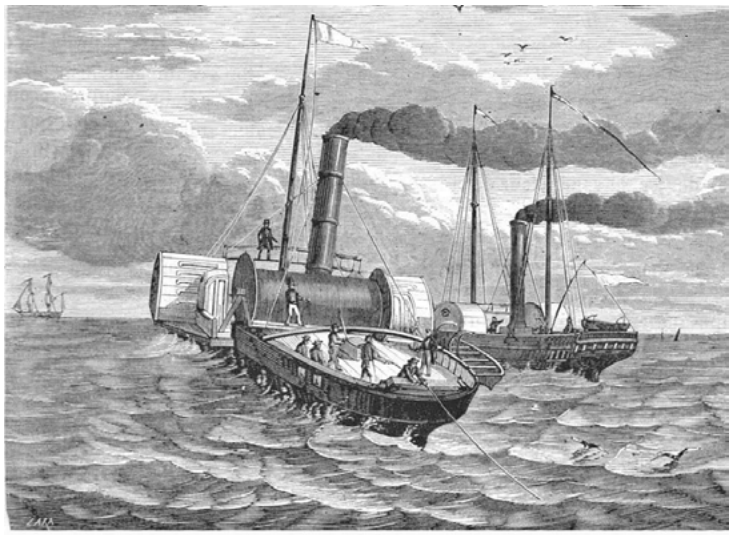
Sur terre, transmettre l'information plus vite qu'avec un cheval au galop ne nécessitait plus que de minces fils de bronze, suspendus à des poteaux en bois.

Mais pour traverser l'Atlantique en moins des quatre ou cinq semaines nécessaires aux navires, il fallait immerger les fils au fond de l'eau, fabriquer des câbles bien isolés et résistants. L'immersion de ces longs et lourds câbles aux grandes profondeurs allait nécessiter des navires spéciaux. Quant aux signaux électriques de quelques volts envoyés ainsi à des centaines et milliers de Km, arriveraient-ils au bout sans perturbation, sans relais? Depuis le premier essai de Schilling à travers la Néva, plusieurs expérimentateurs avaient immergés des câbles télégraphiques isolés sur de courtes distances, validant la faisabilité du procédé.

Le câble sous la Manche -1851

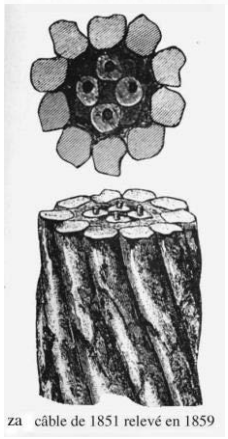
La première traversée remarquable d'une mer fut celle du Channel, entre Angleterre et France, proposée par Wheatstone en 1840 et réalisée en 1850 par Jacob Brett. Le câble, un fil de cuivre gainé avec 6 mm de gutta-percha, était enfilé dans un tube de plomb aux deux extrémités d'*atterrissement.* Le 28 août, le vapeur anglais Goliath, à roues à aubes, quittait la côte près de Douvres en laissant filer le câble de 40 km enroulé sur une large bobine fixée sur le pont (z2). A 8 h du soir il était tiré à la station française du Cap Gris-Nez et le premier message en partait, accueilli par la joie de la foule sur le quai de Douvres ; mais au bout de quelques heures, la communication était coupée, on détecta la rupture sur les côtes françaises.

Un pécheur de Boulogne montrait un morceau d'une algue étrange avec de l'or au milieu, le cuivre du câble qu'il avait relevé avec son ancre près de la côte.



z2 Pose du cable Douvres-Calais le 28 aout 1850

La solution évidente était qu'il fallait assurer la résistance mécanique du câble par une solide gaine en torons d'acier ainsi que l'enterrer au fond près des cotes. Une autre société anglaise fut constituée pour reprendre le projet avec un câble amélioré, quatre conducteurs de cuivre isolé à la gutta- percha, serrés par des torons de chanvre imprégné de suif, le tout cerclé de fils d'acier donnant un diamètre final de 32 mm. (za). Les 40 km de câble furent enroulés dans les cales du vapeur Blazer suivant une méthode qui fut généralisée pour les immersions suivantes. La pose se terminait le 31 décembre 1851 avec les premiers échanges de messages officiels. Le câble transmis ensuite depuis Calais une décharge de bobine de Rhumkorff, qui amorça la poudre d'un canon à Douvres. Peut-être l'annonce symbolique de la paix que peuvent aussi apporter la science et la technique comme le suggère ce cartoon de *Punch* (zb).



za câble de 1851 relevé en 1859

Le succès fut un encouragement pour d'autres immersions de câbles, en particulier l'Angleterre comprit tout l'intérêt de cet exceptionnel moyen de communication pour rompre son isolement d'île. Elle se relia à l'Irlande en 1852, à la Belgique en 1853. Puis la guerre de Crimée nécessita la pose d'un câble de 800 km dans la Mer Noire. De même plusieurs câbles en Méditerranée. Il y eut des déboires, sources de progrès, mais cela n'arrêtait pas le développement du télégraphe sous-marin qui nécessitait pourtant d'importants capitaux.

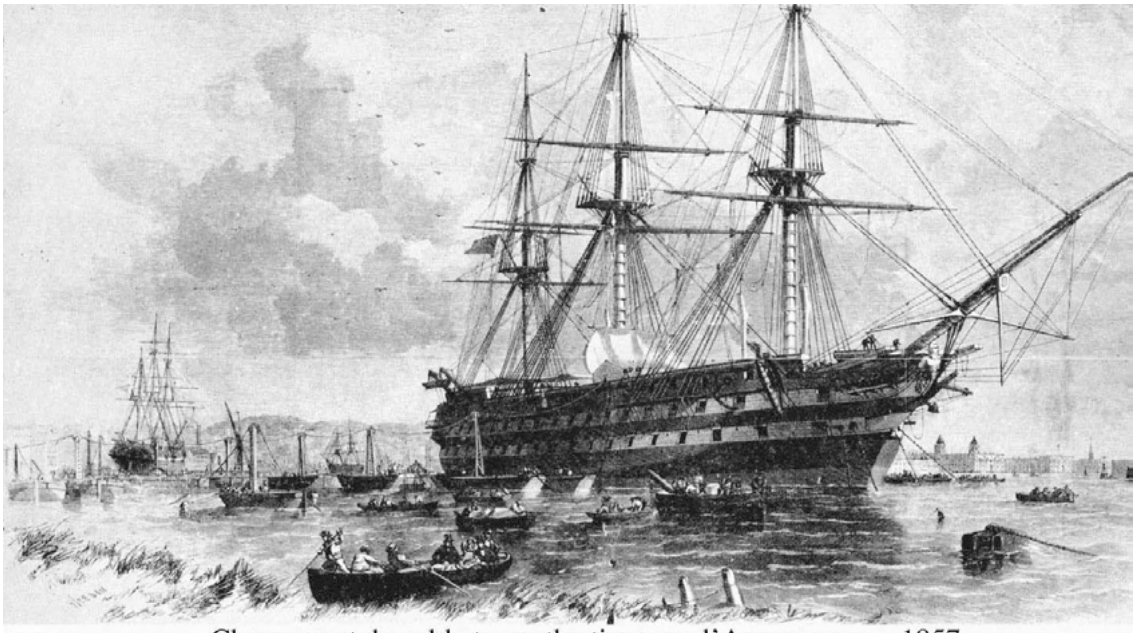
Le câble transatlantique de 1858

Un riche Américain, Cyrus Field, décida en 1854 de réaliser ce rêve anglo-américain. Le parcours le plus court, 3100 km se situait entre Valentia en Irlande et St Jean à Terre-Neuve. Il fonda la *Compagnie transatlantique*, après avoir consulté les meilleurs spécialistes et fait établir une cartographie des fonds par des navires équipés de sondeurs profonds. Le maximum de profondeur était à 3700 m. Pour réunir les capitaux, il rencontra plus d'enthousiasme dans le public et le gouvernement anglais qu'en Amérique.

EFFECT OF THE SUBMARINE TELEGRAPH; OR, PEACE AND GOOD-WILL BETWEEN ENGLAND AND FRANCE.

z b

La structure du câble fut longuement étudiée et essayée, puis il fallut concevoir les machines pour le fabriquer en Angleterre à partir de février 1857.

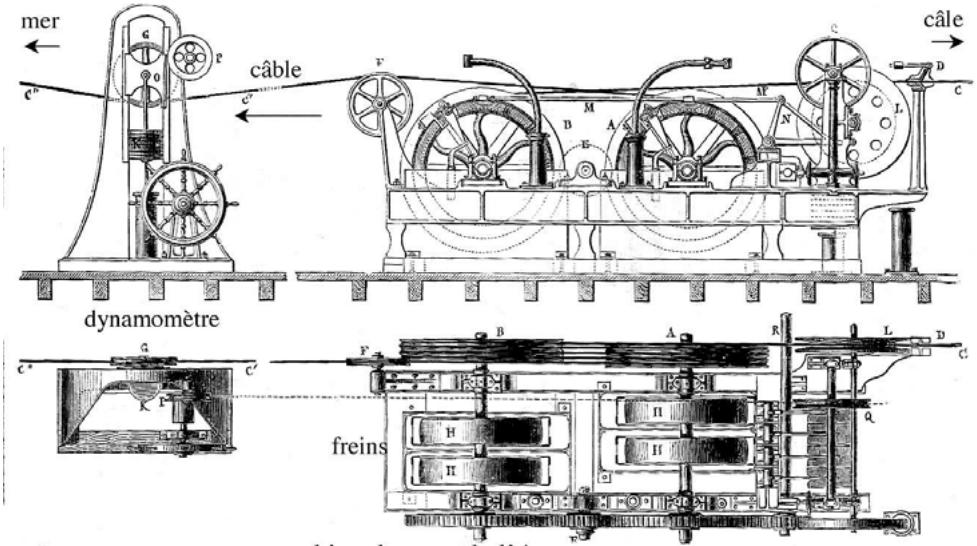


zc Chargement du cable transatlantique sur l'Agamemnon - 1857

Le câble de 4000 km fut réalisé en deux tronçons, aucun navire n'étant capable de le contenir en entier. Il pesait 634 kg au km, dont 475 kg d'armature pour 26 kg de cuivre.

Sa résistance mécanique à la traction était de plus de 4 tonnes. Le câble fut chargé pour moitié sur le *Niagara*, le plus grand bateau des États-Unis et l'autre moitié sur la frégate anglaise, l'*Agamemnon.* (zc). Trois autres navires participèrent à l'opération de déroulement prévu l'été, période des calmes en Atlantique. Le *Niagara* commença la pose depuis l'Irlande le 7 août 1857. Après une première rupture accidentelle sur le navire, 450 km de câble avaient été immergés ; la mer était forte lorsqu'un courant sous-marin insoupçonné le fit brusquement dévier et une manœuvre trop brutale du frein de dévidement provoqua la rupture.

Il fallut tout recommencer l'année suivante, avec diverses modifications et une autre méthode, en posant le câble à partir du milieu de l'Atlantique. Les deux navires s'y retrouvèrent avec difficulté le 26 juin 1858, après seize jours de tempête, pour souder les deux extrémités du câble que portait chacun et commencer la pose l'un vers Terre-Neuve, l'autre l'Irlande. En quelques jours trois ruptures survinrent entraînant la perte de 300 km de câble.



zd machine de pose de l'Agamemnon

II fallut rejoindre l'Irlande pour reprendre du câble prévu pour cette éventualité.

Le 29 juillet les deux navires recommençaient l'immersion et après nombre d'incidents heureusement résolus, l'Agamemnon touchait l'Irlande le 4 août et le Niagara Terre-Neuve le 5 août, mission accomplie ; la communication télégraphique entre les deux navires restait établie en permanence par le câble. (zd)

La nouvelle de la réussite se propagea aussitôt en Europe et en Amérique. Cet événement mondial allait rapprocher instantanément des millions d'hommes séparés par 4000 km d'océan. Partout ce fut l'explosion de joie du public et l'organisation de manifestations festives, sans compter celle plus discrète des politiques, amiraux, financiers et hommes d'affaires anglais dont cet outil allait complètement transformer les activités.

Comme il se devait, l'échange des premiers messages entre la Reine d'Angleterre et le Président des États-Unis, J. Buchanan eurent lieu le 18 aout.

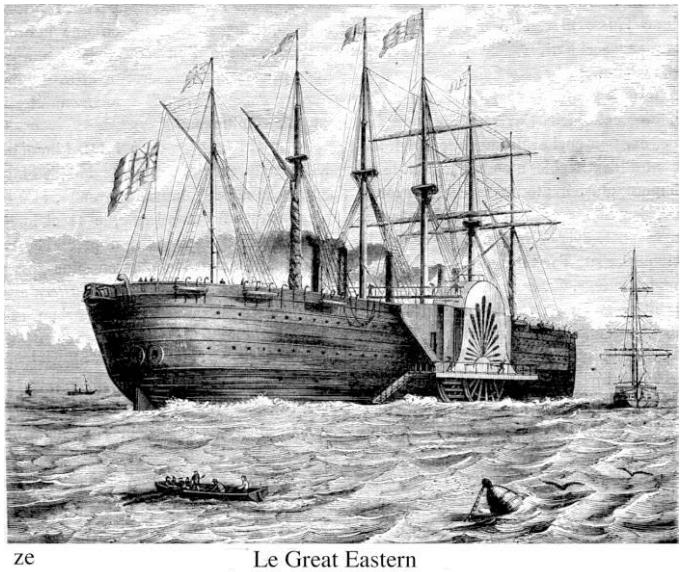
Pourtant un nouveau problème d'ordre électrique freinait un peu l'enthousiasme des spécialistes, le message de la Reine de 99 mots nécessita 67 minutes pour être transmis, c'était étrangement lent. Les 20 jours suivants 400 télégrammes furent transmis dans les deux sens, mais le 5 septembre le courant faible ne passait plus, le câble était hors service pour une cause difficile à détecter. Peut être un claquage à la suite de l'augmentation de la tension, afin de remédier à l'extrême lenteur de la transmission.

La consternation fut générale.

Le gouvernement anglais fit nommer une commission de 43 experts qui rendit son rapport en 1860. Les enseignements furent nombreux, tant pour les marins, les mécaniciens, les câbliers que les télégraphistes. Les Anglais étaient décidés à recommencer, mais la guerre de Sécession des États-Unis reportait le projet à plus tard.

Les câbles de 1865 et 1866

Avec l'expérience de l'échec, ajoutée à celle d'autres câbles plus courts posés les années suivantes en Méditerranée, un câble amélioré fut prêt en mai 1865, mais Il fallait un très gros navire moderne en acier, capable d'embarquer la totalité de ce câble. Un géant des mers, long de 209 m, lancé en 1858 pour transporter 3000 personnes, le *Great-Eastern,* était en attente d'utilisation sur la Tamise. Comme les navires de l'époque, il était mixte, à voile et vapeur, ce qui lui donnait une bonne mobilité pour les manœuvres difficiles ; huit machines totalisant 2600 ch assuraient la propulsion à la fois par des roues à aubes, et une hélice. On le transforma pour y installer trois grandes cuves contenant les 4000 km de câble nécessaires (ze).



ze Le Great Eastern

Il appareillait de Valentia en Irlande le 3 juillet 1865 vers Terre-Neuve, à six nœuds, restant en liaison télégraphique permanente avec la terre par le câble en cours de déroulement. Après 150 km un défaut d'isolement se produisait déjà, deux autres plus loin et le 2 août au bout de 2200 km il y eut rupture, le câble gisait par 3600 m de fond. Après plusieurs jours de manœuvres, les grappins ne purent le récupérer. Ce fut le retour en Irlande après avoir largué une bouée à l'endroit de la rupture.

Le 13 juillet 1866, le Great-Eastern quittait à nouveau Valentia avec un câble modifié. Avec beaucoup de chance cette fois il atteignait la baie de *Hearts-content* le 27 juillet.

La nouvelle parvint aussitôt en Europe par le câble télégraphique. Mais le programme prévoyait en plus le relèvement du câble de 1865 au milieu de l'Atlantique, avec l'aide de deux autres navires. L'opération ne réussit qu'au quinzième essai, l'ancien câble s'avéra correct en isolement, une nouvelle longueur fut soudée et le 8 septembre le déroulement réussi jusqu'à Terre-Neuve s'achevait. (zf)

C'était un exploit extraordinaire, autant sur les plans technique et industriel que maritime. L'épopée en a été racontée par nombres d'auteurs ; le vulgarisateur scientifique, Louis Figuier y consacre une centaine de pages dans ses *Merveilles de la Science*

Deux câbles reliaient maintenant l'Europe et l'Amérique - vingt ans plus tard, il y en avait dix.

« L'année 1866 s'appellera dans l'histoire, l'année du câble transatlantique. La réussite de cette grande entreprise affirme de nouveau la souveraineté de la science, et fait honneur aux deux nations qui ont eu assez de foi et d'espérance pour la mener à bonne fin. Il est inutile d'insister sur toutes les conséquences qui résultent de cette victoire du génie humain sur les éléments. En supprimant l'Océan pour la pensée, on fait avancer d'un pas immense la cause du progrès et de la civilisation.

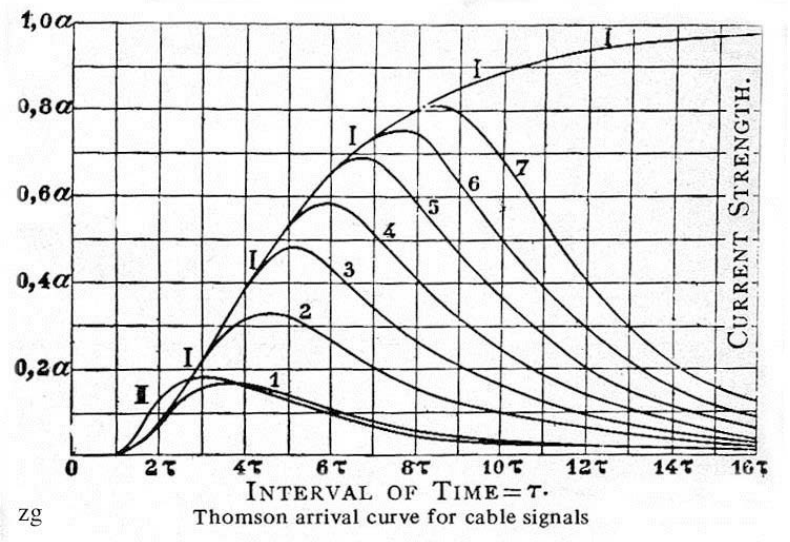
Henri de Parville - Causeries scientifiques – 1867 » (4)

La technique télégraphique très délicate

Dès les premiers messages transmis entre l'extrémité du câble en cours de déroulement depuis le navire assurant la pose et l'autre extrémité à terre, les télégraphistes constatèrent l'extrême lenteur, près de trois secondes, de la transmission des impulsions électriques recueillies à l'arrivée avec un galvanomètre sensible. La vitesse de l'électricité dans les fils n'était pas encore connue.

L'explication fut rapidement trouvée, le câble immergé se comportait comme une gigantesque bouteille de Leyde, un condensateur ; l'une des armatures était le conducteur intérieur en cuivre, séparé par un isolant de l'armature extérieure, constituée par les fils d'acier de protection immergés dans l'eau de mer.

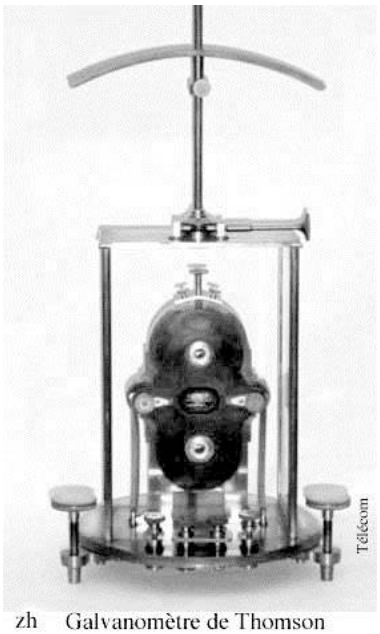
Lorsque l'on reliait le conducteur intérieur à une polarité des piles, l'autre polarité aux câbles d'acier de protection en contact avec l'eau de mer, un courant circulait, mais pas instantanément, il augmentait lentement jusqu'à sa valeur finale en plusieurs secondes. Les courbes (zg) illustrent ce courant croissant de charge d'un condensateur, suivi de sa décharge exponentielle lorsque la liaison avec les piles est coupée. Problème élémentaire pour les actuels débutants en électricité, mais une découverte à l'époque. Encore que les télégraphistes ne comprenaient pas, sinon intuitivement, que cela correspondait à l'accumulation d'énergie dans la capacité, suivie de sa décharge.



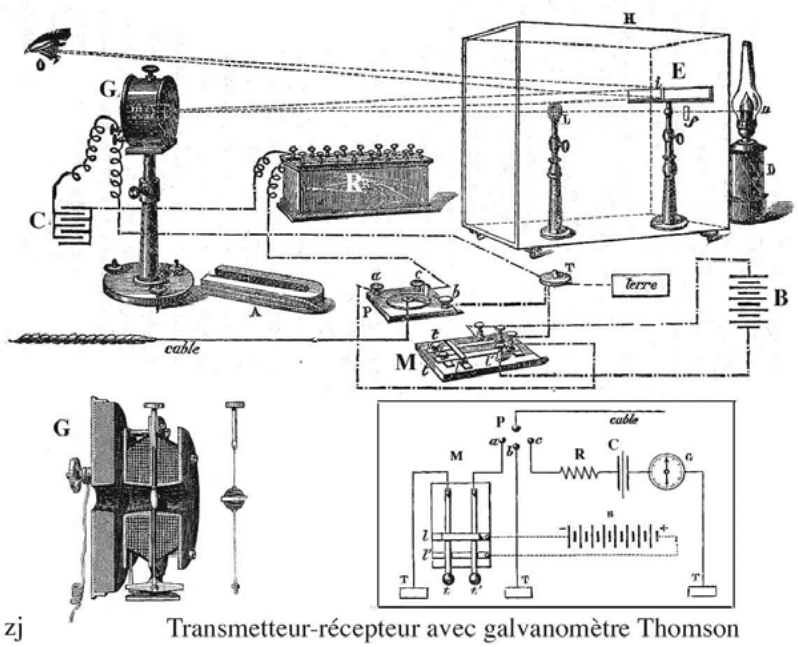
zg Thomson arrival curve for cable signals

Ils constatèrent que cela ne servait à rien, c'était même néfaste d'après Thomson, d'augmenter trop la tension, c'est-à-dire le nombre de piles en série pour obtenir un courant plus fort. Ce qui avait été fait en 1865 et probablement la raison de claquage de l'isolant. D'ailleurs, le promoteur américain Cyrus Field avait démontré qu'une pile rudimentaire, quelques gouttes d'acide dans l'eau d'un dé à coudre en argent où trempait un morceau de zinc de quelques grammes, permettait d'envoyer un message en Europe.

L'anglais **Whitehouse** trouva une solution résolvant partiellement le problème en envoyant dans le câble des courants alternativement de sens contraire, neutralisant ainsi rapidement le courant précédent. Un autre, Varley supprima des courants parasites dû au magnétisme terrestre en mettant un condensateur en série avec le câble, à chaque extrémité. Une valeur optimale de la capacité semblait être celle de 50 milles nautiques du câble.



zh Galvanomètre de Thomson



zj Transmetteur-récepteur avec galvanomètre Thomson

Les récepteurs Morse ne pouvaient fonctionner car la réception des faibles signaux nécessitait des appareils de haute sensibilité, les appareils à aiguilles. William Thomson, reprenant l'idée de Gauss et Weber, conçut un galvanomètre à miroir très sensible (zh).

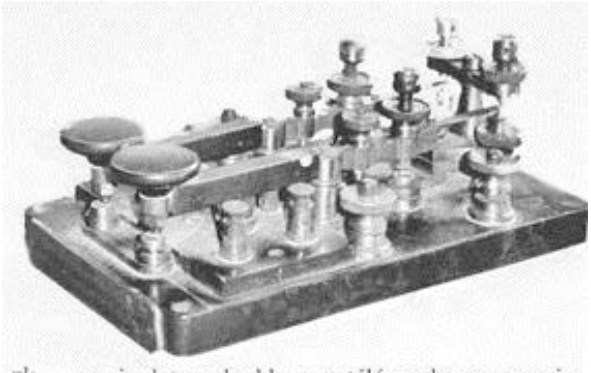
La figure (zj) montre l'ensemble du dispositif et son schéma:

Le commutateur P aiguille le câble soit vers le manipulateur pour émission d'un message, soit vers le galvanomètre pour réception, ou au repos vers la terre.

– À l'émission, le manipulateur à deux lames envoie l'impulsion du courant de la pile dans un sens ou un autre avec contact à la terre entre les deux (zk).

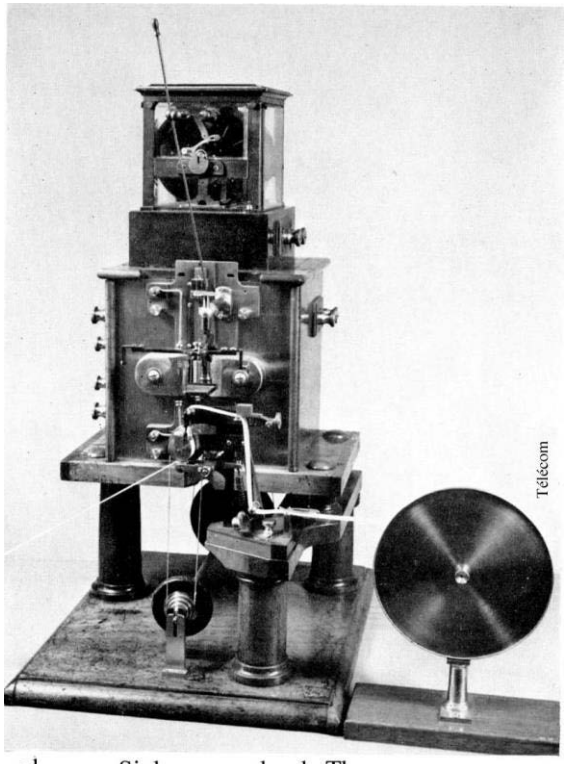
– À la réception, le signal arrive au galvanomètre en traversant la forte résistance R ajustable en fonction de la longueur et le condensateur C. Une lampe à huile envoie sur le miroir du galvanomètre un faisceau de lumière, concentré par la lentille L ; la déviation dans un sens ou l'autre est constatée par l'oeil 0 sur l'écran E.

Après nombre d'améliorations, de 3 mots par minute on arrivait à transmettre jusqu'à 10 mots, chaque lettre nécessitant en moyenne trois signaux visualisés sur l'écran.



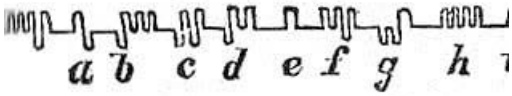
zk manipulateur double pour télégraphe sous-marin

Le système ne permettait pas d'arrêter l'émission s'il y avait un incident ou incompréhension, il fallait attendre la fin. L'observation permanente de l'écran nécessitait beaucoup d'attention de l'observateur, d'où une fatigue rapide, source d'erreurs. Enfin, comme pour les autres procédés visuels, il n'y avait pas de trace des messages reçus.



zl Siphon recorder de Thomson

William Thomson, sommité scientifique de cette époque, concepteurs d'appareils de mesure à haute sensibilité, réalisa un appareil enregistreur adapté à ce difficile problème. Cet *Ink spitter* ou cracheur d'encre était aussi connu comme ***Siphon recorder***. La photo (zl) donne une idée de la complexité de l'appareil. Un petit tube capillaire en forme de S prenait l'encre dans un réservoir, la projetait par décharge électrostatique sur une bande de papier se déroulant. Un système électromagnétique très sensible déplaçait le siphon au-dessus ou au-dessous de sa position de repos en fonction du sens de l'impulsion reçue et traçait sur le papier la ligne ondulée (zm). Les impulsions d'une polarité inscrivaient les pointes supérieures, représentant les points du morse ; les traits étant inscrit en dessous de la ligne moyenne.



zm Siphon Writing

L'appareil n'était guère plus rapide que le galvanomètre, 10 mots par minute, portés ensuite vers 15 mots/min, mais ses avantages le firent généraliser pour toutes les transmissions sous-marines. Il est peu probable que Thomson ait pris un brevet sur cette invention capitale ; la reine Victoria l'a ennobli en Lord Kelvin. (5)

Ligne indo-européenne

Il était important pour la Grande-Bretagne de pouvoir communiquer avec sa vaste colonie des Indes, plus rapidement qu'en trois mois, par les bateaux ; mais 11 000 km séparaient Londres de Calcutta.

Une première tentative de 1856 avait été la pose de plusieurs tronçons de câbles sous-marins depuis la Méditerranée, puis la mer Rouge et l'Océan Indien pour ensuite longer partiellement les côtes en lignes aériennes. Ce fut un échec, les câbles étaient rapidement détériorés et les techniques n'étaient pas au point. (zn),

zn Tirage à terre du câble au golfe Persique

En 1862, un second projet conduit par Charles Bright utilisait les lignes aériennes européennes, puis traversant la Turquie, Bagdad jusqu'au golfe Persique où un câble sous-marin rejoignait Karachi. Achevée en 1865, cette ligne fonctionnait assez mal, avec de nombreuses interruptions dues au vandalisme et à la négligence du personnel local assurant le fonctionnement des trop nombreux postes intermédiaires qu'imposait le système morse.

C'est finalement en 1867 qu'un nouveau projet terrestre est élaboré passant par Berlin, Varsovie, Odessa, Téhéran et Karachi.

L*'Indo-european Telegraph Company* créée en 1868 en confie la construction et l'exploitation à la filiale **Siemens Brothers** de Londres. La firme relève le défi grâce à sa technique à haute sensibilité, dont le relais polarisé élément du *translateur*, était capable de relayer et régénérer les signaux dans les deux sens, seulement tous les 1000 km. À l'inauguration en 1870, un message officiel est envoyé à Calcutta depuis Londres ; la réponse arrive une heure après, mieux que six mois de bateau.

Cette ligne la plus longue du monde restera en service jusqu'en 1931. On peut encore trouver dans le désert du plateau iranien des poteaux Siemens en fonte importé de Londres, il y a plus d'un siècle. L'épopée est encore présente au cœur de Damas.

Sur la grande place, une étrange tour en bronze illustre l'arrivée des fils du télégraphe ; au sommet trône la mosquée millénaire des Omeyyades en réduction (zo).

zo Tour du télégraphe - Damas

Accroître la capacité de transfert des lignes

Malgré la pose chaque année de dizaines de milliers de km de lignes, le trafic était souvent saturé sur les grands axes d'échanges.

Échappaient seules à cette difficulté, les lignes des compagnies de chemin de fer, assurant la sécurité de circulation des trains. Le trafic y était limité et les appareils à cadran convenaient bien, malgré leur faible débit, compte tenu de leur facilité d'utilisation par tout employé, sans risque d'erreur. En France, c'était le Bréguet, en Angleterre le Wheatstone et en Allemagne et Russie le Siemens.

Pour toutes les autres utilisations, plusieurs solutions pouvaient s'envisager pour augmenter le débit des lignes. Tout simplement **doubler les lignes** – ce n'était possible que pour les courtes distances, dans les agglomérations, sinon l'investissements s'avéraient élevés.

Transmetteurs automatiques.

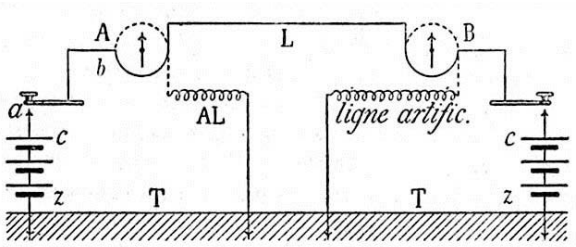
Wheatstone, l'homme que l'on retrouve à toutes les évolutions du télégraphe, avait imaginé un appareil rapide. Les dépêches étaient préparées "hors-ligne" avec un perforateur traduisant les points et traits en perforations codées dans une bande de papier, ce qui le fit surnommer le *Jacquard électrique*. Ensuite les bandes de chaque dépêche défilaient rapidement dans un appareil spécifique transmettant les impulsions de courant à un récepteur, analogue aux appareils Morse. Le débit de transmission atteignait 40 à 100 mots par minute, mais il n'imprimait pas des lettres, seulement du morse. Le système fut très utilisé en Angleterre.

Transmission simultanée, duplex, multiplex.

Une ligne télégraphique ne transmet un signal électrique que pendant de très brefs instants ; elle se trouve largement inoccupée entre ces instants. L'idée émise en 1853 par l'Autrichien Gintl était de transmettre un autre message en sens inverse pendant ces temps morts. A priori cela paraissait difficile de réaliser des mécanismes suffisamment rapides et précis, pour éviter toute confusion entre les signaux transmis et reçus par deux appareils simultanément.

La première solution était finalement assez simple, en réalisant cette séparation d'une façon uniquement électrique, par un branchement particulier des différents éléments : ligne, électros d'émission, de réception pile et manipulateur. L'adjonction d'un mécanisme particulier était inutile, seulement celle d'une résistance, dite *ligne artificielle,* dont la résistance devait être ajusté à la valeur exacte de celle de la ligne. Après les tentatives sans suite de plusieurs expérimentateurs, **Joseph Stearns,** électricien de Boston, réalisa en 1872 une première liaison opérationnelle sur la ligne de

New York à Buffalo de la *Western Union.* Compte tenu du grand avantage économique que cela représentait, d'autres systèmes multiplex furent recherchés notamment par Bell et Gray, les conduisant indirectement sur la voie du téléphone. Nombre de télégraphistes étudièrent des variantes autour de deux schémas de base, l'un *différentiel,* l'autre basé sur le *pont de Wheatstone,* système classique de mesure des résistances (zp).



zp Transmission en *Duplex,* système différentiel

L'un d'eux, encore peu connu, Thomas Edison, améliora le *duplex* de Stearns, la transmission simultanée de deux messages en sens contraire, en le transformant en *diplex,* deux messages dans le même sens. Doué d'un sens particulier pour des montages méticuleux et logiques de relais, il réussit en jonglant avec des relais polarisés et des différentiels, à combiner les deux systèmes duplex et diplex. Ce système *quadruplex* permettait la circulation simultanée de deux messages dans un sens et deux messages dans l'autre. Le débit d'une ligne était pratiquement doublé ou quadruplé, une économie formidable pour la Western, quel que soit le type d'appareil utilisé, Morse, Siemens ou Hugues. La Western le rémunéra largement en l'aidant à créer en 1876 son laboratoire de Menlo Park. L'année suivante elle lui demandera d'inventer un nouveau téléphone (V-2).

Transmission multiple

Le procédé suggéré par l'américain Farmer, proposé concrètement en 1860 par Rouvier, inspecteur des lignes télégraphiques françaises, consiste à diviser le temps en intervalles réguliers et périodiques dont chacun est attribué à un transmetteur distinct. Le premier système de ce type a été réalisé par **Meyer** en 1871 et appliqué à la ligne Paris - Lyon et les grandes lignes suisses et autrichiennes.

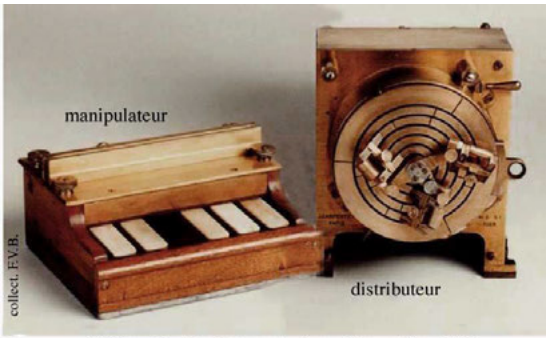
Le manipulateur était un clavier à huit touches blanches et noires envoyant les traits et points au *distributeur,* lequel envoyait les signaux des quatre manipulateurs, successivement sur les récepteurs au bout de la ligne. L'impression se fait sur un papier en relief comme le morse d'origine. Le système doublait la vitesse de transmission du Hugues, mais avec plus de personnel, il fonctionna plusieurs années sur certaines lignes françaises avant d'être remplacé par le Baudot.

Émile Baudot, simple employé de l'administration des Télégraphes, présenta à l'exposition de 1878, après neuf ans de travail, un appareil fabriqué par Dumoulin-Froment et adopté par l'administration des télégraphes français. Il fut considéré comme une merveille mécanique d'imagination, de précision et de rapidité, « *Un télégraphe permettant de transmettre par un seul fil le travail de quatre ou six employés manipulant à la fois quatre ou six claviers et de recevoir à l'arrivée quatre à six dépêches imprimées en caractères typographiques qu'il suffit de coller sur une feuille à transmettre au destinataire* ».

Le système reprend le principe de la division du temps en plusieurs intervalles périodiques, dont chacun est attribué à un transmetteur particulier, mais avec une technologie différente de celle de Meyer.

L'innovation importante est le remplacement du codage Morse en traits et points par un **codage binaire de 0 et 1** qu'adopteront un siècle plus tard les *computer* numériques, mais avec 5 *moments*, c'est-à-dire avec 5 bits par caractère, ce qui donnait 32 combinaisons. C'était insuffisant pour lettres et chiffres à la fois ; elles sont alors doublées à 64 par deux caractères *blancs* (zq) (6).

Le fonctionnement électromécanique est complexe, comme le suggère l'identification des composants principaux.



zs Télégraphe Baudot construit par Carpentier -1879

zs Récepteur - imprimeur Baudot -1880

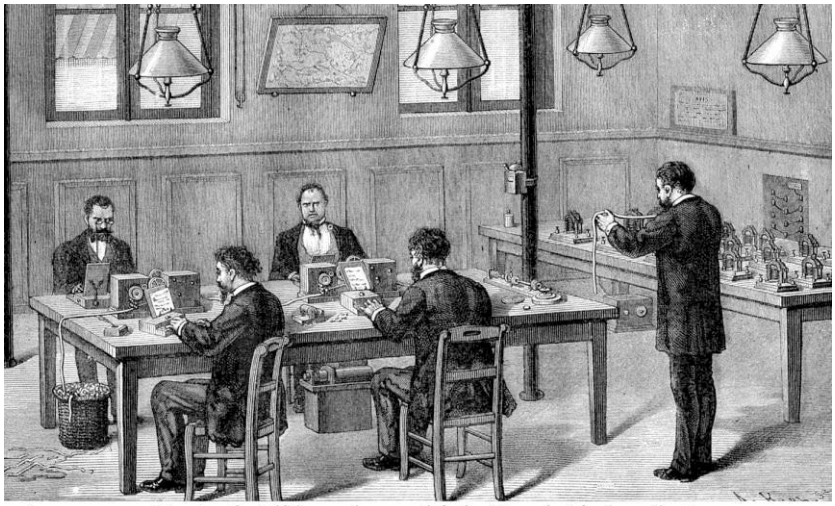
Repos	. . . . .	—	—	—	—	—	Erreur	. . . . .	—	—	—	+	+
A ou 1	. . . . .	+	—	—	—	—	N ou N°	. . . . .	—	+	+	+	+
B 8	. . . . .	—	—	+	+	—	O 5	. . . . .	+	+	+	—	—
C 9	. . . . .	+	—	+	+	—	P %	. . . . .	+	+	+	+	+
D 0	. . . . .	+	+	+	+	—	Q /	. . . . .	+	—	+	+	+
E 2	. . . . .	—	+	—	—	—	R —	. . . . .	—	—	+	+	+
É etc	. . . . .	+	+	—	—	—	S ;	. . . . .	—	—	+	—	+
F '	. . . . .	—	+	+	+	—	T !	. . . . .	+	—	+	—	+
G 7	. . . . .	—	+	—	+	—	U 4	. . . . .	+	—	+	—	—
H "	. . . . .	+	+	—	+	—	V '	. . . . .	+	+	+	—	+
I °	. . . . .	—	+	+	—	—	W ?	. . . . .	—	+	+	—	+
J 6	. . . . .	+	—	—	+	—	X ,	. . . . .	—	+	—	—	+
K (	. . . . .	+	—	—	+	+	Y 3	. . . . .	—	—	+	—	—
L =	. . . . .	+	+	—	+	+	Z :	. . . . .	+	+	—	—	+
M)	. . . . .	—	+	—	+	+	' .	. . . . .	+	—	—	—	+
Blanc-chiff	. . .	—	—	—	+	—	Blanc-lett	. . . . .	—	—	—	—	+

zq Codage binaire du manipulateur Baudot

– Le manipulateur dont dispose chacun des 4 ou 6 opérateurs (zr) est un petit clavier de 5 touches envoyant un signal moins au repos, un signal plus par appui. Les deux touches de gauche sont manœuvrées par la main gauche, celles de droite par l'autre main.

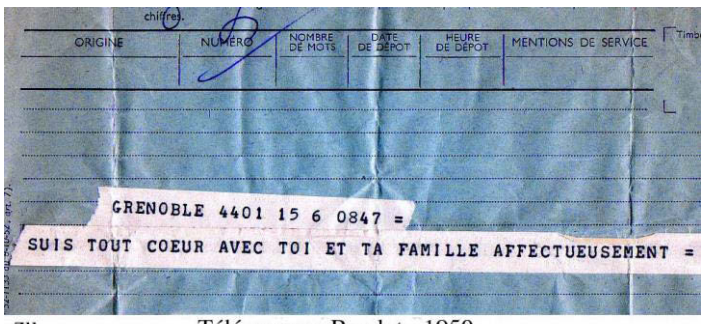
– Le distributeur, cœur du système, est composé de plateaux mis en rotation par un système de contrepoids au début, ensuite par un petit moteur. Ses signaux sont reçus en bout de ligne par cinq électroaimants qui les distribuent pour impression aux 4 ou 6 récepteurs ou *traducteurs*. (zs)

Sur la gravure (zt) d'un poste à 4 opérateurs, chacun envoie une dépêche sur son manipulateur ou observe la réception d'un message qui s'imprime sur la bande de papier du traducteur. Le distributeur, d'un modèle primitif, est sur la droite de la table, sous la sonnerie fixée sur le pilier. Les quatre groupes de 5 relais sont sur la table de droite. À noter que les suspensions d'éclairage sont des becs à gaz ; ce qui date ce poste avant 1881, année de l'apparition des lampes électriques à incandescence.



zt Poste de télégraphe multiple Baudot à 4 opérateurs

Les opérateurs de Baudot étaient des spécialistes, car la mise en service et la surveillance du système était délicate ; il fallait en particulier synchroniser au démarrage les appareils aux deux extrémités de la ligne, avec une procédure rigoureuse.



zu Télégramme Baudot - 1950

Le système Baudot préfigurait, sur le plan du principe, les systèmes téléphoniques à modulations d'impulsions, multiplexage et codage binaire qui se développeront dans les années 1970 pour le téléphone, mais en technologie électronique.

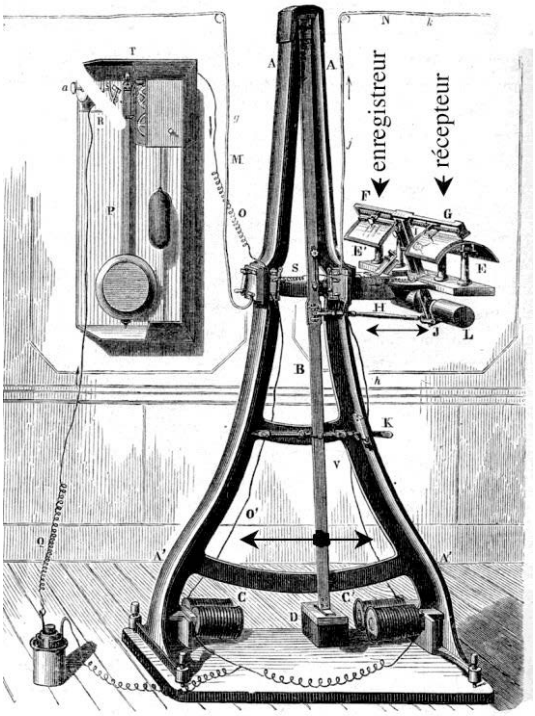
Il fut exploité par plusieurs pays européens, surtout en France jusqu'en 1950. En mémoire de Baudot, l'unité du nombre de symboles transmis par seconde a été dénommée le *baud.*

Quelques anciens se souviennent des jeunes télégraphistes qui distribuaient les télégrammes à domicile, rapidement en vélo, ces *petits bleus*, annonciateurs de bonnes ou mauvaises nouvelles, toujours très courts puisque le prix était fonction du nombre de mots (zu).

Transmettre l'image

Les télégraphes décrits ou seulement présentés n'étaient pas les seuls. La possibilité de transmettre toutes sortes d'informations par un bref courant électrique circulant dans un fil faisait rêver beaucoup de monde en ce XIX^{e} siècle.

Parmi la multitude de systèmes et de variantes inventées, figuraient des télégraphes *autographiques* destinés à transmettre l'écriture manuscrite ou des dessins au trait. L'un d'eux a atteint le stade opérationnel, le ***pantélégraphe*** **de l'abbé Caselli**, professeur à l'Université de Florence. Inventé en 1856, puis mis au point et construit à Paris chez Froment, il est adopté par l'administration sur la ligne Paris - Lyon et accessible au public émerveillé en 1865.



zv Pantélégraphe Caselli

Le transmetteur et le récepteur sont identiques (zv) ; leurs pendules respectifs doivent osciller avec un parfait isochronisme car ils commandent le balayage des mouvements d'analyse de l'original comme celui de la reproduction de la copie.

L'original est écrit ou dessiné à l'encre sur une feuille d'étain ou de papier argenté conductrice, une fine pointe métallique s'y appuie établissant le contact, le courant est coupé lorsque la pointe passe sur une partie encrée, isolante.

Le balayage de la surface par la pointe se fait d'une part avec le mouvement de va et vient du support suivant une ligne continue, d'autre part avec un léger décalage de cette ligne à chaque oscillation.

À l'arrivée, l'opération inverse s'effectue ; une pointe de fer glisse sur un papier imprégné de cyanoferrure de potassium. À chaque impulsion de courant, le sel décomposé fait une petite tâche de bleu de Prusse. Nous dirions aujourd'hui un pixel.

Il est vraiment surprenant que ce premier appareil de transmission d'une image en deux dimensions fonctionne avec le principe de balayage par lignes pour l'analyse ou la reproduction qu'adopteront plus tard le fax, le tube de télévision et le scanner. Avec, certes, les très lentes technologies électromécaniques et chimiques seules accessibles l'époque.

Le système a bien fonctionné deux ou trois ans, le besoin n'étant pas encore créé. Et puis la durée de transmission atteignant 15 à 20 minutes, d'ou un prix d'occupation de la ligne élevé pour une seule image.

Accessoires auxiliaires du télégraphe

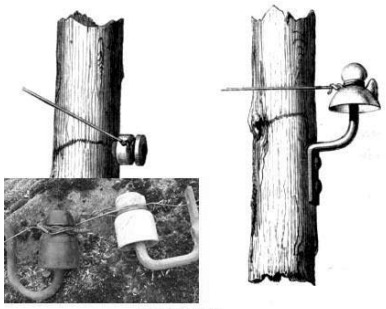
Si les transmetteurs et les récepteurs constituaient l'essentiel du télégraphe, l'accessoire conditionne le bon fonctionnement de l'ensemble, comme dans tout système. Il fallut en inventer pour réaliser ce premier transport d'électricité à de très grandes distances.

La pile

zw pile Leclanché

Le générateur d'électricité, aussi simple soit-il, était le composant essentiel. Pourtant ce ne fut pas lui qui causa le plus de soucis aux télégraphistes. Ils disposaient de nombreux modèles de piles, Daniell, Bunsen pour les plus connues, chacune avec quelques défauts, jusqu'à l'invention du télégraphiste belge, Leclanché. Sa pile se généralisa après 1870. (II-1) (zw). Une exception pourtant fut l'invention par Siemens d'un petit générateur à induction manoeuvré à la main, remplaçant la pile, pour son télégraphe à cadran.

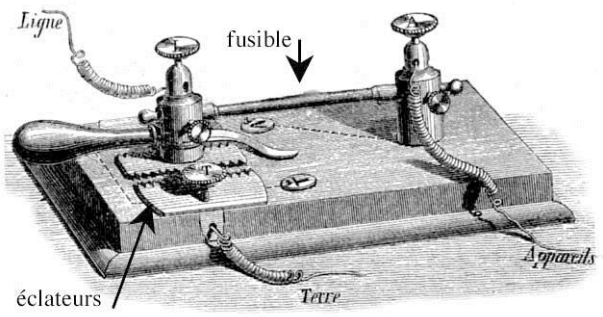
La ligne télégraphique


zx Isolateurs

Aérienne le plus souvent, elle était constituée de deux fils métalliques suspendus par des supports isolants sur des poteaux en bois. Ce n'était pas aussi simple qu'il peut paraître de transporter au loin pour la première fois de l'électricité, même de très faible puissance

Le fil était au début en cuivre, de deux millimètre de diamètre, pour une bonne conductivité électrique, n'avait qu'une faible résistance mécanique. On essaya de le remplacer par du fil d'acier plus gros, 4 mm ; s'est alors posé le problème de la rouille, entraînant un mauvais contact aux raccordements. L'étamage ne fut pas une solution satisfaisante, les métallurgistes étudièrent un alliage, le bronze siliceux répondant aux exigences électriques comme mécaniques. Pour les supports qui devaient garantir une bonne isolation malgré pluie et dépôt poussiéreux, la porcelaine moulée s'est vite imposée, avec une forme en cloche qui a perduré jusqu'aujourd'hui. (zx)

Le parafoudre



zy Paratonnerre

Les télégraphistes découvrirent un autre problème grave, le claquage électrique des matériels dans les postes, suite aux surtensions propagées par les lignes exposées aux orages. Ce phénomène, mal compris jusqu'au début du XX^{e} siècle, perturbera aussi beaucoup les réseaux qui transporteront l'énergie électrique après 1890. Il est rare que la foudre tombe directement sur les fils électriques, mais chaque coup de foudre, même éloigné de la ligne, induit dans celle-ci une brève surtension se propageant loin, jusqu'en un point de faible isolement, où elle amorcera un claquage destructeur.

Pour s'en prémunir, on installait dans tous les postes un *paratonnerre* ayant deux fonctions (zy) : d'abord dériver la surtension de la ligne vers la terre en favorisant l'amorçage, par effet de pointe, entre deux peignes espacés d'un millimètre ; ensuite insérer en série avec les appareils un fil très fin, protégé dans un tube. Si le courant d'écoulement de la surtension de foudre était trop élevé, le fil fondait. Ce fut l'invention d'un dispositif simple devenu universel, qui protège toujours efficacement les circuits contre les surintensités, le fusible. Edison l'utilisa pour protéger ses premières installations électriques.

Surtension de foudre

La foudre est à l'origine de plusieurs types de dégâts suivant son point d'impact, le choc direct étant le plus grave. En dehors de ce cas extrême assez rare, les lignes électriques actuelles comme les premières, celles des télégraphe, sont fréquemment soumises à une perturbation affectant les réseaux

uniquement aériens à basse tension ou téléphoniques ; les lignes à haute tension étant protégées par des dispositifs *parafoudres* en certains points.

> Avant l'éclair du coup de foudre, un champ électrique de millions de volts s'établit entre la base du nuage d'orage par accumulation de charges, généralement négatives, provoquant la concentration réciproque au sol, par influence, de charges positives équivalentes. Ce champ a une valeur très élevée, plus d'une dizaine de kV par mètre. C'est lui qui fait même hérisser les cheveux des alpinistes en danger, comme dans l'expérience bien connue du Palais de la Découverte. Un fil électrique à quelques mètres du sol constitue avec celui-ci un condensateur, qui va alors accumuler des charges en proportion de cette tension de dizaines de kV (Q = CV). Au moment de l'éclair, tombant même sur un arbre éloigné, le champ électrique entre sol et nuage s'annule brutalement, les charges localement accumulées sur la ligne à un potentiel élevé vont alors se répartir instantanément sur l'ensemble de la ligne par une onde de surtension et s'écouler à la terre en provoquant un claquage en un point où l'isolation est faible (7).

La sonnerie

Quel que soit le système qu'il exploitait, l'opérateur d'un poste télégraphique devait avertir son collègue à l'autre extrémité de la ligne pour qu'il se prépare à recevoir une dépêche. Au début, c'était encore un électro-aimant, dont l'armature mobile émettait un clic à la fermeture, qu'on amplifia ensuite en prolongeant l'armature par un petit marteau frappant sur une cloche. L'allemand Neef, ou peut être de La Rive, rendit répétitif ce bruit en coupant le courant de l'électro par un contact rupteur, dès que son armature était attirée. (zz) Il avait inventé la sonnerie à *trembleur*, modeste auxiliaire qui équipa cependant des millions de télégraphes, puis les téléphones et encore aujourd'hui nos sonnettes de porte d'entrée. Ce trembleur fut aussi le rupteur de la bobine de Ruhmkorff (II-4).

zz sonnerie à trembleur

Développement

Commencés entre 1850 et 1860, les réseaux télégraphiques connurent un développement exponentiel pendant les deux décennies suivantes.

En 1880 étaient installés:

– Aux États-Unis, 270 000 km de lignes, transmettant 33 millions de dépêches par an.

– En Europe, 450 000 km, le doublement du réseau de 1870.

– 230 câbles sous-marins dont huit transatlantiques, totalisant 80 000 km. Malgré leur prix très élevé, les liaisons transatlantiques avaient transféré 500 000 dépêches dans l'année.

Les prix très élevés du début baissaient vite, ainsi l'envoi d'un télégramme de 10 mots de Paris à Marseille coûtait 0,5 F, soit le prix d'un kg de pain.

Dans notre monde actuel, saturé de moyens de communication, il est difficile d'imaginer l'arrivée de ce premier vecteur d'information, quasi instantané par rapport à la lenteur de la poste à 10 km/h. Lenteur que le développement simultané du chemin de fer avait déjà réduite.

Le télégraphe électrique fut l'un des principaux facteurs qui ont propulsé la révolution industrielle dès les années, avant que l'électricité-énergie provoque un autre bond en avant après 1880. Sans le télégraphe, le chemin de fer restait très limité, toutes les lignes étant à voie unique

Ce fut un outil essentiel pour les affaires, les échanges commerciaux, la coordination des transports par fer et mer. De même dans tous domaines, la finance avec les bourses, l'administration de l'Etat, la diplomatie comme la guerre, la première celle de Crimée.

Petit télégraphiste 1910

Le travail et le rôle de la presse fut complétement transformé par la création des grandes agences. Associated Press aux États-Unis, Reuter à Londres et Berlin, Havas à Paris.

L'échange d'information privée par le grand public fut un peu plus longue à utiliser le télégraphe, en raison de son coût. Pourtant, en 1900, malgré le téléphone mieux adapté aux échanges privés, 10 millions de messages ont été portés dans Paris par les *petits télégraphistes*, la plupart des presque-enfants de plus de 14 ans. Leur silhouette était familière aux parisiens comme celle des petits mitrons et pâtissiers qui couraient dans les rues pour livrer leur marchandise à domicile (zz2). La législation les autorisait à travailler, mais 10 heures par jour, pas plus ! (8)

Théoriciens et inventeurs

Au cours de cette analyse de l'élaboration des systèmes télégraphiques, le lecteur aura noté les noms des principaux inventeurs, parmi lesquels il choisira, s'il le souhaite, le nom du plus important, le premier qui…

Il faut remarquer que, sur le plan théorique, les connaissances de la plupart étaient fort sommaires, les lois de l'électricité étaient en cours de maturation.

Cependant, l'un d'eux, **W. Thomson, Lord Kelvin,** a contribué à résoudre nombre de problèmes, en particulier la difficile transmission des signaux électriques de quelques volts dans les très longs câbles capacitifs sous-marins. C'était vraiment un personnage de haut niveau intellectuel, peut-être le meilleur théoricien de l'époque, et simultanément un praticien capable de résoudre des difficultés technologiques. Au delà du télégraphe, il fut le premier spécialiste de la mesure des grandeurs électriques, et approfondit la théorie esquissée par Faraday de ce qui devint ensuite le champ électromagnétique de Maxwell.

Compléments

Parmi les nombreux livres, revues et documents :

TH. DU MONCEL,*Exposé sur les applications de l'électricité t. III,Télégraphie électrique,* ed. Librairie scientifique et industrielle, Paris, 1874.

LOUIS FIGUIER, *Les Merveilles de la Science,* t. II, 284 p., ed. Furne et Jouvet, Paris, 1867.

1 - La rapidité de transmission de l'information a toujours eu une importance capitale, pour les militaires comme pour les financiers. Un exemple typique a été une opération de bourse qui a contribué à la fortune bancaire accumulée par la famille multinationale Rothschild, à l'occasion de la bataille de Waterloo, perdue par Napoléon en 1815.

Le Rothschild londonien mit en place un dispositif secret pour être informé avant tous de l'issue de cette bataille cruciale. Un émissaire surveillait la bataille de loin, à la lunette. Lorsque la défaite de Napoléon se révéla certaine dans l'après-midi, il galopa jusqu'à la côte où avait été installé une cage à pigeons voyageurs anglais. L'information arriva par la voie des airs au pigeonnier sur l'île, d'où un autre cavalier transmis la nouvelle jusqu'à Londres. Rothschild fit aussitôt circuler une fausse nouvelle à la bourse : l'Angleterre était vaincue. S'ensuivit une panique boursière, avec l'effondrement des titres d'état que Rothschild fit racheter à bas prix. Le lendemain, lorsque la nouvelle de la victoire arriva, les titres remontèrent à très haut niveau et leur revente procura à Rothschild un fabuleux bénéfice. De nos jours ce serait un "délit d'initié", en principe sanctionné par les tribunaux.

2 - L'Union Télégraphique Internationale (U.I.T.) est créée à la conférence de Paris en 1865 et adopte le code Morse. C'est la première instance internationale destinée à réglementer une activité scientifique et commerciale. Le morse fut encore utilisé bien après le remplacement du récepteur Morse par des systèmes plus performants, en particulier pour les premières liaisons par T.S.F., et ce jusqu'à WW2.

D'après nombre d'auteurs américains, et son propre fils, il est très probable que le fameux code fut inventé par Vial, mais celui-ci l'attribue pourtant à Morse dans son livre : *Description of the American Electromagnétic Télégraph,* ALFRED VAIL, Philadelphia, 1845, réédité par Arno Press, New York,1974.

Pour des raisons restées inconnues, Vial n'a pas réclamé la reconnaissance d'avoir réalisé quasiment tous les éléments de cette invention : prototype, réalisation du manipulateur et récepteur opérationnel adaptés au code Morse, qu'il avait imposé à Morse.

3 - Le *relais* de Wheatstone, apparemment simple accessoire, devint un composant essentiel des systèmes télégraphiques, dont la fonction de *répéteur* ou *translateur* allait permettre des lignes longues de milliers de km. Par contre son emploi sous l'eau, pour les lignes transatlantiques, n'était pas envisageable. Le terme *relais* a été adopté à l'époque parce qu'il remplissait une fonction analogue au relais de la malle de poste, où l'on relayait rapidement l'équipage de chevaux fatigués, ainsi que les cochers, par des chevaux et cochers reposés. Déjà dans le télégraphe Chappe, la station constituait un relais recevant l'information et sa transmission à la station suivante.

Le relais est aussi devenu un composant important de toutes les distributions et automatismes électriques. C'est un relais qui allume l'éclairage partout par appui sur un simple bouton ; lorsqu'il commande des circuits puissants c'est un *contacteur*. Le nom de Wheatstone reste bien connu de tous les jeunes électriciens, qui apprennent la classique méthode du *pont de Wheatstone* pour mesurer la valeur d'une résistance.

Pour le télégraphe, c'est grâce aux centaines de relais disposés tout au long des milliers de km de la ligne indo-européenne que les informations et les ordres de la reine Victoria arrivaient en une heure, au lieu de plusieurs mois par les navires.

4 - Cette envolée lyrique, typique du **scientisme** de la seconde moitié du XIX^{e} siècle, peut être juxtaposée, par contraste, à deux évènement de nature et date différentes:

– le génocide de plusieurs millions d'Amérindiens qui se perpétrait à la même époque, par le même peuple, était-il aussi une manifestation de progrès et civilisation du génie humain ? Hollywood nous a souvent illustré le sabotage des voies de chemin de fer et lignes télégraphiques par les Indiens, prétextes de ce long massacre.

– le premier pas d'Armstrong sur la lune en 1969 "*un petit pas pour l'homme, un pas de géant pour l'humanité".* Quel bénéfice réel pour l'humanité résultait de ce fantastique succès ? Ce ne fut d'ailleurs une aventure technique et scientifique guère plus difficile que le câble transatlantique, en regard des moyens et connaissances à chaque époque.

Ce livre n'a pas la prétention d'apporter des réponses à la question récurrente de l'apport réel des sciences et techniques au progrès de l'humanité, comme à sa destruction volontaire par les guerres, mais seulement donner quelques repères et éléments de réflexion, autre objectif implicite de l'histoire des sciences. À chacun de conclure selon ses propres critères.

5 - William Thomson fit progresser les connaissances sur l'électricité dans plusieurs domaines. Son intervention pour résoudre les difficiles problèmes des longs câbles télégraphiques sous-marins le conduisit à trouver une première version de la propagation de l'électricité dans les lignes, ce qui est devenu **l'*équation des télégraphistes.*** Mais il avait négligé l'inductance, peu importante par rapport à la capacité pour les câbles.

Heaviside l'établit à la fin du siècle : $d2v/dx2 = ckdv/dt + scd2v/dt2$, v est la tension en un point x de la ligne, c la capacitance, k la résistance, s l'inductance, valeurs par unité de longueur.

6 - Le **codage numérique** de Baudot donnait 32 caractères, alors que le codage ASCII des computers, devenus ordinateurs, comprend 8 bits, un octet, soit 256 combinaisons.

7 - Parafoudres ZnO - Depuis les années 1980, la prolifération des systèmes électroniques de communication et informatique à base de semi-conducteurs, les rend très vulnérables lorsqu'ils sont raccordés à des réseaux électriques aériens BT et téléphoniques. Les parafoudres, éclateurs à pointes, utilisés depuis les premiers télégraphistes sont peu efficaces. Il n'y avait guère d'autres solutions.

Heureusement la découverte majeure des propriétés d'une céramique, l'oxyde de zinc, a permis la réalisation, dans les années 1970, d'une varistance au ZnO par la société japonaise Matsushita (Panasonic). Sa propriété exceptionnelle est d'avoir une très grande résistance à basse tension, qui va se réduire très fortement dès que la tension croit, permettant ainsi d'écouler à la terre le courant dû à la surtension. Depuis la fin du brevet, maintenant dans le domaine public, les parafoudres ou para-surtenseurs à oxyde de zinc, très efficaces, ont été généralisés pour protéger contre la foudre tous systèmes électroniques et électriques, et même jusqu'en haute tension. Une invention récente, peu connue, aux conséquences importantes. Ils s'appliquent pratiquement à toutes les tensions de réseau, du 220 V aux très hautes tensions. Un progrès important peu connu.

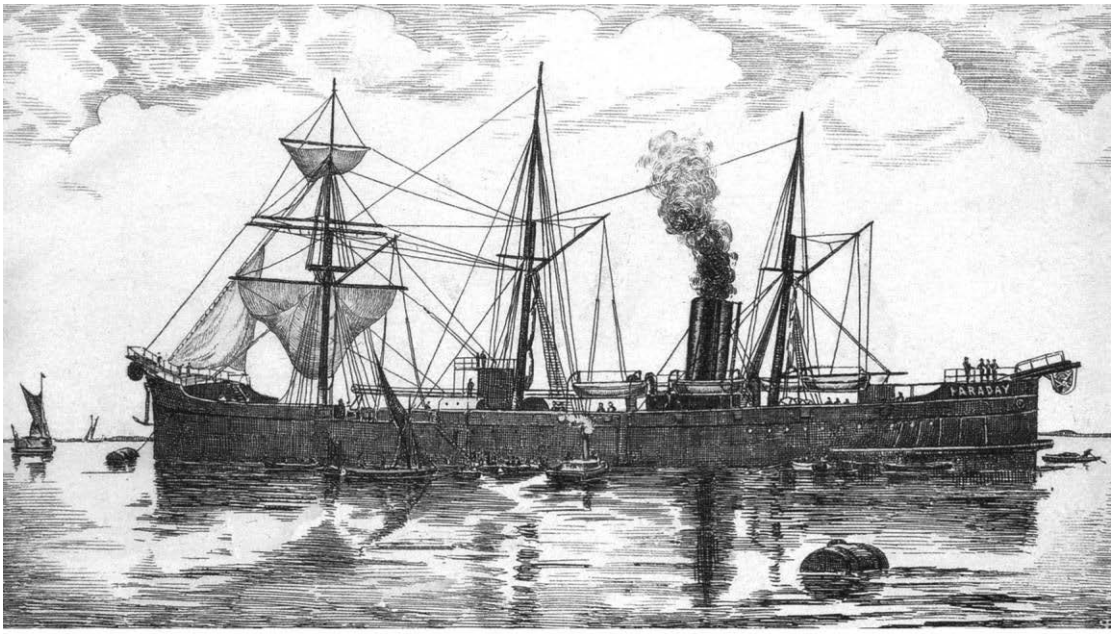
8 - La loi du 2/11/1892, créant les **inspecteurs du travail,** interdit le travail des enfants de moins de 14 ans, limita le temps de travail à 10 h par jour pour les moins de 16 ans, à 11 h pour les moins de 18 ans avec repos d'une heure et 60 h par semaine, à 12 h pour les femmes de plus de 18 ans.

Pour les adultes, la journée était de 12 h, réduite à 10 h pour les mineurs de fond.

Le 30 mars1900, la loi Millerand réduisait la journée de travail à 11 h maximum, soit 66 h en 6 jours … près du double des 35 h.

Certains bons esprits généreux, installés dans leur vie confortable, ne peuvent pas comprendre que le travail des enfants est une nécessité de survie, encore aujourd'hui dans nombre de pays, comme il l'était chez nous, il y a un siècle. N'est-t-il pas bien préférable de leur faire coudre des ballons de foot, que de passer leur journée à récupérer ce qui peut l'être dans les monceaux puants d'ordures urbaines.

On dit que l'enfer est pavé de bonnes intentions.



Le *Faraday*, navire poseur de cables Siemens - 1874

Musée des Télécommunications Rhône-Alpes

2 - Téléphone

Charles Bourseul, inspecteur des télégraphes, proposait dans l'*Illustration* de 1854 la possibilité de transmettre la parole au moyen de courants électriques.

Nombreuses sont les inventions précédées par ce genre d'annonce, non suivies d'une première réalisation. Il est peu probable que ces prophéties classiques aient vraiment inspiré les inventeurs, sinon la NASA et von Braun, auraient dû remercier Tintin d'avoir envoyé une fusée sur la lune avant eux.

Alors que nous considérons aujourd'hui le téléphone, même à fil, comme un moyen de communication majeur, bien supérieur à l'archaïque télégraphe ; ce ne fut pas le cas en 1876 à sa naissance. Pour les uns le téléphone était une curiosité scientifique intéressante, pour d'autres un *gadget,* pourtant il connut un développement rapide, comme complément du télégraphe, plutôt que concurrent. Il anticipa même la radio, mais avec fil.

Sur le plan scientifique et technique, ce ne fut pas aisé de transformer les sons de la parole en courant électrique, mais plus facile de transformer à nouveau ce courant en sons intelligibles à l'autre bout d'une longue ligne de fils télégraphiques.

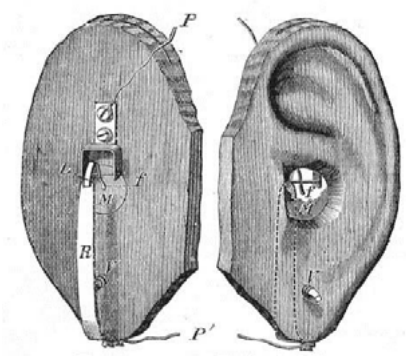
On sait que les sons sont des vibrations élastiques de l'air, compressions et dépressions, à des fréquences audibles entre 250 et 8000 Hz environ. Les jeunes, certains animaux, perçoivent les fréquences jusqu'à 15000 Hz.

Il fallait donc transformer ces oscillations mécaniques de l'air en un courant oscillant aux mêmes fréquences. Pour nous, un simple courant alternatif sinusoïdal à haute fréquence mais pour les gens du XIX^{e}, un courant inconnu et non mesurable, si ce n'est par imagination, qu'ils ont dénommé pulsatoire, vibratoire ou ondulatoire.

Reis ouvre la voie du *téléphone*

Le physicien Page, en 1837, et d'autres avaient constaté que des variations rapides de magnétisation et démagnétisation du noyau en acier d'un électro-aimant produisait un son, une *Galvanic Music,* ce que nous appelons la *magnétostriction.*

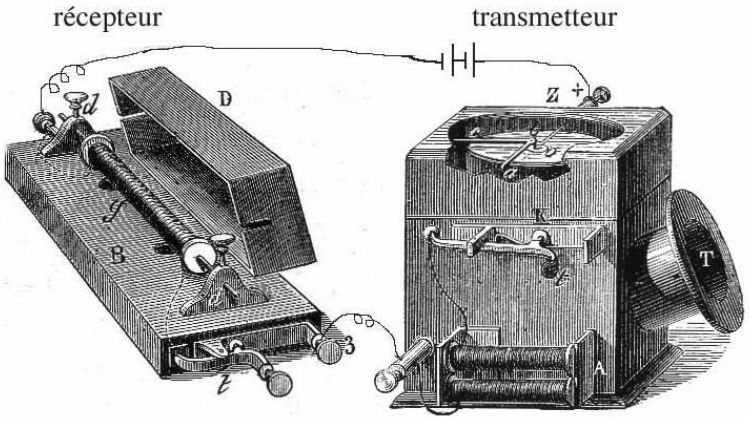
Philippe Reis, professeur à l'institution Garnier de Friedrichsdorf près de Hombourg, songeait comme d'autres à transmettre aussi des sons et la voix humaine. Il cherche à imiter le fonctionnement de l'oreille, capable de traduire avec des os et le tympan, les compressions et décompressions mécaniques de l'air à haute fréquence résultant de la transmission du son.



a Transmetteur Reis 1861

En 1861, il construit et présente à la Société de physique de Francfort-sur-le-Main un premier appareil répondant à peu près au problème. (a) Le courant électrique d'une pile traverse un émetteur qui va le transformer en courant haché, à la fréquence du son à transmettre, vers un récepteur qui retransforme ce son en vibration de l'air.

L'émetteur, une sorte d'oreille en bois réaliste, porte en son centre une membrane en collodion sur laquelle s'appuie un fin stylet courbé, dont l'autre extrémité provoque un train de ruptures et fermetures d'un contact à la fréquence du son.



b Téléphone musical de Reiss 1863

Transmis au récepteur, ce courant pulsé traverse le bobinage d'un électro-aimant, dont l'axe en fer vibre et restitue le son, amplifié par la caisse de résonance d'un violon.

Les sons musicaux, relativement purs sont assez bien reproduits avec un éloignement de 300 pieds entre les deux appareils, mais les paroles sont presque incompréhensibles.

Par analogie avec le télégraphe, Reis l'appelle le *téléphone.*

Après perfectionnements, il réalise un appareil définitif et le présente en 1863 à la Société de physique où il est remarqué et fait l'objet d'articles dans la presse locale (b). Le principe du transmetteur repose sur la *modulation* du courant de la pile, suivant notre terminologie, obtenue par des interruptions à la fréquence du son, mais par un moyen plus sensible. Une petite feuille de platine collée sur la membrane vibrante est reliée à une borne de l'appareil par un mince ruban de cuivre. Une pièce semi mobile pliée en V, transmet les oscillations de la membrane à des contacts de rupture, reliés à l'autre borne de sortie de l'appareil.

Le récepteur est toujours un électroaimant dont la vibration du noyau en fer, associée au phénomène de magnétostriction, est amplifiée par une caisse de résonance en bois. L'appareil transmet bien des sons musicaux de piano, des mélodies chantées, mais la compréhension de la parole est difficilement audible, les voyelles passent assez bien mais pas les consonnes. Il était possible d'acheter cet appareil à un constructeur local ; quelques physiciens l'ont ainsi expérimenté, par exemple l'anglais Ladd. La gravure (b) figure sur le prospectus que distribuait Reis.

Son défaut, ne pas bien transmettre la parole, seulement la musique, le fit un peu oublier, mais il avait ouvert la voie. L'inventeur était conscient de son importance que certains considéraient comme un jouet. Il écrivait : " *j'ai montré au monde le chemin d'une grande découverte, à d'autres d'aller plus loin "*. Il mourut en 1874 juste avant d'avoir vu son projet perfectionné par d'autres.

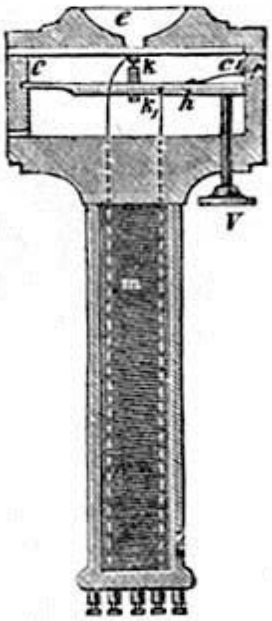
À la recherche du téléphone parlant

L'appareil de Reis fut classé comme un *téléphone musical*, pas encore un *téléphone parlant*. Il avait en effet déjà résolu l'un des deux problèmes :

– le principe du **récepteur** à électro-aimant, dont le noyau vibrait sous l'effet du courant pulsatoire traversant la bobine ; sa vibration était transmise à une caisse de résonance qui amplifiait le son. Les successeurs l'adopteront, avec des améliorations, essentiellement le remplacement du noyau en fer par un aimant permanent mettant en vibration une membrane en acier. Aujourd'hui la majorité de nos écouteurs ou haut-parleurs fonctionnent sur ce principe.

-- pour l'**émetteur** par contre, la génération d'un courant intermittent à la fréquence du son par des interruptions d'un courant continu était très délicate à réaliser et ne transmettait que les sons assez purs de musique, mais pas les bruits multifréquences de la parole.

Plusieurs télégraphistes ont essayé d'améliorer l'émetteur de Reis : Wright, Varley, Wray, Van der Weyde, Pollard et Garnier.



c Emetteur téléphonique de Janssen

L'appareil de Jannsen (c) était intéressant sur plusieurs points : le courant de la pile était interrompu par la séparation de deux contacts en charbon qui anticipaient le futur microphone à charbon. Le hachage du courant, à la fréquence de vibration du diaphragme en acier cc', se faisait ainsi par séparation du contact en charbon k fixé à cc' de l'autre contact charbon k1 fixé sur une pièce réglable par la vis V. Le courant haché traversait l'enroulement d'une bobine d'induction m, dont l'autre transmettait le courant amplifié au fil relié au récepteur, procédé proche *de la baignoire* de Gray (ci-après). Sur le plan pratique, la bobine constituait un manche pour tenir l'appareil, anticipant la forme de l'appareil de Bell. Les recherches des finalistes, Gray, Bell, Edison, Berliner, Hugues et autres ont abouti sur un autre principe d'émetteur, traduisant correctement les sons en courants *ondulatoires* et non en courants intermittents ou *pulsatoires*. D'abord en utilisant une résistance variable à liquide, puis le système électromagnétique de Bell avec ou sans pile, pour revenir ensuite à des résistances variables solides tel le charbon du microphone.

L'invention finale du téléphone présentait une particularité souvent rencontrée, en ce qu'elle résultait des travaux menés vers un tout autre objectif, simultanément par deux hommes, Gray et Bell, différents par l'expérience, la méthode et l'approche scientifique. L'un d'eux, Bell, devint l'inventeur officiel en Amérique, ayant déposé un brevet deux heures avant l'autre. Pourtant, leurs deux solutions pour concevoir l'émetteur ou transmetteur seront rapidement abandonnés pour celle du microphone à charbon. L'historien américain David A. Hounshell a analysé comparativement les recherches de Gray et Bell, apportant sur le sujet un éclairage nouveau.(1)

Les deux inventeurs avaient au départ pour objectif de trouver un système multiplex permettant la transmission simultanée, sur la même ligne télégraphique, de plusieurs messages. Strearns avait imaginé le premier système duplex, amélioré par Edison, puis mis en service en 1872 par la *Western Union* ; il permettait cette transmission, mais en sens opposé par les deux postes à chaque extrémité de la ligne. Vu le succès rapide du procédé, l'enjeu financier d'un nouveau système multiplex était élevé. Aucun des deux n'y parvint pratiquement, mais seul Bell eut l'intuition qu'une retombée de leurs travaux, le téléphone, allait devenir un succès.

Le téléphone de Gray

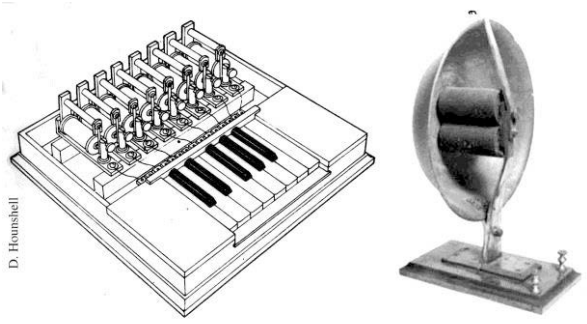
Elisha Gray, originaire de l'Ohio, débuta jeune dans la télégraphie en 1867 par l'invention d'un relais spécifique qui intéressa la puissante *Western Union Telegraph Company.* Avec l'aide financière de cette firme, il créa en 1870 à Chicago une importante société de matériel télégraphique pour cet unique client. Comme d'autres, il cherchait à améliorer le système multiplex basé sur des relais et fut mis sur la voie en 1874 par une simple expérience de son neveu.

Dans la salle de bains, celui-ci avait installé une pile alimentant la lame vibrante d'une sonnerie. Cette lame portait un autre contact qui amorçait et coupait, à la fréquence de vibration, le circuit primaire d'une bobine d'induction alimenté par une autre pile. Une borne du circuit à haute tension était reliée à la baignoire en zinc, l'autre dans une main. Si l'on passait l'autre main sur la baignoire, cela provoquait un son identique à celui du vibreur. Étonné Gray modifia la fréquence du son de la lame, le son sur la baignoire se modifiait aussi. La bobine d'induction transformait le courant intermittent du vibreur par un courant ondulé qu'il dénomma *vibratoire*, sinusoïdal pour nous.

Il pensa que ce système permettrait de transmettre simultanément sur une ligne télégraphique plusieurs signaux de courants vibratoires de fréquence différente.

Il réalisa des appareils et vérifia qu'il était assez simple de faire un émetteur générant plusieurs fréquences ; le récepteur, un simple électroaimant faisant vibrer une lame en acier reproduisait bien le son, mais d'une seule fréquence, il ne pouvait dissocier des signaux de plusieurs fréquences.

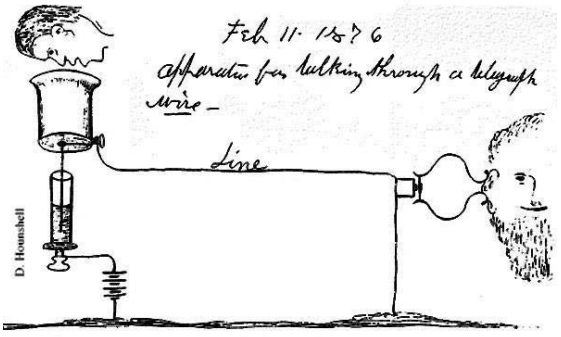
À défaut de réaliser sur ce principe un système multiplex à fréquences variables, faute d'un récepteur approprié, il était possible de transmettre de la musique, un véritable télégraphe musical (supérieur à celui de Reis), ou encore transmettre la voix, pour lequel le récepteur à électro-aimant était bien adapté. Il fallait alors trouver un émetteur multifréquence.



d Transmetteur et récepteur musical de Gray 1874

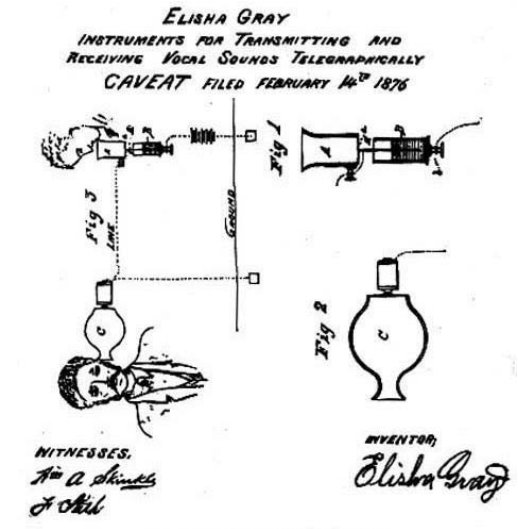
Gray présenta les possibilités de ces courants vibratoires à divers spécialistes du télégraphe. Ils jugèrent que le télégraphe musical n'avait pas plus d'intérêt que celui de Reis et la transmission de la voix serait une curiosité scientifique, sans plus.

Découragé il réalisa pourtant, pendant l'été 1874, un transmetteur musical capable d'émettre les notes sur un octave et le récepteur un électroaimant adapté sur une bassine à linge. C'était précisément l'ancêtre de nos pianos électroniques ou synthétiseurs et le récepteur celui de nos haut-parleurs (d).



e Croquis de Gray pour son caveat du 14/02/1876

Gray reprit ses recherches sur le multiplex et prit plusieurs brevets. En 1875, au courant des recherches de Bell plus orientées vers la transmission de la voix que le multiplex, il écrivait à son agent de brevets : *« Bell semble dépenser toute son énergie sur le télégraphe parlant. Si l'on ne peut en nier l'intérêt scientifique, les débouchés commerciaux de cette invention sont quasiment nuls ».*



f caveat Gray 14/02/1876

Néanmoins, il revenait de temps en temps sur cette transmission de la voix pour laquelle il avait un bon récepteur à électroaimant ; pour le transmetteur, un autre appareil mécanique essayé précédemment avait montré par hasard, qu'en modifiant la pression sur un contact mécanique, donc sa résistance, il modifiait le son émis. Plusieurs années auparavant il avait fabriqué pour la Western Electric un rhéostat liquide dont la résistance variait en enfonçant plus ou moins une tige dans un liquide à forte résistivité, de l'eau par exemple, pas très pure ou légèrement salée.

Gray, trop occupé par le multiplex, son objectif prioritaire, ne se décida à breveter à tout hasard ce système qu'en février 1876. Il en fit un croquis (e) le 11 février, pour déposer seulement un *caveat*, car ne l'ayant pas essayé, il ne pouvait être sûr qu'il fonctionnait. Ce dépôt provisoire était prévu par *le Patent Office* pour permettre à l'inventeur de *mettre en pratique* son appareil puis de déposer avant trois mois le brevet définitif (2).

L'agent d'affaires de Gray le déposa le 14 février (f), mais quelques heures après le dépôt d'un brevet de Bell. Le préposé lui signala alors qu'il aurait alors intérêt à transformer son caveat en brevet d'ici le lendemain, cela permettrait de déclencher le processus *d'interférence* prévu par la loi. Une expertise permettrait ensuite de déterminer quel était le premier inventeur d'un appareil fonctionnant,

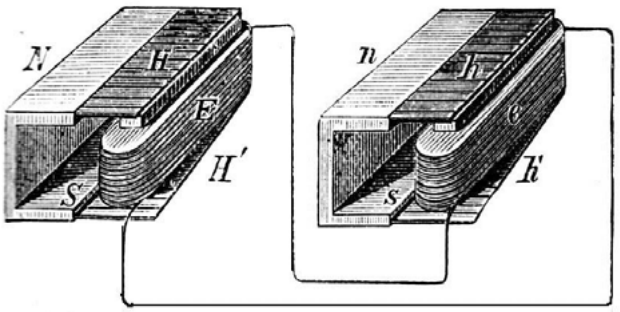
et non le premier déposant, mais c'était une procédure longue et coûteuse. Gray abandonna, ce télégraphe parlant n'étant pas sa priorité. Ce fut une grave erreur. Il ignorait que le système déposé par Bell ne marchait pas, de même que le sien aurait bien fonctionné s'il l'avait seulement essayé, ce qui lui donnait toutes les chances de gagner le procès. Pour un détail toute l'histoire du téléphone aurait été complétement changée.

Une fois encore, dans une invention, l'expert compétent n'a pas eu pour son invention l'intuition de l'amateur obstiné.

Le téléphone de Bell

Alexander Bell, professeur d'élocution à Édimbourg était célèbre par sa méthode d'apprentissage pour les malentendants. Son fils Graham avait ainsi travaillé sur la nature des sons de la voix. Le phonéticien Ellis lui signala que le physicien allemand Helmholtz avait déjà fait ces recherches entre 1859 et 1862, consignées dans un traité que Bell arriva à se procurer en 1870, *Théorie de la perception des sons*. Il y était décrit la reconstitution des sons en faisant vibrer des diapasons accordés sur chaque note par des électro-aimants. La famille émigra au Canada en 1871 et Graham devint enseignant à l'institut des sourds-muets de Boston. Il rencontra divers spécialistes de ces problèmes de sons, ayant repris les expériences d'Helmholtz.

En 1872, le succès financier du télégraphe duplex de Stearns et le quadruplex d'Edison incita Bell à faire mieux avec un système de diapasons pouvant produire un courant *ondulatoire*. Avec ce genre d'harmonica (h), équivalent à plusieurs diapasons de fréquence différente, il pensait transmettre plusieurs messages télégraphiques sur la même ligne. Ce télégraphe multi harmoniques était l'ancêtre des futurs systèmes de multiplexage en fréquence. Mais il fallait trouver un système capable de sélectionner les différents messages à l'autre extrémité de la ligne.



h Bell's Electric Harmonica.

Début 1874, Bell entendit parler des travaux du télégraphiste Gray sur les courants vibratoires. Cela le stimula, mais il n'était qu'un amateur, peu capable de réaliser des montages complexes et sans grandes connaissances électriques. Sa chance fut la rencontre avec Hubbard, passionné de télégraphie qui l'avait engagé comme précepteur pour sa fille devenue sourde et lui fournissait de l'argent pour engager un électricien et un professionnel en instruments, afin d'atteindre son objectif, le multiplex. Il rencontre alors en mars 1875 Joseph Henry, la sommité scientifique en Amérique, qui le pousse à travailler sur la transmission de la parole, ce qui rejoint ses préoccupations professionnelles.

Son projet de téléphone intéresse fortement les financiers et le 27 février 1875 un accord est conclu avec Sanders et Hubbard pour financer ses travaux en échange d'une part dans la future société d'exploitation de son procédé. Il embauche alors un assistant, Thomas Watson, et conduit ses recherches dans les deux directions parallèles, celle du multiplexage par fréquences, décidé par son financier Hubbard et celle du téléphone, où le pousse Henry comme sa passion instinctive de transmettre la voix, puisque Reis avait déjà transmis les sons musicaux.

L'invention germe

En mai 1875, il écrit à Hubbard qu'il avait trouvé un moyen de transmettre électriquement la parole *en faisant en sorte que les vibrations déterminées par le transmetteur puissent provoquer dans la résistance du circuit des changements proportionnels aux vibrations.* C'était la solution à laquelle Gray était aussi arrivé, il ne le savait pas, et ce fut la solution finale concrétisée par d'autres, trois ans plus tard, avec le microphone à charbon.

Gray utilisait une résistance liquide très peu pratique, le microphone utilisera la résistance de contact de grains de charbon, toujours actuelle. L'originalité du système Bell était dans le procédé pour obtenir cette variation de résistance, en adoptant intuitivement le phénomène électromagnétique d'induction. Il expliquait alors cette variation de *résistance* comme se produisant : *sous l'influence des extra-courants qui résultaient des rapprochements et éloignements de l'armature vibrante.* Ce n'était pas tout à fait faux.

Il construisit sur ce principe un premier appareil dont la reproduction (j) montre les deux composants : une membrane souple circulaire en parchemin vibrant sous l'effet de la voix et transmettant cette vibration à un ergot solidaire de la palette mobile d'un électroaimant.

j Premier télphone Bell -1875

Le récepteur était un appareil identique. Les bobines des deux appareils étaient reliées dans un circuit *voltaïque* comprenant une pile. Le courant continu de la pile devenait *ondulatoire* sous l'effet des vibrations de la palette de l'électro émetteur ; en traversant la bobine de l'électro du récepteur, ce courant reproduisait inversement la vibration de sa palette sur une membrane

En fait, dans notre langage, il superposait au courant continu de la pile un courant alternatif oscillant à la fréquence du son, généré par la variation d'inductance de l'entrefer variable du circuit magnétique de l'électro.

Pour un amateur, peu initié aux questions électriques, c'était étonnant, mais le plus surprenant fut la deuxième phase de son raisonnement. Il pensait que le courant continu de la pile ne devait servir qu'à aimanter les noyaux en fer des deux électros. Donc il pourrait obtenir la transmission des sons sans pile, en remplaçant le noyau de fer des électro-aimants précédents par un noyau d'acier aimant*é* (un aimant permanent).

C'était très original, il paraissait être sur une bonne voie, mais les appareils marchaient mal, et transmettaient des *sons vocaux*, pas vraiment des paroles. Néanmoins il écrivait : avoir *obtenu des résultats tellement encourageants, qu'il pouvait croire le problème bien près d'être résolu.* Peu averti du fonctionnement magnétique délicat d'un électro-aimant, il lui fallut des mois, en avril 1876, pour réaliser que son électro *boiteux*, à palette articulée, n'était pas bien adapté au problème.

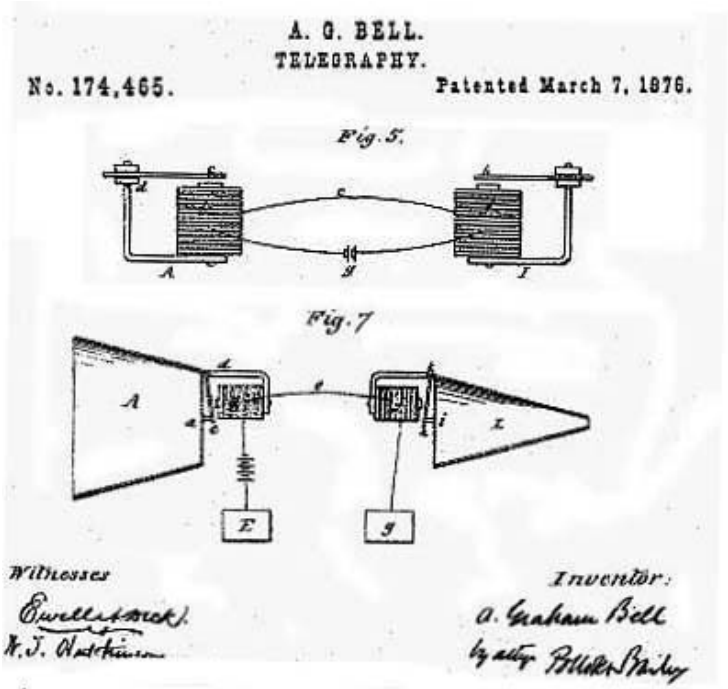
Le brevet

Bell pensait tenir une grande invention et craignait la concurrence de Gray, plus professionnel, mais ignorait que ce dernier n'attachait pas grande importance au téléphone, seulement au multiplex. Il note « *Toutefois, les résultats que j'obtins avec cet arrangement ne furent pas satisfaisants et il me fallait encore entreprendre bien des essais* ». Malgré cela il envisagea de breveter cet *arrangement* en demanda à Brown, Premier ministre du Canada, de faire le dépôt en Angleterre et en Europe. Après y avoir rencontré des scientifiques, dont l'avis était très dubitatif sur le fonctionnement et l'intérêt du système, ce dernier ne fit pas ce dépôt.

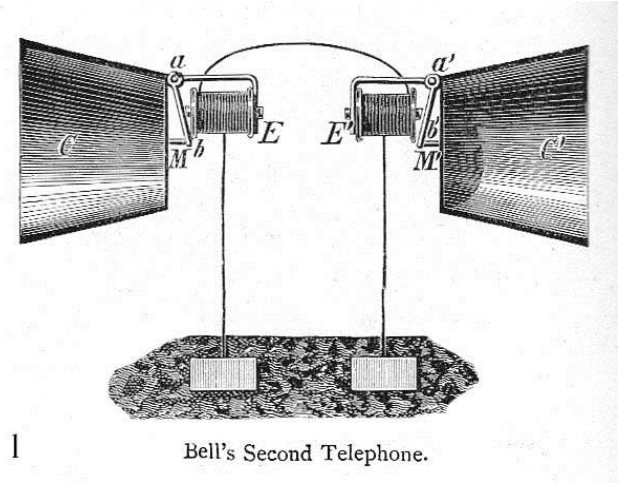
Pour le brevet aux États-Unis, Pollock, représentant juridique de Bell, déposa la demande officielle le 14 février ; le brevet fut publié le 7 mars sous le N° 174465. Normalement, le procédé n'étant pas encore au point, Bell aurait dû déposer un simple caveat, comme l'avait fait Gray.

Le brevet de Bell intitulé « *Improvent in telegraphy"* consiste d'abord en de longues considérations sur les possibilités d'un système télégraphique en multiplex, puis il insiste sur la différence entre le courants hachés (intermittents ou pulsatoires pour Reis) et les courants ondulatoires (ou vibratoires pour Gray) qu'il obtient. Précision importante, il est vrai.

L'appareil breveté (k) comprend deux éléments identiques, les électro de la fig. 5 dont les armatures mobiles articulées sont solidaires d'une membrane vibrante sur la fig. 7. Ce que des auteurs ont dénommé électros « boiteux », parce que asymétriques.


A. G. BELL.
TELEGRAPHY.
No. 174,465. Patented March 7, 1876.
Fig. 5.
Fig. 7
Witnesses
Inventor:
a. Graham Bell

k Brevet Bell - électros “boiteux”



l Bell’s Second Telephone.

Le texte précise que ces électros à noyau de fer, reliés entre eux dans le circuit d’une pile, peuvent être aussi à aimant permanent, en circuit fermé, sans pile comme le croquis (l) (3).

L’invention se concrétise

Comment Bell est-il arrivé à partir d’un principe électromagnétique séduisant, mais dont la réalisation qu’il avait brevetée fonctionnait mal, à un appareil au point en juin 1876 pour l’exposition de Philadelphie? Pour essayer de comprendre le cheminement assez confus des réflexions et essais de Bell, on peut se référer :

– Soit aux multiples publications faites sur le sujet, mais presque toujours silencieuses sur cette question, ou recopiées sur les précédentes avec leurs erreurs.

– Soit sur le mémoire que Bell avait lu le 31 octobre 1877 devant la Société des ingénieurs télégraphistes de Londres (4). Mais les inventeurs ont tendance à rédiger une histoire de leur invention, plus ou moins *arrangée*.

– Soit de préférence le *Notebook* (vol I), carnet d’expériences de Bell, pièce dont la famille avait réservé l’accessibilité pendant un siècle, jusqu’en 1976, accessible depuis 1999 (5).

Les 11 premières pages de cette précieuse archive sont un rappel des essais de juin à septembre 1875 sur le télégraphe électromagnétique, uniquement avec pile. Suivent 22 pages consignant ses essais du 19 au 24 février sur un télégraphe autographique suggéré par Watson, qu’il avait travaillé en 1874, puis abandonné.

Ensuite, il y a une interruption de 2 semaines avec mention d’un voyage à Washington, peut être pour rencontrer son agent d’affaires au sujet de l’examen en cours de la demande de brevet, accordé le 7 mars. Probablement surtout pour obtenir de l’agent des brevets le texte du caveat de Gray et modifier le sien en conséquence ? L’argent de ses sponsors Sanders et Hubbard devait y contribuer.

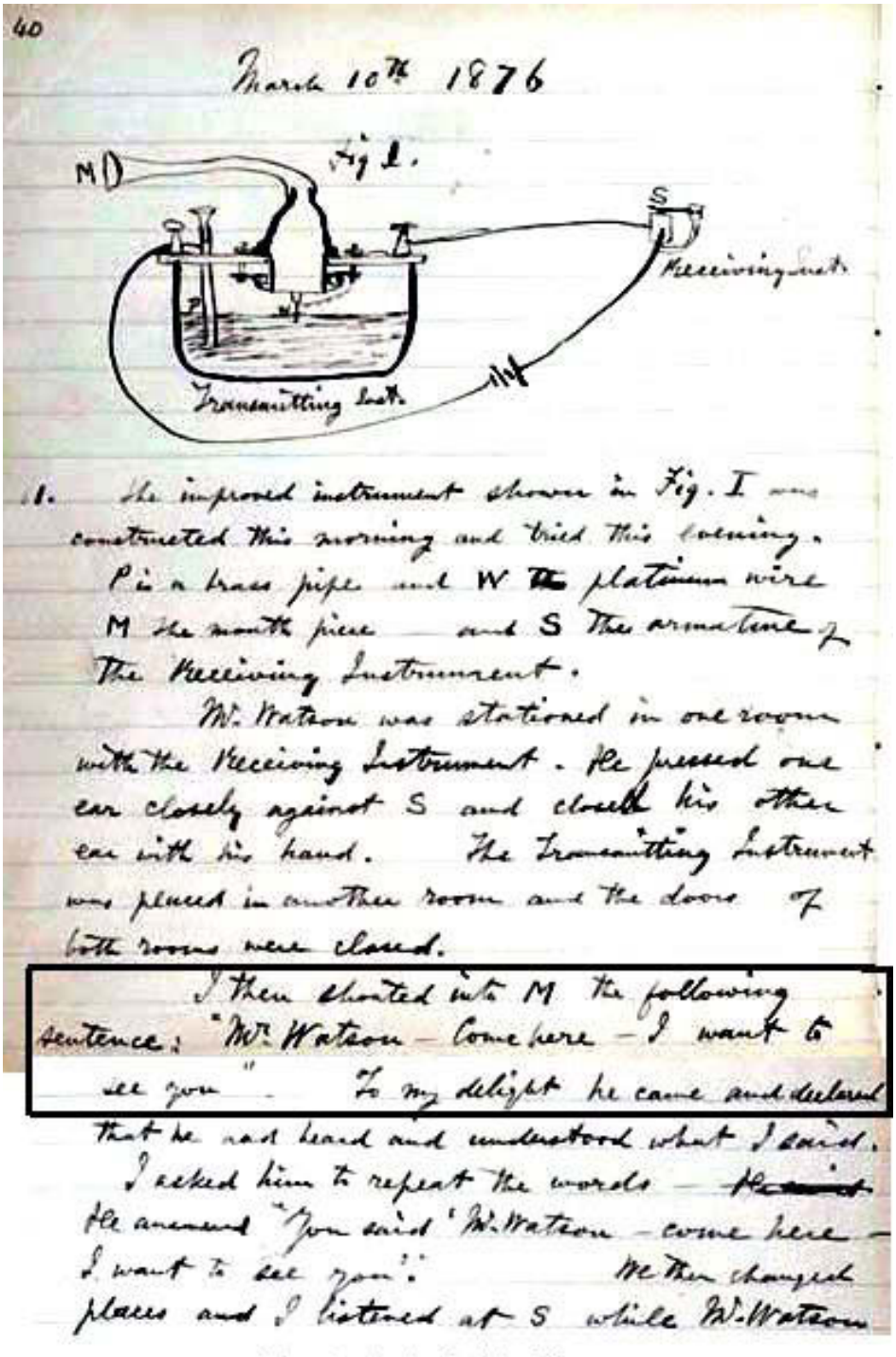
En effet, à son retour le 8 mars, il démarre subitement des travaux dans une direction totalement nouvelle qu’il n’avait jamais explorée.

À la page 39 (m), un homme parle dans une boîte fermée au fond par une membrane m sur laquelle est fixé un morceau de liège portant une tige w qui trempe dans l’eau du vase v. Le récepteur S est un électro-aimant classique relié dans un circuit avec piles d’une part à un ruban de cuivre trempant dans l’eau, d’autre part à la tige w. Lorsque la voix fait vibrer la membrane, la tige vibrante s’immerge d’une hauteur variable dans l’eau.

La résistance varie simultanément, provoquant l'ondulation du courant de la pile et la transmission du son par vibration de l'électro.

Bell note : « …*Quand Mr Watson parle dans la boîte, un bruissement indistinct est entendu en S… Quand Mr. Watson compte, je peux percevoir l'articulation - one - two - three - four - five ».*

m Notebook de Bell le 9 mars 1876



n Notebook de Bell le 10 mars

Le lendemain, 10 mars, un dispositif amélioré est essayé. (n)

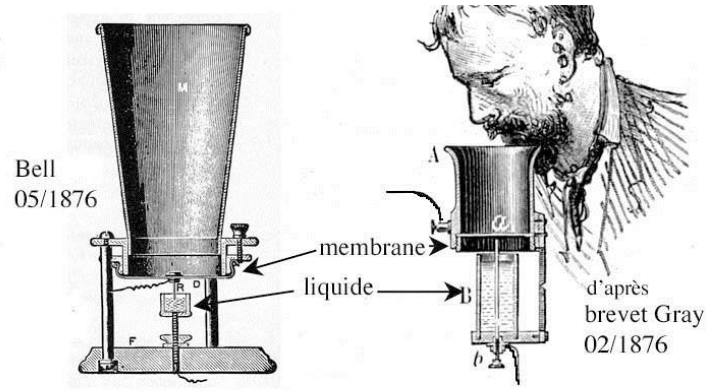
C'est alors qu'est prononcé par Bell et entendue par Watson dans une pièce voisine la célèbre phrase, consacrant le premier échange téléphonique au monde :

« *Mr Watson - come here - I want to see you* »

Ayant changé de pièce, Bell entendait mal Watson, sauf lorsqu'il scanda sa phrase :

« *Mr Bell -do -you - un -der - stand -what -i - say* »

Très satisfaits, les deux chercheurs firent ce jour-là 11 essais différents. Ils continuèrent sur le même sujet jusqu'au 15 avril des dizaines d'essais relatés sur 60 pages. En avril ou mai fut construit l'appareil (o), un transmetteur à résistance liquide variable, le premier d'une longue génération. Un porte-voix conique est fermé à la partie inférieure par une membrane vibrante, laquelle actionne une tige trempant dans le liquide, contenu dans un tube.



o Transmetteurs téléphoniques à résistance liquide

Très surprenante est l'étrange similitude de cet appareil à résistance liquide variable avec celui déposé simplement en caveat par Gray le 14 février, non transformé en brevet.

Une très probable tricherie

Le 10 mai, Bell fait une communication détaillée sur ses résultats à l'Académie des sciences et Arts de Boston. Mais avec une contradiction importante : dans l'expérience 12 de ce texte, les premières phrases échangées à distance, citées ci-dessus, auraient été communiquées en utilisant le transmetteur magnétique, celui qui fonctionnait mal. Par contre, l'expérience 13 décrit brièvement des essais exécutés avec un transmetteur à résistance liquide, lesquels ont bien transmis la voix (6).

Apparemment et sans doute réellement, Bell ne voulait pas reconnaître que les célèbres premières phrases téléphoniques échangées le 10 mars l'aient été avec un appareil à résistance liquide **copié** (?) sur celui de Gray, mais pas avec son premier transmetteur électromagnétique.

Il y a ainsi beaucoup d'anomalies dans cette découverte du téléphone :

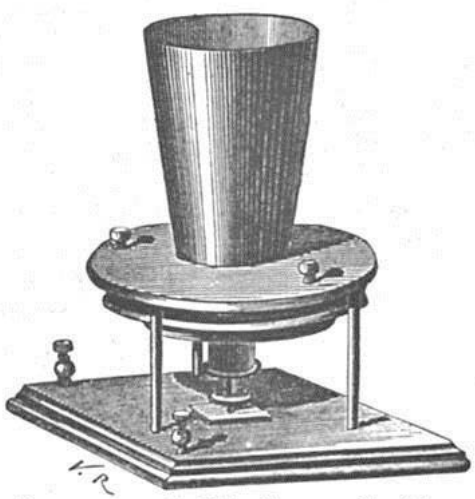
Bell prend un brevet d'un appareil électromagnétique qui ne marche pas depuis un an au moins. Il adopte en deux jours, sans aucune recherche préalable, une autre solution à résistance variable qui fonctionne. C'est exactement celle que Gray avait breveté provisoirement en *caveat*, sans l'avoir d'ailleurs testé. Il se trouve qu'elle est aussi signalée, sans croquis, dans le brevet Bell, qui jusqu'à présent n'avait essayé que des solutions électromagnétiques, pour l'émetteur comme le récepteur. D'après les vives controverses qui ont été opposées au brevet Bell, ce n'était pas un hasard ; l'agent d'affaire de Bell ou une autre personne ayant appris le dépôt du caveat de Gray deux heures après celui du brevet de Bell aurait soudoyé le préposé du Patent office pour en connaître le contenu. Il en aurait informé Bell qui est alors venu spécialement de Boston modifier son premier texte déposé, juste avant sa publication le 7 mars, en y ajoutant le procédé à résistance liquide de Gray. Ceci explique la mise au point dans les trois jours suivants du téléphone parlant de Bell, mais avec la solution proposée par Gray, ce que personne ne pouvait savoir.

Dans le brevet définitif de Bell a donc été rajouté, avec la complicité d'un agent de l'Office des brevets, ce qu'il résume dans la revendication n 4, sur *la méthode de production d'ondulations dans un circuit voltaïque continu par accroissement ou diminution de la résistance du circuit ou de la puissance de la batterie.*

Dans le texte précédent est décrit le système de Gray, la tige trempant d'une façon variable dans le liquide, *du mercure ou autre liquide.* Le mercure, trop bon conducteur ne pouvait d'ailleurs pas marcher.

Il s'avéra au cours des divers procès que la tricherie que certains soupçonnaient fort était impossible à prouver, le Notebook de Bell étant resté inconnu pendant un siècle. C'était une erreur pour sa légende de ne pas l'avoir détruit (7).

Ce fait surprenant que le premier téléphone ayant fonctionné n'était pas le système électromagnétique de Bell, mais celui à résistance variable (de Gray), est ignoré dans la plupart des récits de l'invention de l'époque et ultérieurs.

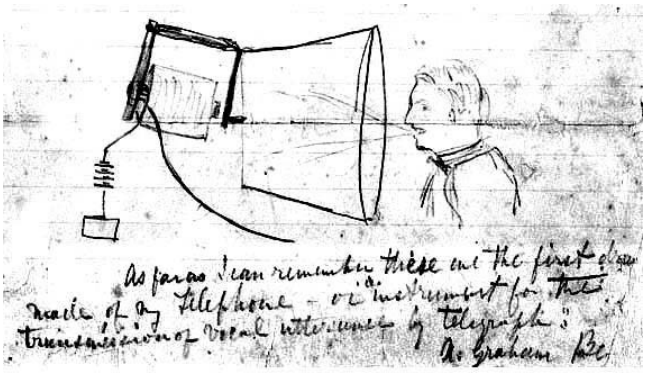


p Transmetteur Bell à résistance liquide

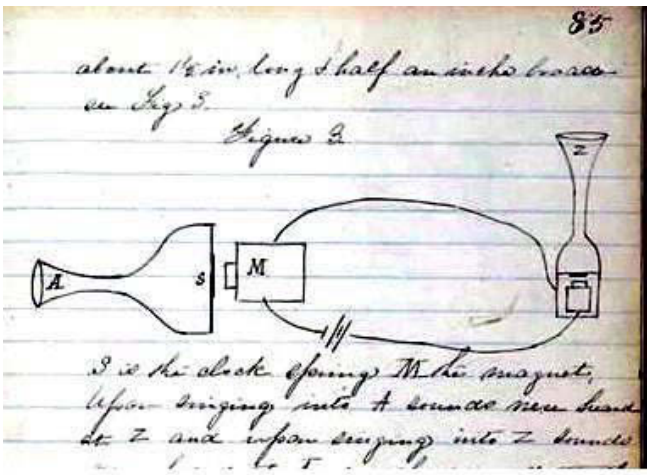
Th. du Moncel, source fiable à priori, signale simplement sans commentaire qu'un tel appareil avait été construit en mai et figurait à l'exposition. Il en donne une gravure (p) (8).

Retour au système électromagnétique

Ayant enfin réalisé un appareil *parlant* correctement, mais peu pratique avec son réservoir de liquide, Bell revint à son précédent système à électroaimant en avril. Il a dû se rendre compte que son défaut était peut-être la palette articulée de l'électro-aimant, dont la vibration devait être perturbé par l'articulation mécanique. Il remplaça alors son électro *boiteux* (q) avec circuit magnétique dissymétrique à palette articulée, par un simple noyau magnétique central, attirant un disque magnétique fixé sur la membrane souple vibrante (r). Ce détail apparemment anodin avait une importance capitale et le résultat fut positif. Cette amélioration le conduisit ensuite à supprimer même la membrane souple supportant un disque acier, en la remplaçant par un disque en acier mince pouvant vibrer. Là encore, cette nouvelle forme d'électro est celle du récepteur figuré dans le caveat de Gray (f et g). Une simple coïncidence ?



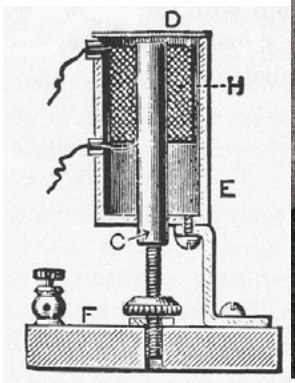
q -Transmetteur Bell à électro "boiteux - avant mai 1876



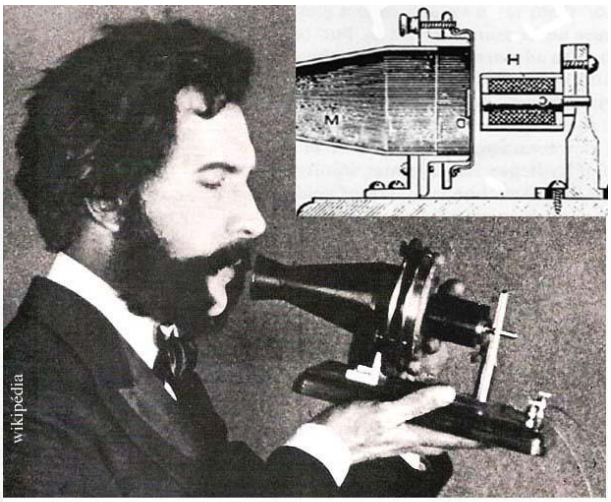
r transmetteur et récepteur à membrane magnétique avril 1876

Avec ces perfectionnements, Bell construisit en mai 1876 l'appareil à membrane de fer vibrante (s) qui donna enfin satisfaction comme transmetteur. Pour le récepteur, il crut bon de fabriquer un modèle un peu différent dont le disque D était fixé au-dessus, en un seul point (t). Il adopta ensuite le même appareil pour le transmetteur et le récepteur.

En juin 1876 s'ouvrait à Philadelphie la grande exposition commémorant le centenaire de l'Indépendance des États-Unis. Bell y présenta ses appareils dans la section du Canada, pays où s'était installé sa famille, en particulier le dernier modèle électromagnétique qui fonctionnait enfin et les précédents.



t Récepteur électromagnétique



s-Bell avec le transmetteur à membrane magnétique -juin 1876

Un visiteur important, Sir William Thomson, venu d'Angleterre, eut droit à une démonstration en passant devant le stand des télégraphes, à la section du Canada. Watson parlait dans le transmetteur et Thomson déclara avoir bien entendu dans le récepteur au bout d'une ligne télégraphique : « *To be or not to be - There's the rub* ». Il confirma à la réunion de septembre de l'Association Britannique pour l'avancement des sciences :

Cette découverte, la merveille des merveilles est due à un de nos jeunes compatriotes, Mr Graham Bell, originaire d'Edimbourg, aujourd'hui naturalisé citoyen des États-Unis.

C'était une consécration venant de ce savant, considéré comme la sommité scientifique de l'Angleterre, c'est-à-dire du monde. Il n'oubliait pas cependant de souligner l'origine anglaise de l'inventeur.

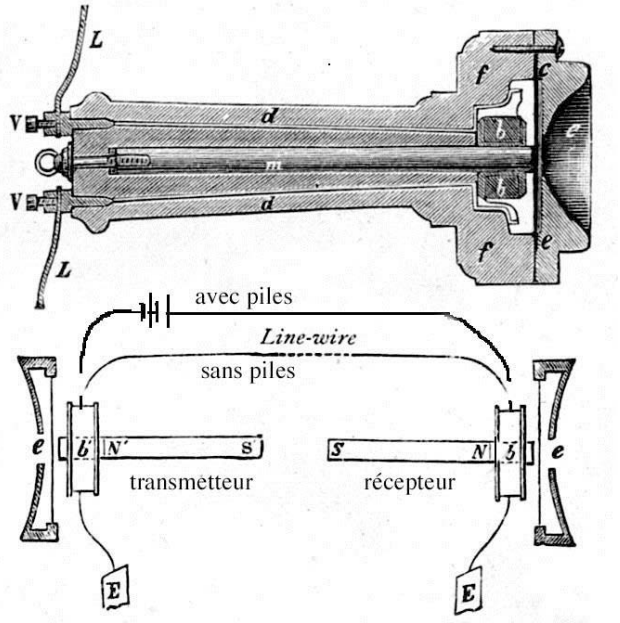
Thomson avait aussi remarqué la présentation, à la section Télégraphes des États-Unis, du transfert dans une seule ligne de quatre messages simultanément, et autant en sens inverse. C'était la réalisation du système *octoplex* essayé entre Philadelphie et New York par Gray. Peut-être celui-ci n'avait pas osé visiter le stand de Bell, car il aurait remarqué un transmetteur à résistance liquide très proche de celui de son caveat abandonné.

Il confia seulement à son associé : « *Le téléphone parlant de Bell ne suscite de l'intérêt que dans les milieux scientifiques ; sa valeur commerciale ne peut être très grande* ». Ce professionnel de la télégraphie continuait ainsi à se méprendre sur l'importance du téléphone, même devenu une réalité.

Combien de scientifiques n'ont pas réalisé l'importance de leur découverte ? La gloire en revient alors aux commerciaux ayant l'intuition ou la formation au marketing.

Pendant les mois qui suivirent, Bell continua des perfectionnements avec le même type d'électro-aimant pour aboutir au modèle définitif, *à main*, vers mai 1877, un appareil enfin au point, commercialisable.

Ce qui frappe surtout dans cet appareil à double utilisation, aussi bien en émetteur qu'en récepteur, c'est sa grande simplicité avec trois pièces principales : une bobine avec un noyau magnétique agissant sur une membrane en acier très proche. Le tout contenu dans un boîtier ergonomique, qu'une main tenait aisément devant la bouche, l'autre main maintenant un appareil identique à l'oreille.



u Transmetteur/récepteur du téléphone Bell 1877

Il y avait deux variantes (u). Un modèle dont la tige magnétique était un aimant permanent et ne nécessitait pas de pile. L'émetteur était l'application directe de l'induction de Faraday, d'ailleurs la première appliquée à la transmission de l'information. La vibration mécanique de la membrane, sous l'effet des ondes de pression de la voix transmises par l'air, provoquait une variation du champ magnétique dans la bobine, donc l'induction d'un courant transmis par deux fils au récepteur. Ce courant, pour nous sinusoïdal à fréquence variable, n'était qu'intuitif pour les inventeurs qui n'avaient aucun moyen de le visualiser, ni de le quantifier. Pour Reis, c'était un courant intermittent ou *pulsatoire*, pour Gray *vibratoire*, pour Bell *ondulatoire* – pas loin de la réalité !

Le fonctionnement du récepteur suivait le principe initié par Reis : le courant oscillant dans la bobine de l'électroaimant faisait vibrer la membrane, laquelle transmettait à l'air des compressions de fréquence variable, traduites en sons par l'oreille.

Dans le modèle à pile, le noyau magnétique pouvait n'être qu'une tige d'acier doux non aimantée et le processus était proche, les courants induits se superposant simplement au courant continu, avec cependant deux avantages appréciables : la puissance très faible était un peu augmentée et l'accessoire indispensable de tous les téléphones, la sonnerie d'appel, nécessitait à elle seule l'énergie d'une pile.

Des essais à relativement grande distance commencèrent. En juin des échanges furent réalisés avec des lignes télégraphiques entre Boston et Salem, distant de 22 Km, certainement avec un circuit à pile à cette distance.

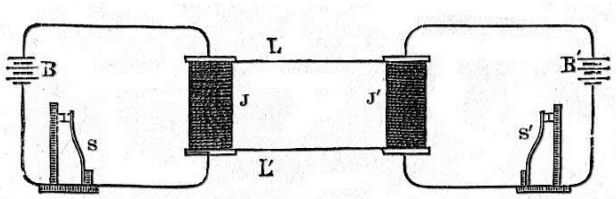
La réussite

La *Bell Telephone Company* fut créé le 9 juillet 1877 par les quatre associés déjà signataires de l'accord de février 1875, Hubbard et Sanders, qui avaient donné les moyens à Bell et Watson de réaliser l'invention. Avant d'investir les fortes sommes nécessaires à la fabrication des téléphones, mais surtout les réseaux, les associés proposèrent à la puissante Western Union, de lui céder les droits au brevet pour 100 000$. C'était un prix très faible, si l'on se rapportait aux millions que vaudrait la Bell Co, 10 ans plus tard. Pourtant, la Western qui ne croyait pas à l'avenir commercial du téléphone refusa d'acheter cette *scientific curiosity*. Il n'y a pas que les scientifiques pour se tromper sur l'avenir d'une invention.

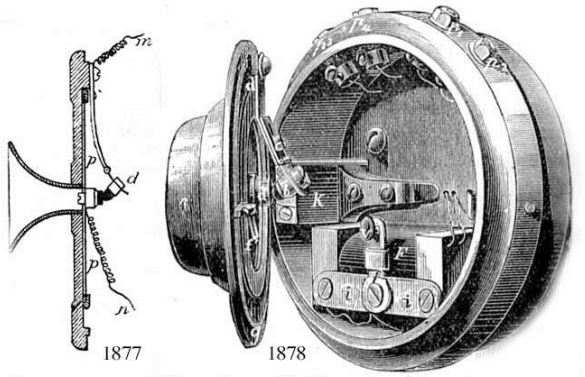
Le 11 juillet Bell épousait la jolie, mais sourde, Mabel Hubbard, fille de son sponsor et son associée depuis plusieurs années. Suivit un beau voyage en Europe. Bell quitta la Bell Co en 1879 au moment du procès avec la Western. Pendant les longues années qui suivirent, il ne s'occupa plus de téléphone, mais consacra les revenus élevés que lui versait la Bell Company à de multiples autres activités.

En 1880, la France lui décerna le prix Volta de 50 000 francs. Sans doute une compensation, car le téléphone s'y développait librement comme en Europe, le brevet Bell n'y étant pas déposé. Cette somme fut investie dans la création du laboratoire Volta à Washington. Il y développa le photophone, une invention intéressante sur le plan scientifique, consistant à transporter la voix par un rayon lumineux, grâce à la propriété photoélectrique du sélénium. Un pas vers la transmission d'information sans fil, par ondes électromagnétiques encore inconnues.

La réussite du téléphone fut consacrée par les journaux et revues à partir de l'été 1877. Mais à peine créée, la Bell Co, eut à faire face à un danger imprévu. Un jeune immigré allemand sans connaissances électriques particulières, Emile Berliner (9), avait été impressionné par le téléphone Bell vu à l'exposition du Centenaire. Lors d'une rencontre avec un télégraphiste, celui-ci lui aurait signalé que plus on appuie fort sur la *Key*, le manipulateur du télégraphe, plus le courant envoyé dans la ligne est élevé. Il imagine ainsi un transmetteur à contacts en charbon dont la pression est modulée par la vibration d'une membrane portant l'un de ces charbons, un *loose contact*. Sans l'aide d'un spécialiste, il rédige un caveat, qu'il dépose le 14 avril 1877 et transforme en brevet le 7 juillet, pensant être le premier (u2).



u2 Brevet du microphone Berliner -1877



v Microphone Berliner

La nouvelle parvint à la Bell Co qui dépêcha Watson pour le rencontrer. La sensibilité de cet appareil était nettement meilleure que celle du transmetteur Bell (v). La Bell Co racheta alors son brevet à Berliner pour 50 000 $, et l'embaucha pour sept ans. Elle ne le regrettera pas, car Berliner fit nombre d'améliorations techniques aux réseaux téléphoniques. En particulier un procédé pour supprimer l'*effet local* ou AST, sorte d'écho qui gêne l'auditeur entendant fort sa propre voix. Son transmetteur à charbon remplaça progressivement le transmetteur électromagnétique Bell.

Les procès

Le fameux brevet n° 174465 fut sans doute l'un des plus contesté aux États-Unis pendant un siècle, car il rapporta à la Bell Company 500 millions de francs en 10 ans. Ces procès étaient déclenchés à la fois par des puissances financières, par des inventeurs obscurs oubliés, et par le gouvernement des États-Unis lui-même.

En 1887, la Cour suprême confirmait en dernier ressort la validité du brevet par les voix de quatre juges contre trois. La Bell soutint ainsi plusieurs centaines de procès, 600 dit-on, pour protéger son monopole, lequel se termina quand le brevet tomba dans le domaine public en 1894.

Le premier de ces procès a eu une certaine importance pour l'évolution technique du téléphone. La *Western Union*, commençant à craindre, un peu tard, la concurrence du téléphone sur son quasi-monopole du télégraphe aux États-Unis, crée alors une filiale, l'*American Speaking Téléphone Co* pour inventer un nouveau téléphone et concurrencer la Bell Co sur son terrain. Elle va alors rechercher son ancien associé Gray et l'inventeur du quadruplex et du phonographe, Edison. Il est probable que Gray, électricien compétent, ait inspiré la solution technique et Edison, mécanicien habile, fait la réalisation. On retrouve en effet dans le nouveau transmetteur le principe de la variation de résistance de solides, plus pratiques que des liquides, des contacts en charbon.

De plus pour accroître la longueur de la ligne était insérée une bobine dans le circuit avec pile du transmetteur, solution qu'avait envisagée Gray précédemment, et qu'Edison, médiocre électricien, ne pouvait bien comprendre. La bataille juridique prévisible avec la Bell Co n'intéressait pas Gray, il laissa Edison prendre seul un brevet le 27 avril 77. Sur le terrain juridique, Edison se révéla vite un spécialiste agressif, car un autre transmetteur à charbons venait d'être breveté par Berliner et racheté par la Bell Co.

En 1879 eut lieu ce procès retentissant de la Bell Co contre la Western qui commençait à créer des réseaux fonctionnant avec son propre téléphone, équipé du transmetteur d'Edison-Gray. Il se termina par un arrangement assez obscur, tel que chaque société se réservait l'un des marchés, le télégraphe ou le téléphone, sans pénétrer sur l'autre, avec échanges de brevets et compensations financières.

Un autre procès important fut intenté en 1885 par le gouvernement des États-Unis à la Bell Co, déclarant que le brevet Bell *avait été obtenu de l'Etat par des moyens frauduleux….on a trompé l'examinateur du bureau des brevets et sa bonne foi a été surprise…contre la loi, un employé des brevets a communiqué à Bell des pièces importantes dont il s'est servi pour obtenir le brevet exclusif … la description que donne Bell de son invention est absolument défectueuse…la téléphonie appartient donc au public…un brevet accordé dans de telles conditions doit être annulé … etc.* (10)

S'il y avait eu une manipulation frauduleuse, comme certains le supposaient, l'Etat se devait de défendre son intégrité. La Bell Co eut pourtant gain de cause contre l'État, grâce à ses juristes (et ses financiers).

Le microphone à charbons

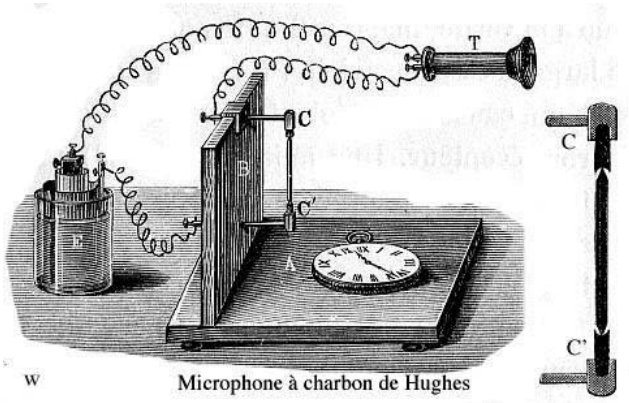
Le courant vibratoire ou ondulatoire généré par le transmetteur magnétoélectrique Bell sans pile était de l'ordre du milliampère ou moins, donc difficilement transportable au-delà de quelques km. À ce trop faible courant se superposaient les perturbations de parasites induits sur la ligne, en particulier par les circuits télégraphiques voisins. Avec une pile, on pouvait espérer aller plus loin.

Une autre solution était possible : la modulation du courant continu d'une pile traversant une résistance variable avec la voix ; solution initiée par Gray avec une résistance liquide, puis appliquée par les transmetteurs de Berliner comme ceux d'Edison, basés sur la résistance entre charbons, variable avec la pression de contact.

Cette propriété avait fait l'objet des recherches du physicien français Théodore du Moncel en 1856, sans application envisagée à priori. Un technicien du télégraphe français, Clérac, avait ainsi

fabriqué en 1864 un rhéostat à résistance variable avec de la poussière de charbon, pour être inséré dans les lignes ; plusieurs télégraphistes dont Hugues en avait eu connaissance.

Il est probable que ni Berliner, ni Edison n'étaient informés des travaux de Th. du Moncel, comme du rhéostat de Clérac. L'information au-delà de l'Atlantique par les premiers câbles télégraphiques ou journaux, transportés par bateaux mixtes à vapeur et voile, n'était pas rapide, ni complète.



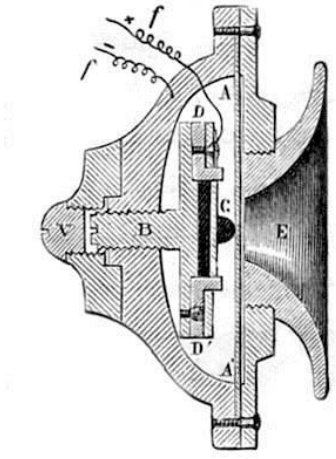
w Microphone à charbon de Hughes

La question fut reprise par Hugues, l'inventeur du télégraphe imprimant rapide en 1854. Son expérience de démonstration (w) réalisé en Angleterre en 1877 comprenait un crayon de charbon de cornue à gaz, épointé aux extrémités et maintenu dans deux cuvettes de charbon, le tout étant fixé sur un bâti rigide en bois. Le courant d'une pile traversait à la fois le crayon en charbon et le récepteur d'un téléphone.

La sensibilité du montage était surprenante, on pouvait entendre, amplifié dans un récepteur téléphonique, le bruit d'une montre posée sur le plateau, le bruit des pattes d'un scarabée courant dessus, ainsi que la voix d'une personne parlant doucement à huit mètres de l'appareil.

Sa présentation à la Royal Society en 1878 fut remarquée et Hugues considéré en Europe, surtout en France comme l'inventeur du *microphone*, d'après la découverte de Th. du Moncel, alors qu'aux États-Unis c'était le bientôt célèbre Edison. Celui-ci n'était guère apprécié par Louis Figuier qui écrivait : *M. Edison a sans doute l'esprit inventif, mais il excelle surtout à tirer parti des inventions des autres.* Il déclencha en effet une violente campagne de presse aux États-Unis contre W. Preece, directeur des télégraphes britanniques et Hughes. Ce dernier, bien que citoyen américain, n'avait pas pu développer ses inventions là-bas, déjà bloqué par le brevet Morse pour le télégraphe, puis par Edison pour le microphone. Le sage reconnu, W. Thomson, futur Lord Kelvin, choqué des propos et revendications outrancières d'Edison a écrit sur ce sujet une lettre ouverte, polie mais dure pour Edison (11).

Elle mettait fin au débat : qui a inventé le microphone à charbon ? Il était dans le domaine public, résultant des travaux antérieurs, non brevetés, de Th. du Moncel, Clérac et Hughes.



x Microphone Edison

Le transmetteur Edison, amélioré par rapport au premier modèle à plombagine, ne donnait pas une sensibilité meilleure que le transmetteur Bell avec pile et de plus, il avait l'inconvénient d'avoir besoin d'un délicat réglage par vis à l'arrière (x). En Europe ce fut une prolifération de variantes de microphones à charbons, à la suite des expériences de Hughes, reconnu comme *le père du microphone*, sans doute pour contrer l'impérialisme d'Edison.

Cette nouvelle invention capitale permit au téléphone de transmettre presque aussi loin que le télégraphe, sinon il serait resté longtemps un moyen de communication local et uniquement urbain, en attendant de trouver un amplificateur de son, équivalant au relais du télégraphe.

Le téléphone à transmetteur électromagnétique de Bell, une invention intéressante en elle même, l'application de l'induction de Faraday, disparut rapidement.

Il ne subsista que dans des cas particuliers pour de courtes distances, ou bien là où les piles étaient un handicap incontournable.

Le développement

Le succès sera rapide, mais pas, au début tout au moins comme le pensait Gray. La télégraphie poursuivit son propre développement. Le téléphone créait un nouveau marché, suivant l'intuition de Bell qui n'avait pourtant pas suivi de cours de marketing ; c'était un nouveau moyen de communication direct entre les personnes, pas anonyme comme les bureaux télégraphiques gérés par une administration. Cependant ses capacités réduites en distance entre deux postes le limitèrent à l'intérieur des villes.

La fabrication du téléphone, appareil simple, n'était qu'un aspect secondaire d'une activité dont l'essentiel était de créer un réseau de lignes entre les particuliers et des standards de connexion manuelle entre ces abonnés. La rentabilité financière était assurée par l'abonnement et le prix des communications. On ne vendait pas un simple produit, une fois, mais un service permanent.

L'*American Bell Telephone Co* fusionna avec la *Western Union* en 1885 pour devenir l'*American Telephone & Telegraph Company* ou AT&T. Protégée par son brevet, elle profita de son monopole jusqu'en 1894 pour devenir l'une des plus puissante société des États-Unis. À cette date, elle avait créé 850 réseaux urbains, desservant 256 000 abonnés, avec 500 000 km de fils, et une dizaine de réseaux interurbains

Sa richesse lui permit de créer en 1925 les célèbres *Bell Téléphone Laboratories*, les ***Bell Labs*** où ont été déposés 25 000 brevets, découvert la majorité des grandes inventions du XX^{e} siècle, dont la plus magistrale, le transistor en 1948, sans oublier les recherches de six prix Nobel.

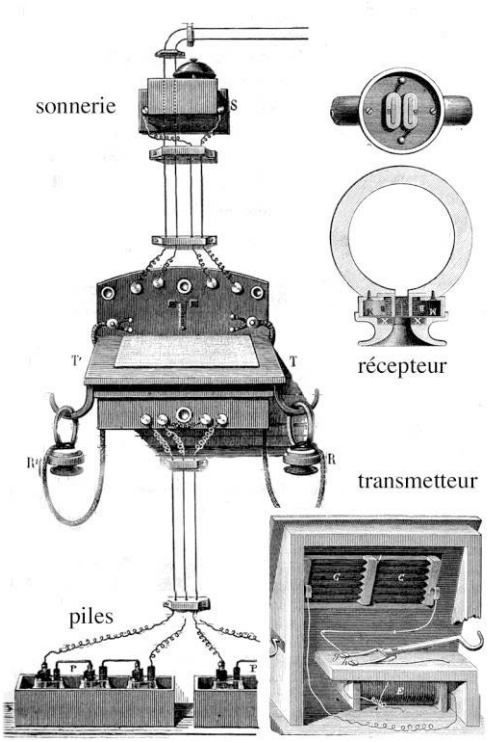
En Europe, l'apparition du microphone à charbons déclencha l'invention de multiples de modèles. Parmi les plus remarqués :

– en France, Clément Ader construisit plusieurs modèles dont le microphone était une série de crayons comme ceux de Hugues disposés sous une tablette (y).

– en Allemagne, Siemens améliora dès le début le système Bell avec un aimant double en fer à cheval (z).

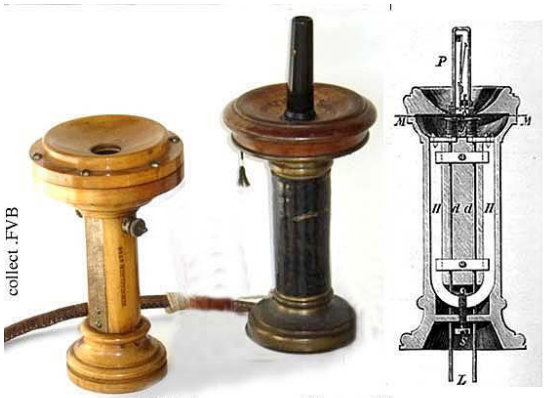
– en Suède, Lars Magnus Ericsson, conçut le *combiné*, regroupant ensemble dans la même main le transmetteur ou microphone et le récepteur ou écouteur (za).

Le téléphone se différenciait du télégraphe, ce n'était plus un moyen de communication collectif, centralisé, mais individuel entre des milliers, puis millions de personnes.



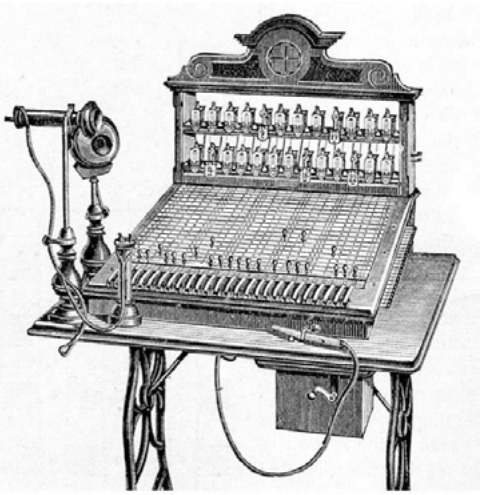
y Poste téléphonique type Ader

za Ericsson 1890

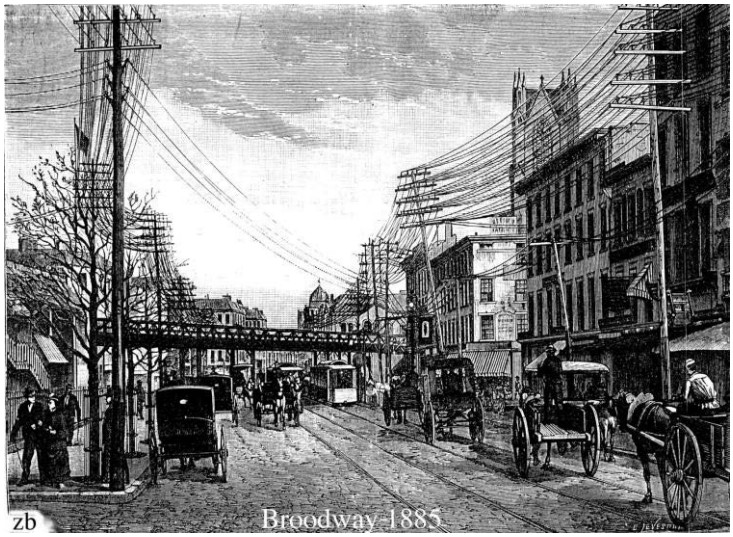


z Téléphones magnétiques Siemens

Cela entraînait pour les gérants de réseaux une quantité équivalente de fils à relier entre eux, à la demande de tous ces abonnés.



zc Commutateur Berliner pour 24 abonnés, à Hanovre

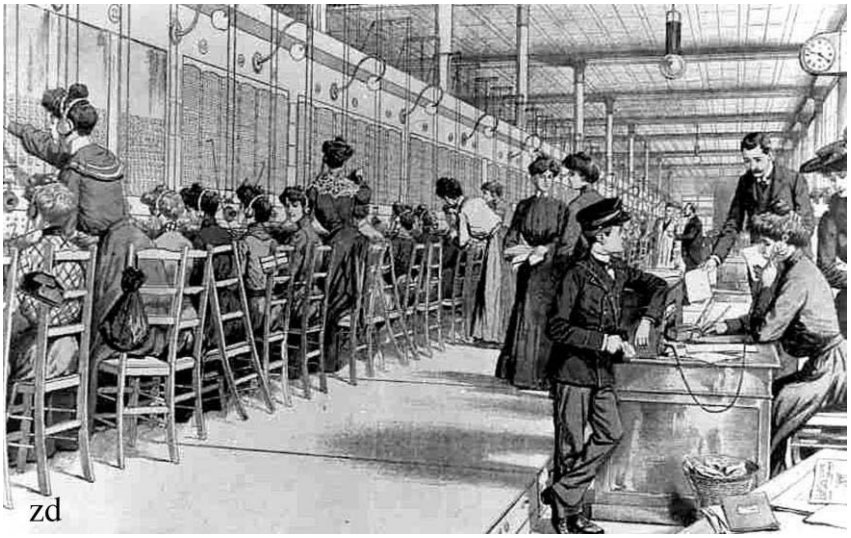


zb Broodway 1885

Au début les réseaux étaient d'abord urbains, avec seulement quelques liaisons interurbaines et les fils sur des poteaux en bois comme ceux du télégraphe, mais en nombre très supérieur, enlaidissant les villes (zb). Les enterrer coûtait cher et ce n'était pas possible de suivre l'accroissement continuel des abonnés partout.

Pour connecter entre eux ces abonnés, il fallut concevoir des *centraux* où aboutissaient des dizaines puis centaines de fils et plus. Un matériel spécifique, les commutateurs, furent inventés pour constituer les standards téléphoniques, tel ce petit standard (zc) du début. Chaque appel faisait tomber un petit volet du panneau vertical et la connexion était faite manuellement avec le célèbre *jack* de ¼'', qui existe encore aujourd'hui pour nos connexions audio.

De grands standards fonctionnaient dans les villes, tel celui de la place de l'Opéra à Paris. (zd). Contrairement aux postes du télégraphe toujours manœuvrés par des hommes, le téléphone fut exclusivement géré par des femmes, *les demoiselles du téléphone*, peut être pour une question d'agrément de la voix. Ces voix féminines ont régné sur le téléphone pendant plus d'un demi-siècle, mais progressivement remplacées par les commutateurs automatiques. Un premier système mécanique fut inventé par l'américain Strowger en 1891, suivi par les premiers cadrans en 1896. Le système *Rotary* fonctionna à Paris en 1928, et sera remplacé par les commutateurs électroniques dans les années 1970.



zd

Le courant téléphonique à haute fréquence subissait une atténuation sur les lignes longues de centaines de km. Le mathématicien anglais Oliver Heaviside calcula la propagation du courant dans les lignes ; puis le physicien américain, d'origine serbe, Michael Pupin en déduisit en 1887 l'amélioration qu'apporteraient des bobines d'induction réparties régulièrement, procédé déjà envisagé empiriquement par Gray et autres.

Pupin vendit très cher le brevet à l'AT & T Co en 1900. Plus tard on installa sur les câbles, même sous-marins, des *répéteurs* amplificateurs.

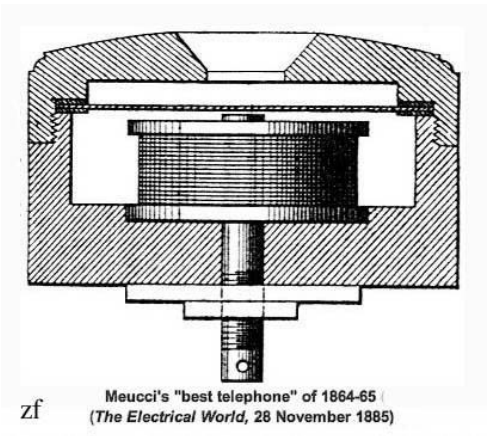
L'antériorité Meucci

Inévitablement, apparurent des réclamations et procès d'inventeurs qui auraient réalisé des téléphones avant Bell. Généralement, ce fut difficile à prouver. Un cas cependant mérite attention.

ze Téletrophono de Meucci - 1857

En 1885, trois compagnies de téléphone (12) introduisent une nouvelle demande en nullité du fameux brevet 174465, en faisant valoir l'antériorité du caveat de Gray et surtout celle d'un caveat déposé en 1871 par un inconnu, Antonio Meucci. Le *Chicago Tribune*, le *Scientific American*, l'*Electrical World*, *La Lumière électrique* publient des articles sur le sujet, avec croquis (ze).

Ce caveat 3335 de Meucci aurait été perdu par l'Office des brevets. Bell Co fait traîner le procès et l'action s'éteint avec la mort de Meucci en 1889.


zf Meucci's "best telephone" of 1864-65 (*The Electrical World*, 28 November 1885)

Un siècle plus tard, en 1989, Basilio Catania, directeur du Centre de recherches des télécoms en Italie fait des investigations approfondies sur Meucci. Après plusieurs publications, il édite en 1994 et 1996 un livre prouvant que, bien avant 1876, Meucci avait inventé un téléphone électromagnétique identique à celui de Bell (13). La question fait beaucoup de bruit dans les médias italiens et la communauté italienne aux États-Unis. Le maire de New York R. Gugliani obtient du Congrès en juin 2002, la résolution 269, reconnaissant l'invention du téléphone par Meucci et non Bell.

Meucci était un immigré italien arrivé d'abord à Cuba où son intérêt pour l'électricité l'avait conduit à l'électrothérapie, dont une expérience le conduisit à concevoir un premier téléphone. Installé à Clifton, à côté de New York en 1850, il réalise en 1855 puis 1857 un *teletrophono* qui fonctionne sur une courte distance, un mille. Il le présente en 1860, dépose son caveat en 1871, renouvelé jusqu'en 1874.

Contrairement à l'appareil de Bell qui est passé par plusieurs stades intermédiaires, les croquis de Meucci montre qu'il est arrivé aussitôt à une solution électromagnétique satisfaisante. La similitude de son appareil avec la dernière version de celui de Bell en 1877 est frappante, la bobine concentrique à l'aimant M transforme en courants induits les vibrations du diaphragme D en acier. Meucci n'envisage pas comme Bell la possibilité d'envoyer le courant continu de piles à travers le transmetteur et le récepteur, appareils d'ailleurs identiques. Il y serait probablement arrivé plus tard, pour accroître la portée trop faible de son appareil à un mille.

D'après certains documents, les recherches de Meucci auraient été plus loin que la conception de l'appareil, en proposant la résolution de plusieurs problèmes d'exploitation. Il aurait suggéré en effet un schéma permettant d'éviter l'effet d'écho local, l'*anti-sidetone* ou AST, puis un système ingénieux d'appel ainsi que la possibilité d'établir des liaisons à grande distance en insérant des bobines en série dans la ligne, ce que fera Pupin à la fin du siècle. Ces idées prouvent sa compétence sur le sujet.

Par contre, l'hypothèse faite par certains que l'appareil de Meucci aurait été copié par Bell est très improbable (14).

Cette antériorité de Meucci illustre l'histoire fréquente d'une invention oubliée, retrouvée des années plus tard par un autre, mais qui a trouvé en plus, l'énergie et les moyens pour la réaliser pratiquement, sans aller cependant jusqu'à la commercialisation.

En résumé

L'objectif principal de ce chapitre, comprendre la maturation progressive de cette invention difficile avec le peu de connaissances électriques de l'époque, est un peu masqué par l'intervention confuse de multiples inventeurs aux tempéraments et motivations contrastées, plus encore avec les inévitables imbrications financières.

Sans chercher le premier qui…, résumons donc les étapes de cette invention du téléphone :

Un émetteur ou transmetteur doit convertir les sons de la parole en courant électrique, qu'un récepteur éloigné doit à l'inverse reconvertir en sons.

La voie est ouverte par Reis dont l'émetteur mécanique génère un courant reproduisant mal tous les sons, seulement la musique ; par contre son récepteur à électro-aimant vibrant est valable. Ses suiveurs conserveront le principe de ce récepteur, mais en faisant vibrer l'électro-aimant devant un mince disque d'acier plutôt qu'une caisse de résonance en bois.

Tout le problème reste dans la conception de l'émetteur. Deux voies seront explorées : l'une électromagnétique, l'autre à résistance variable.

La première consiste à générer un courant induit à la fréquence du son dans une bobine à noyau d'aimant permanent, très proche d'une membrane vibrante en acier.

Elle est séduisante pour l'électricien par sa simplicité et sa réversibilité, elle permet d'avoir un récepteur identique à l'émetteur, mais sensible aux parasites et sa portée est limitée à peu de km. C'est la voie adoptée par Meucci, probablement dès le début. Bell l'adopte aussi après de longs détours, mais avec une forme d'électro-aimant mal adapté, et le courant obtenu est la superposition du courant ondulatoire induit au courant continu d'une pile. Il s'aperçoit qu'il peut aussi transmettre sans pile, par le seul courant induit. Ce n'est qu'après avoir essayé l'autre procédé à résistance variable qu'il revient au précédent avec une forme d'électroaimant corecte.

La deuxième voie, une résistance variable dans un circuit voltaïque est initiée par Gray avec un liquide, de l'eau, c'est vraiment peu pratique. Il ne l'essaye même pas, peu convaincu de son intérêt. Son challenger Bell le fait discrètement avec Watson et constate qu'elle fonctionne et fonde dessus son brevet.

D'autres, Berliner, Edison, Hugues adoptent ensuite cette voie, mais avec une résistance solide en grains de charbon, variant par la pression de contact entre les grains, elle-même fonction de la force du son.

Ce microphone à charbon répond bien au problème du téléphone, il sera adopté pendant plus d'un siècle.

Finalement, toute cette agitation, surtout aux États-Unis, pour être l'inventeur reconnu du téléphone était devenue sans objet puisque les millions de téléphones qui ont fait communiquer le monde pendant des décennies fonctionnaient avec un microphone à charbon dû à au moins quatre ou cinq inventeurs, et un écouteur à électroaimant à paternité aussi multiple, issu de l'électro-aimant de Reis.

Malgré cela, Bell et Watson bénéficieront seuls d'une partie des très importants profits d'un brevet, grâce à l'habileté juridique et financière de leurs sponsors.

L'exemple sera parfaitement compris par le futur brillant industriel de l'époque, Edison, l'un des inventeurs de la lampe à incandescence. Il comprendra qu'il faut consacrer plus d'argent au service juridique qu'au service recherches.

Quel est l'inventeur du téléphone ? Le lecteur aura là encore un choix difficile entre Reis, Gray, Bell, Berliner, Edison, Hughes, Meucci ?

Au XX^{e} siècle

Le *microphone à charbon* régnera presque seul sur le téléphone, puis la radiophonie. Il disparaîtra progressivement à la fin du siècle.

Pour ses meilleures qualités musicales, le transmetteur électromagnétique, devenu le *micro dynamique* réapparut après WW2 pour la radio et toutes les reproductions musicales. Son handicap, une puissance très faible, n'étant plus un obstacle avec la généralisation des amplificateurs électroniques d'abord à lampes, puis à transistors. Le terme *microphone ou micro* devint générique, désignant tout système de transmetteur ; quant au récepteur, il devint l'*écouteur*, puis après amplification, le haut-parleur.

Le haut-parleur, devenu *bafle*, puis *enceinte*, utilisera toujours le principe adopté par Reiss, un électro-aimant faisant vibrer une membrane, mais avec maints perfectionnements.

Un autre micro est apparu, à *condensateur*, peut-être inspiré par l'invention en 1880 d'un récepteur à condensateur, qui ne fut pas exploité à l'époque.

En 1964, J. West et G. Sessler inventent au Bell Labs le *micro à électret*, perfectionnement du récepteur à condensateur. Ce micro miniature est fabriqué maintenant à des milliards d'exemplaires pour le téléphone portable. L'argent du brevet Bell, gagné très probablement par une tricherie, a été bien placé dans la recherche au Bell Labs.

Chiffres et usages

En 1883, aux États-Unis, 112 villes avaient un réseau desservant 41 000 abonnés. En Europe, 161 villes avec 30 000 abonnés. La Grande -Bretagne avait 75 villes équipées, l'Allemagne 21 villes, la France 18 villes.

Neuf ans plus tard, en 1892, l'Allemagne avait 391 villes équipées desservant 86 000 abonnés avec 166 000 km de fils. En France, 207 villes desservant 82 000 abonnés

Ces chiffres témoignent de l'essor très rapide de ce nouveau moyen de communication. Son développement accompagnait celui du télégraphe, mais pour un nouveau genre de communication directe, par la parole entre les individus. Contrairement au télégraphe, l'inconvénient de ne pas laisser de traces n'en est plus un pour la communication personnelle, amicale et domestique, plutôt même un avantage. Après 1960, on pourra néanmoins enregistrer le message sur magnétophone à fil, puis à bande magnétique, plus tard sur un répondeur-enregistreur.

Le téléphone deviendra un indispensable outil de travail dans les entreprises, les administrations et les services pour leur communication interne. Ce sera aussi bien l'instrument des amoureux, celui des hommes d'affaires, ou encore de la sécurité indispensable à la police, comme aux pompiers.

Épilogue

Après 140 pages consacrées au téléphone, Louis Figuier conclue en 1883 dans *Les nouvelles conquêtes de la science* :

« Il n'y a qu'un point de notre sujet qui soit resté dans l'ombre : c'est la théorie, la théorie qui illumine les faits de ses puissantes clartés…Qu'est-ce, en effet que le téléphone ? Un instrument qui transforme le courant électrique en courant ondulatoire. Celui qui produit des inflexions sonores identiques à celles que la voix a émises. Mais quelle est la nature des courants ondulatoires, quelle est leur cause quels sont leurs rapports avec l'électricité ? Autant de questions qui ne trouvent pas de

réponse, autant de problèmes qu'aucun physicien de nos jours n'est en état de résoudre…nos physiciens se taisent. En cela, ils se conforment au principe philosophique qui a été posé par Newton, qu'il faut souvent renoncer à pénétrer la cause intime des phénomènes qui se passent au sein de la matière, et se contenter de rechercher les lois de leur manifestation, pour en tirer parti, si on le peut ».

Figuier n'aura pas besoin d'une longue attente pour comprendre ces courants ondulatoires. Le courant alternatif, considéré comme une anomalie sans intérêt, va subitement devenir dans ces années 1880 la clef d'un nouveau monde électrique. Praticiens et physiciens, après s'être familiarisé avec les basses fréquences de 50 et 60 Hz, exploreront ensuite les fréquences plus élevées, les *ondulatoires* qui intriguaient Figuier, et en montant encore plus haut, arriveront au seuil d'un autre monde encore plus étrange, celui des ondes électromagnétiques, comme le lecteur aux chapitres suivants.

Compléments

0 - Parmi les nombreux livres et documents, le plus classique, en français est :

THÉODORE DU MONCEL, ***Le téléphone, le microphone et le phonographe,*** Bibliothèque des merveilles, Hachette, Paris,6 éditions de 1878 à 1887.

Accessible sur URL http://gallica2.bnf.fr/

1 - Publications de DAVID A. HOUNSHELL — Email : hounshell@cmu.edu

Elisha Gray and the Téléphone : On Disavantages of Being an Expert, Technology and Culture, Vol. 16, n° 2, april 1975, p.133-161.

Bell and Gray : Contrasts in Style, Politics, and Etiquette, Proceedings of IEEE, vol. 64, n° 9, sept. 1976, p.1305-1314.

Two Paths to the Téléphone, Scientific American, vol. 244, n° 1, janv. 1981.

L'invention du téléphone, Pour la Science, n° 41,mars 1981, p.54-61.

*Elisha Gray et le téléphone…,*Culture technique, n° 10, juin 1983, p. 43-59.

2 - le caveat de Gray est accessible sur :

URL http://inventors.about.com/od/gstartinventors/a/Elisha_Gray_2.htm

3 - le brevet de Bell est accessible sur :
http://inventors.about.com/library/inventors/bltelephone1.htm

4 - le mémoire de Bell a été édité dans La Nature, n° 256, avril 1878, p. 337.

accessible sur URL http://cnum.cnam.fr

5 - le Notebook de Bell est accessible sur le site : *American Treasures of the library ot Congres*
URL http://www.loc.gov/exhibits/treasures/trr002.htlml

6 - Communication de Bell du 10 mai 1876 : *Proceedings of American Academy of Arts and Sciences, vol XII-1, Researches in telephony*. Document reproduit par *Turning Points in American Electrical History,* ed. James E. Brittain, IEEE Press, 1976.

7- Livre récemment édité par le journaliste américain :

SETH SHULMAN :*The Téléphone Gambit : Chasing Graham Bell's secret.* W.Norton& Co Inc, 2008

8 - TH. DU MONCEL, *Histoire de la découverte du téléphone,* La Lumière Électrique, t.VI, n° 5, 4 fevr. 1882, p.97-102.

9 - Emile Berliner, inventeur discret, a rendu pratique le phonographe. Cet appareil est considéré comme inventé par Edison, qui l'a réalisé en 1877, alors que Charles Cros, poète et inventeur atypique

français, avait seulement déposé le projet du même appareil à l'Académie des Sciences, la même année. C'est encore une co-invention par des contemporains qui s'ignoraient.

Mais le phonographe ne pouvait guère être commercialisé avec son enregistrement gravé sur un cylindre de cire puis d'étain, unique, non dupliquable.

Berliner inventa en 1887 le **gramophone**, où la gravure se faisait sur disque plat dans une matière reproductible en série sur différents supports, l'ancêtre du CD.

10 - Procès du gouvernement E-U contre Bell Co :

Lumière Electrique, avril 1885, p.384.

11- Lettre de W.Thomson sur Edison, in *Le Téléphone,* Th du Moncel, p.201 :

Extraits : « …une *réclamation de priorité accompagnée d'accusations de mauvaise foi qui a été lancée par M. Edison contre une personne dont le nom et la réputation sont depuis longtemps respecté dans l'opinion publique.…il aurait pu établir sa réclamation en montrant avec calme la grande similitude entre son téléphone à charbon et le microphone de Hugues qui l'avait suivi … Mais par son attaque violente contre MM Preece et Hugues, en les accusant de piraterie, de plagiat, et d'abus de confiance, il a ôté tout crédit à sa réclamation aux yeux des personnes compétentes…le principe physique appliqué par M. Edison dans son téléphone à charbon et M. Hugues dans son microphone est le même…également le même que celui employé par M. Clérac dans son tube à résistance variable qu'il avait donné à M. Hugues et à d'autres en 1866 pour utilisations pratiques… appareil dérivé du fait signalé il y a longtemps par M. du Moncel… »*

12 - Procès Meucci

Ce procès a été déclenché par trois sociétés : *Globe Telephone Co* de New York, *Washington Telephone Co* de Baltimore et *Paneterie Co.*

13 - CATANIA BASILIO, *L'inventorie e il sou tempo,* Seat-Divisione STET, vol 1, Rome 1994, Vol. 2, Turin, 1996.

14 - Bell a-t-il plagié Meucci

L'analyse de la démarche inventive de Bell a montré qu'il avait adopté le principe électromagnétique après de longs essais de diapasons, puis début 1876, avec des électro-aimants boiteux, qui ne donnaient pas satisfaction. S'il avait connu l'électro de Meucci avant février 1876, il n'aurait certainement pas déposé son brevet avec un système qui ne marchait pas. Ce n'est qu'en mai qu'il a adopté la bonne conception d'électro cylindrique agissant sur une mince membrane en acier, comme celui de Meucci, forme qu'il a adopté parce qu'elle était classique. C'était d'ailleurs celle de l'électro du récepteur de Gray qu'il connaissait bien, proche de celui de Reis.

Dans les hypothèses émises sur ce présumé plagiat, il est aussi question que Bell aurait travaillé dans un laboratoire de la Western où il aurait examiné le prototype « perdu » de Meucci. On ne voit pas ce que Bell, travaillant à Boston aurait été faire dans un laboratoire de la Western à New York, alors que son brevet de téléphone était acquis depuis 1876 et il ne s'intéressait plus au duplex, seule question essentielle pour la Western.

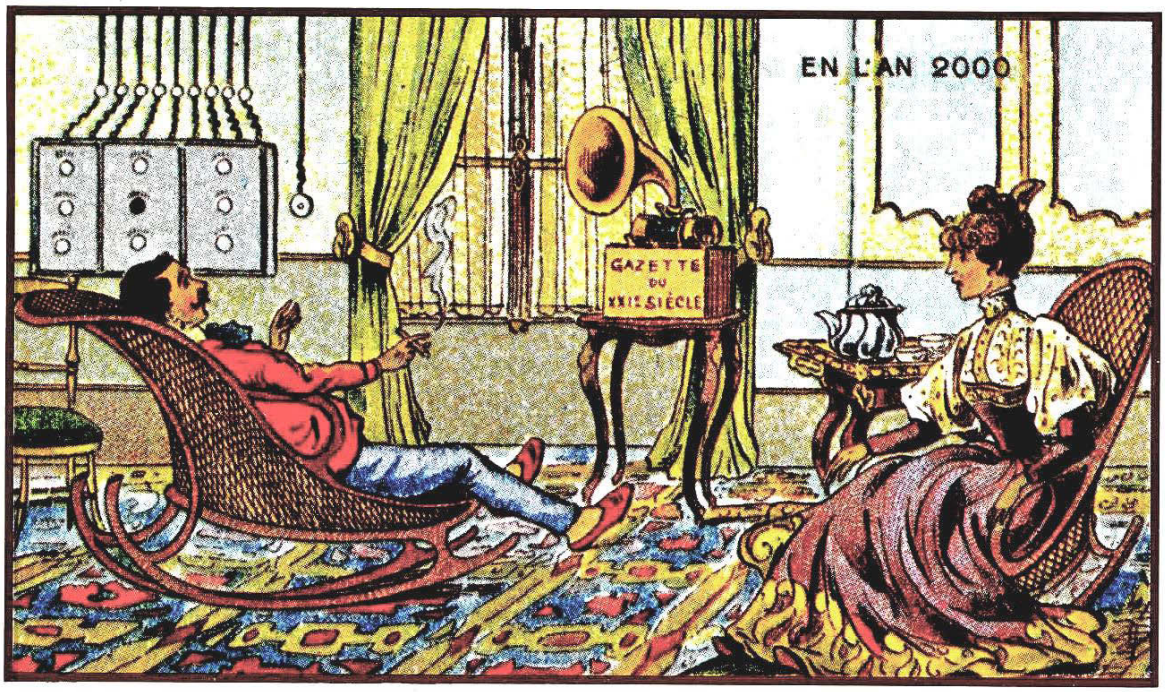
De même, une manœuvre supposée de la Western, laquelle n'aurait pas vraiment perdu, le prototype que lui avait confié Meucci en 1874 est assez invraisemblable ; pour en faire quoi ? vu qu'en 1877 elle ne croyait pas encore à l'intérêt commercial du téléphone, refusant même la proposition de Bell à un prix dérisoire.

Il n'y a pas lieu de faire un véritable thriller avec cette double invention, bien classique, alors que la solution électromagnétique de Meucci et Bell ne fut pas la bonne, malgré son ingéniosité technique ; ce fut celle de la résistance variable de Gray, Hugues, Edison et autres, avec le microphone à charbon.

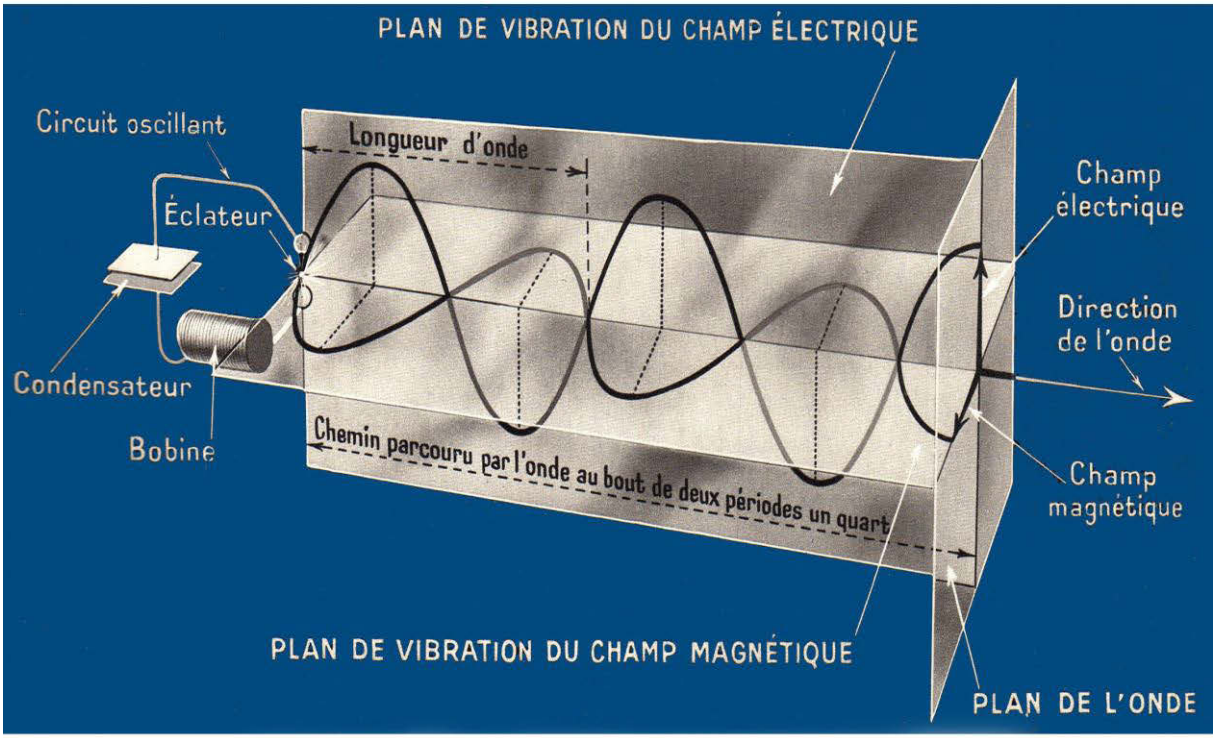
La personne qui aurait pu avoir le plus de regret dans cette invention, après la réussite financière de Bell, est plutôt Gray, s'il avait transformé son caveat en brevet, comme le responsable des brevets

le lui suggérait. Il avait la compétence, un appareil qui fonctionnait bien et proche de la solution finale du microphone à résistance variable en charbon. Mais les joutes juridiques ne l'intéressaient pas.

15- Figuier. Les milliers de pages écrites par ce passionnant vulgarisateur scientifique et technique, sur tous sujets, révèlent parfois quelques déficiences théoriques, excusables. Il est bon de vérifier parfois ses explications techniques sur d'autres sources.

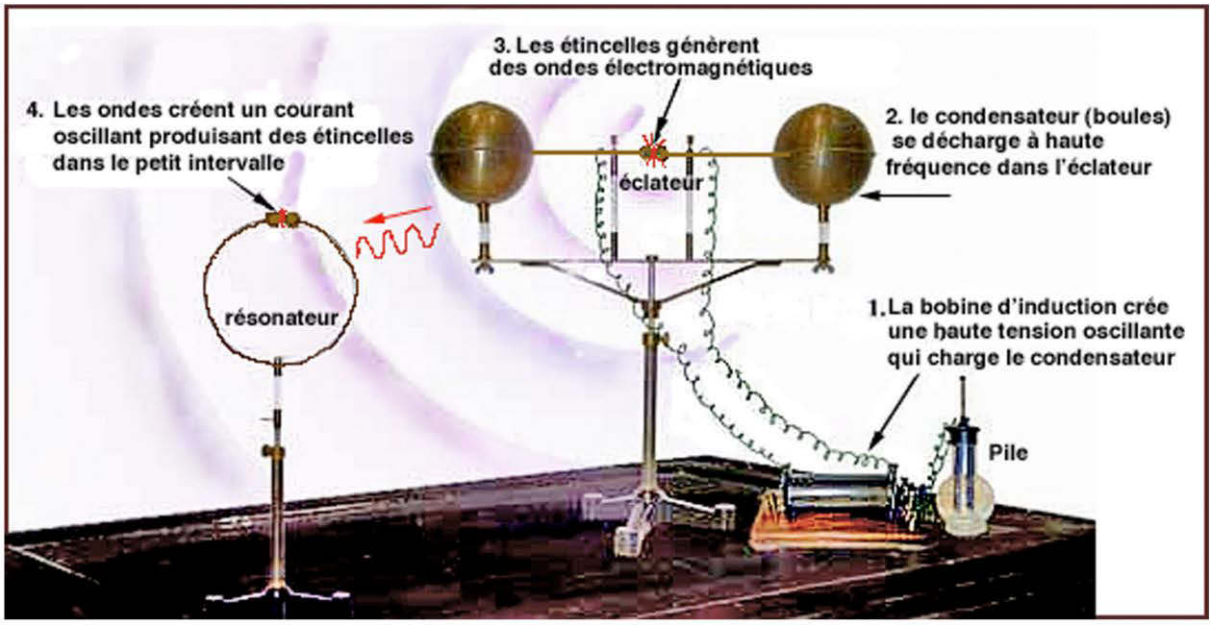


Audition du Journal. 1885



La lumière consiste en des vibrations transverses du même milieu qui transmet les phénomènes électriques et magnétiques

Maxwell



Hertz

3 - Les ondes électromagnétiques

Propagation des phénomènes physiques à distance

Deux siècles avant l'électricité, Newton avait découvert que toute masse attirait une autre masse avec une force se transmettant instantanément dans l'air ou le vide interstellaire. On ne connaît pas encore aujourd'hui le mode de propagation de cette action à distance, la gravitation, malgré les recherches et théories approfondies d'Einstein.

La découverte des ondes électromagnétiques est l'aboutissement de découvertes, calculs et réflexions de mathématiciens et physiciens, pour comprendre comment pouvaient se propager instantanément les phénomènes électriques à distance :

– Au XVIII$_{e}$ siècle, les physiciens approfondissent les phénomènes naturels du magnétisme et de l'électricité statique, provoquant aussi des actions à distance, que Coulomb mesura et calcula. Ces forces suivaient une formule semblable à celle de la gravitation. Étrange ! On ne se posait pas encore de question sur le processus de transmission de ces forces qu'on supposait instantané, c'est tout.

– 1820, Ampère calcule et mesure la force magnétique s'exerçant entre deux conducteurs parcourus par un courant quelle que soit leur disposition relative. Il suppose que cette force se transmet instantanément comme dans les cas précédents et, sans approfondir, suggère simplement qu'elle était *le résultat des mouvements du fluide qui remplit l'espace.*

– 1831, Faraday découvre l'induction, l'apparition d'un courant dans un circuit, éloigné d'un autre circuit inducteur parcouru par un courant variable. Mais cette fois, pour comprendre comment se transmet cette nouvelle action à distance, qui n'est plus une simple force s'exerçant entre deux éléments, il arrive à l'hypothèse d'une modification de l'espace environnant, caractérisée par des *lignes de force* de ce qu'il ne nommait pas, un champ magnétique, dans un milieu occupant l'espace vide.

Il travaille des années pour comprendre ce mode de propagation à distance qu'il approche qualitativement, mais son inaptitude à se servir de l'outil mathématique, *le langage de la Nature,* lui fait défaut pour le quantifier. En ayant fait avancer la réflexion sur ces actions à distance, dont on ignorait le processus, il devenait lui aussi un poseur de question sans réponse, comme ses prédécesseurs, Galvani, Oerstedt, Arago.

Le successeur de Faraday sur ce problème, James Clerk Maxwell, va donner la réponse, établissant brillamment en quelques années (1861-1873) la fort complexe théorie mathématique de l'électromagnétisme.

Maxwell (1)

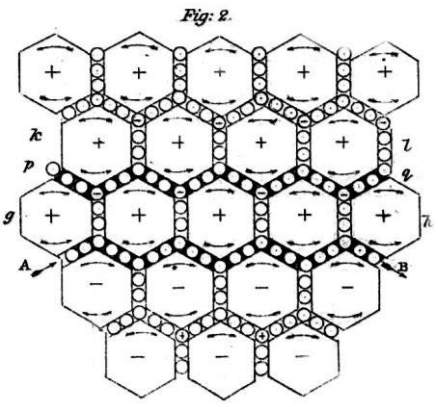
Après des études dans les meilleures institutions britanniques, ce physicien et mathématicien écossais poursuivit une carrière universitaire lui permettant des recherches sur différents thèmes, cependant son objectif permanent a été de trouver par les mathématiques l'explication globale, causes et fonctionnement, de l'électromagnétisme découvert par Ampère et Faraday.

Il y travailla avec une méthode très personnelle et atteignit un résultat théorique qui nécessitera des années pour être rendu accessible par ses suiveurs et ensuite confirmé expérimentalement vingt ans plus tard.

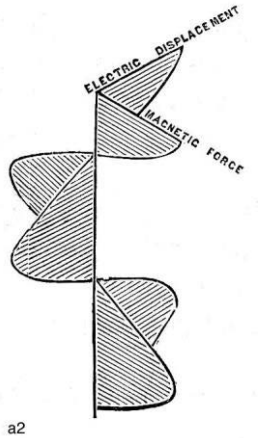
A l'époque de ses travaux au milieu du XIXe siècle, 1855 - 1879, l'électricité n'était encore qu'adolescente - pas encore d'application énergétique, faute de moyen de production adapté – essentiellement une première grande application en développement dans le domaine de l'information, le télégraphe électrique. On ignorait pratiquement le courant alternatif, qui sera le principal bénéficiaire des travaux de Maxwell, en fin du siècle.

Il précisera d'abord la notion de champ électrique créé par des charges au repos, l'électron qu'on ignorait encore, et de champ magnétique créé par le déplacement de ces charges.

Pour interpréter le champ électromagnétique dans son analyse des lignes de force de Faraday, il se laisse guider par son imagination fertile. Elle lui fait dessiner des modèles mécaniques n'ayant aucun rapport avec une réalité inconnue, mais qui l'aident à raisonner. Ainsi le modèle des tourbillons, (a1) les hexagones du croquis figurent le champ magnétique et les petits roulements qui les séparent, le courant. Après une longue quête, il arrive à formuler mathématiquement le processus de propagation simultanée des forces électriques et magnétiques HF à distance, qui sont alors véritablement entrelacées à 90° dans la même onde (a2). Lorsque qu'une variation brusque affecte ce champ électromagnétique, une perturbation se propage dans le milieu environnant, l'éther, à une vitesse très élevée mais finie, sous forme d'ondes analogues à celles que provoque la chute d'un caillou dans l'eau, ou mieux du son dans l'air.



a1 Modèle imaginaire du champ magnétique d'un courant



a2

Les équations

Maxwell a réussi à décrire mathématiquement la propagation à distance des phénomènes électriques et magnétiques, par une étonnante synthèse les théorèmes de ses trois prédécesseurs, Gauss, Ampère et Faraday qui décrivaient chacun un phénomène électrique particulier.

Cela nécessita **vingt équations** différentielles à vingt inconnues, nombre élevé résultant de ce qu'un point de l'espace était identifié par ses trois coordonnées dans la formulation du mathématicien Hamilton. Plus tard, Heaviside les réduira à quatre équations en utilisant les notations vectorielles.

Ces équations constituent le socle de l'électricité, elles vont aider à découvrir la constitution de la matière, au début du siècle suivant.

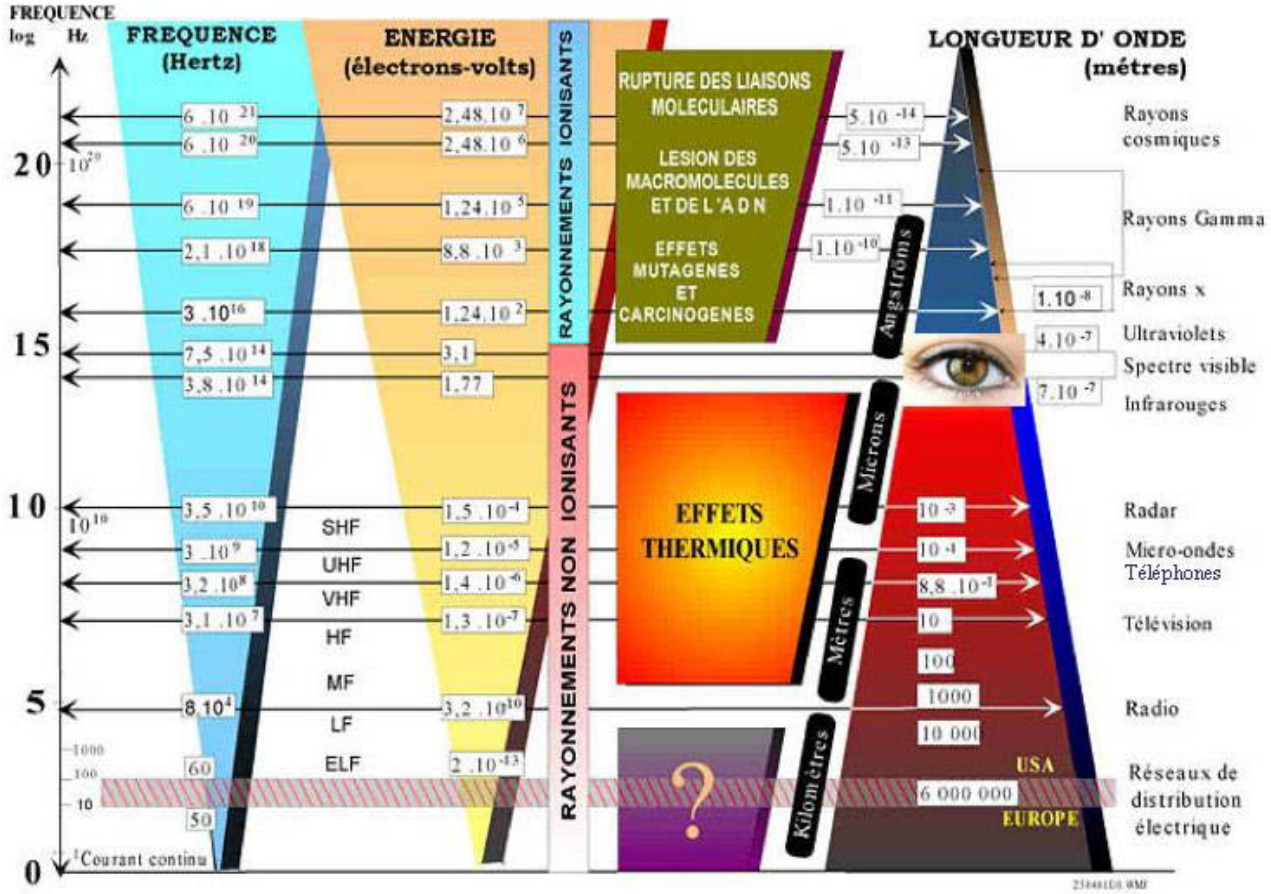
Cependant, elles ne seront que rarement utilisées directement par les électriciens, seulement par les théoriciens, sous la forme de formules pratiques qui en sont déduites, telles que :

- L'énergie accumulée dans un condensateur : $W = ½ C. U^2$
- L'énergie accumulée dans une inductance : $W = ½ L. I^2$
- Le travail d'un courant dans un champ : $dT = I\, d\Phi/dt$

La lumière est une onde électromagnétique

L'intuition de Faraday l'avait amené à faire, en 1845, une expérience révélant que la *lumière réagissait au magnétisme*, l'effet Faraday, resté sans explication (I-5).

La nature ondulatoire de la propagation des perturbations électromagnétiques découvertes par Maxwell, l'incitait à les assimiler aux phénomènes lumineux (b). Cela devint une certitude lorsqu'il entreprit des travaux dans un tout autre domaine, la définition des systèmes d'unités électriques. Cet épisode mérite une parenthèse, car il montre comment le chemin vers une découverte passe souvent par des travaux dans un domaine différent.



Des unités pour exprimer les grandeurs électriques

La technologie majeure du siècle, la mécanique, avait nécessité d'en définir avec précision les unités de mesure. Elles découlaient de trois unités de base, la longueur en **centimètre**, la masse en **gramme**, le temps en **seconde.** D'où le système **CGS** des physiciens, dont les ingénieurs avaient dérivé des unités pratiques, telle la puissance en cheval-vapeur (ch ou hp)

L'électricité avait permis une application d'importance, la télégraphie, nécessitant la définition d'unités pour les grandeurs électriques. Deux écoles s'affrontaient sur le sujet, les Anglais souhaitant définir des unités « absolues », dérivées des trois unités mécaniques CGS, les Allemands des unités relatives définies par un étalon matériel reproductible très précis. Les premiers étaient dirigés par Thomson, grand maître de tous les problèmes de mesures difficiles, les seconds par les frères Siemens, Werner en Allemagne et Wilhelm en Angleterre.

Une commission est créée en 1861, *Committee of Electrical Standards*, présidée par Thomson et animée par Maxwell, qui venait d'être nommé au *King's Collège.*

L'objectif principal était la détermination de l'étalon de résistance électrique, grandeur essentielle pour le déroulement des câbles télégraphiques transocéaniques, la localisation exacte par une mesure de résistance, d'un défaut survenant sur un câble, long de centaines de milles. Cette mesure consistait à insérer la résistance du câble dans un pont de Wheatstone et de la comparer avec une résistance connue très précisément, car une erreur de quelques pour cent signifiait une erreur de localisation de plusieurs dizaines de milles.

L'équipe du comité fut amenée à concevoir des expériences complexes, mais facilement reproductibles pour définir cette unité absolue, alors que Siemens proposait simplement son étalon de résistance, celle d'une colonne de mercure de hauteur et section définie. Lors du premier Congrès international des Électriciens, de 1881, le problème n'était pas encore bien résolu (III-4).

Mais tous ces travaux donnaient lieu à des retombées intéressantes dans d'autres domaines et Maxwell le comprit bien, car c'était une source d'amélioration et même confirmation de sa théorie électromagnétique en construction.

Dans son article de 1863, reproduit dans le *Treatise* de 1873, il introduisait la ***notation dimensionnelle*** des lois et équations électriques. Les trois unités fondamentales, longueur, masse et temps étant désignées par **(L), (M) et (T),** les grandeurs physiques figurant dans les équations sont aussi définies par ces mêmes dimensions. Ainsi une vitesse V, une longueur parcourue dans un temps donné sera définie avec ces dimensions : (V) = (L) / (T) ou (V) = (L) $(T)^{-1}$.

Auparavant, Gauss avait montré que l'on pouvait définir deux systèmes d'unités électriques à partir des trois unités mécaniques, longueur, masse, temps, dénommé C.G.S. L'un était basé sur la loi de Coulomb, dit système électrostatique, l'autre sur la force d'Ampère, traduite par la loi de Laplace plus celle de Biot et Savart, dit système électromagnétique. Mais le problème était qu'aucun lien n'apparaissait pour passer d'un système à l'autre, jusqu'à ce que les allemands Weber et Kohlrausch montent en 1856 l'expérience de décharge d'une bouteille de Leyde dans un galvanomètre. Ils constatèrent que le rapport entre la valeur de la charge électrique calculée à partir de la décharge du condensateur et sa valeur mesurée dans le galvanomètre était dans un rapport **c** de 3,107. 10^{10}. Leur collègue Riemann réalisa que c'était très proche de la vitesse de la lumière, mesurée en 1848 par Hippolyte Fizeau à 2,88. 10^{10} cm/s.

Maxwell se demandait si cette coïncidence était purement fortuite, ou bien si au contraire elle découlait de la théorie de l'électromagnétisme qu'il édifiait progressivement. Il projetait plusieurs expériences pour étayer plus à fond cette hypothèse et en 1868 réalisa avec Charles Hockin une expérience complexe pour déterminer l'unité de résistance difficile à définir, qui précisément avait la dimension d'une vitesse dans le système électromagnétique. La moyenne des résultats trouvés était de $2{,}88.10^{10}$ cm/s.

Cette prévision s'est révélée correcte et la relation entre lumière et électromagnétisme fut considérée comme une des grandes découvertes du XIX$_e$ siècle, dans le domaine de la physique. Maxwell concluait ainsi dans son mémoire de 1864, ***A dynamical Théorie of the Electromagnétic Field :*** *L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature, et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme.*

La découverte n'a ainsi rien d'un cheminement linéaire. Le rapprochement d'une recherche avec des thèmes transversaux très différents peuvent ainsi apporter une preuve importante.

Avec sa certitude mathématique, Maxwell n'envisageait même pas de faire des recherches pour découvrir matériellement l'existence des ondes, pourtant il venait de créer un centre de recherches qui aurait pu se consacrer à ces expériences, le *Cavendish Laboratory.*

Pour lui, la tâche était terminée, à quoi bon essayer de le prouver matériellement ?

Il est remarquable que c'est la première fois dans l'histoire des sciences qu'un physicien révèle l'existence d'un phénomène naturel inconnu, les ondes électromagnétiques, en se basant uniquement sur une démonstration mathématique, alors que ce phénomène n'avait jamais encore été remarqué (2), et aucune expérience tentée pour le découvrir :

La Nature se révèle à l'homme par le langage mathématique.

Jusque-là, ou bien les mathématiques permettaient simplement de quantifier des phénomènes nouveaux, ou bien des spéculations intellectuelles présageaient l'hypothèse de l'existence d'un nouveau phénomène, qui devait alors être confirmé par l'expérience.

Maxwell décédait en 1879, l'année de la naissance de son successeur, Albert Einstein, qui s'appuya sur les découvertes de Maxwell pour aller encore plus loin.

L'éther

Maxwell considérait que la propagation des ondes électromagnétiques nécessitait un milieu remplissant le vide, l'éther ; pourquoi ne serait-il pas le même que celui *porteur* de la lumière ?

Depuis les Grecs et Aristote, on supputait, pour expliquer divers phénomènes, que le vide n'était pas vide, mais rempli d'une sorte de matière subtile, invisible et impondérable. Descartes y voyait des tourbillons de cette substance entraînant les corps célestes. Ensuite Newton démontrait l'action directe que la masse d'un corps exerce sur un autre, mais s'interrogeait sur le moyen par lequel cette force instantanée se transmettait. Nous en sommes toujours au même point.

Cette interrogation sur l'existence de l'éther suscita nombre d'hypothèses et d'expériences.

- Tout d'abord Fresnel, l'homme de la théorie ondulatoire de la lumière, avait besoin de l'éther pour « porter » la lumière.

- Puis c'est Fizeau qui mesure en 1849 la vitesse de la lumière, une constante ?

- Pour trancher le débat sur l'éther, Michelson et Morley réalisent une célèbre expérience en 1887 pour démontrer l'existence de l'éther. Déception, cela ne marche pas, mais on était à la limite de précision possible.

- En 1905, Einstein formule la théorie de la relativité restreinte pour laquelle l'existence de l'éther n'est plus nécessaire.

- Puis en 1920, avec la relativité générale, il écrit : *…L'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens, par conséquent un éther existe…Il ne doit pas être conçu comme étant doué de la propriété qui caractérise les milieux pondérables : la notion de mouvement ne doit pas lui être appliqué.*

- Peut-être le boson de Higgs nous apportera-t-il l'explication.

La physique se trouve parfois devant une situation que le bon sens, dit populaire, ne comprend pas : Elle ne peut prouver qu'une chose existe, ni qu'elle n'existe pas.

Les maxwelliens, après Maxwell

La très complexe théorie de Maxwell n'était accessible qu'à peu de physiciens ou bons mathématiciens. Cependant deux anglais en particulier ont prolongé son travail.

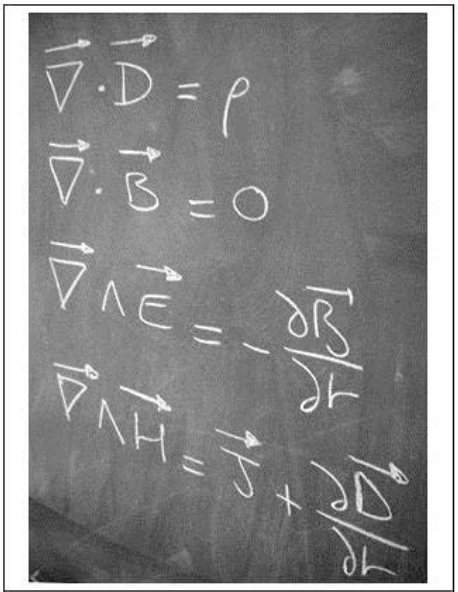
John Henry Poynting, mathématicien et physicien a lui aussi approfondi mode et calcul de l'énergie transportée par le champ électromagnétique. Il est connu des théoriciens par le théorème et le vecteur qui porte son nom. Il a défini ce *Vecteur de Poynting* qui représente la quantité d'énergie par unité de surface que transporte une onde électromagnétique et la direction de ce flux d'énergie. Ce vecteur est utilisé dans le théorème de Poynting, qui établit la conservation d'énergie des champs électriques et magnétiques. Ce théorème a permis à André Blondel de mieux comprendre la question de l'énergie émise ou reçue par une antenne de TSF.

Poynting a développé son travail dans : *On the Transfer of Energy in the Electromagnetic Field* - 1884

Oliver Heaviside, autodidacte anglais a débuté comme télégraphiste, puis s'est mis aux mathématiques, qu'il a brillamment cherché à utiliser dans les problèmes électriques, d'abord avec les nombres complexes.

Il a créé le *calcul opérationnel* en remplaçant l'opérateur différentiel par une variable, ce qui simplifiait la résolution des équations différentielles des régimes transitoires dans les circuits électriques. Cette méthode a été beaucoup contestée au début, ce qui ne gênait pas Heaviside, dont le caractère était très affirmé, sûr de lui.

En introduisant dans le calcul vectoriel les *opérateurs* différentiels linéaires de divergence, gradient et rotationel il a reformulé les 20 équations différentielles de Maxwell en 4 équations (c).



C Les équations de Maxwell dans leur formulation moderne.

Ancien télégraphiste, il a fait la théorie d'une ligne de transmission, avec *l'équation des télégraphistes,* améliorée par rapport à celle que Thomson avait précédemment établie..

Il révélait que l'énergie magnétique n'était pas transportée dans les fils conducteurs, mais dans le milieu les entourant, l'incontournable ½ Li^2 qui avait créé tant de difficultés aux premiers constructeurs de machines.

Cela l'a amené à proposer en 1887 l'installation d'inductances, bobines réparties en série le long des lignes téléphoniques, pour réduire les distorsions de la voix. Preece, directeur des services télégraphiques anglais, y était opposé. En Amérique, Pupin de l'université Columbia et Campbell d'ATT prit en 1904 le brevet de ces *bobines de Pupin* installées depuis partout, mais qui gênent maintenant la transmission des très hautes fréquences de l'internet.

En 1902, au début de la TSF, il prédit qu'il y a une couche conductrice dans la haute *atmosphère qui réfléchira les ondes électromagnétiques, permettant de transmettre tout autour de la terre. Marconi établit ainsi la première liaison Europe-Amérique. La vérification de la couche de Heaviside de l'ionosphère sera faite par une expérience en 1923.*

Découverte des ondes électromagnétiques - Hertz

La théorie de Maxwell révélait qu'un phénomène connu et déjà bien étudié, la lumière, mais dont on ignorait la réalité physique, serait de même nature que ces ondes électromagnétiques puisque chacun de ces phénomènes se propageait à la même vitesse dans le même milieu.

Cette identité annoncée des ondes électromagnétiques et de la lumière avait une conséquence déterminante dans la recherche expérimentale de leur existence, par les scientifiques qui s'y attelèrent pendant 20 ans. La production, suivie de la détection de ces ondes, serait alors automatiquement confirmée si l'on réussissait à reproduire avec ces ondes les mêmes expériences qu'avec la lumière : réflexion, réfraction, interférences, polarisation.

Étrange processus de cette recherche, on connaissait l'existence théorique d'un phénomène en langage mathématique, avec par surcroît un moyen indirect de le vérifier dans un cas particulier. Alors que pour la plupart des phénomènes physiques, on constatait d'abord le phénomène, puis on explorait ses propriétés, et ensuite on en cherchait l'explication par l'expérience et les mathématiques.

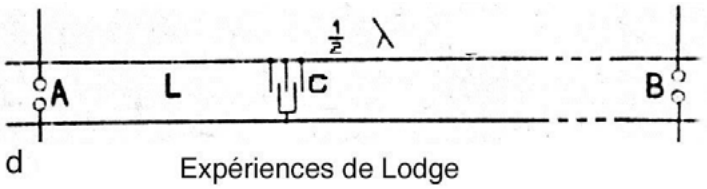
Les ondes prédites par Maxwell étaient qualifiées au début, d'*oscillations ou vibrations* électriques de l'éther. Compte tenu de la complexité du problème, découvrir un phénomène théorique inaccessible à nos sens, comme à notre imagination, il y avait peu de physiciens capables de le résoudre expérimentalement. Pas même parmi les maxwelliens, ses héritiers intellectuels, Francis Fitzgerald, Oliver Lodge et Oliver Heaviside. D'ailleurs certains scientifiques de haut niveau doutaient de cette propagation de *la force électrique* à vitesse finie, William Thomson en Angleterre, Hermann von Helmholtz en Allemagne. Ce dernier avait même proposé une autre théorie électrodynamique qui permettait de retrouver les équations de Maxwell, tout en admettant que les actions à distance se propageaient instantanément.

Cette controverse fut très fructueuse, car c'est en travaillant précisément sur l'un de ses aspects que Hertz va découvrir ces ondes, sans les chercher.

Expériences de Fitzgerald

Au début de son livre, Hertz note « L*e professeur Fitzgerald de Dublin s'était efforcé depuis plusieurs années d'établir théoriquement à priori la possibilité de l'existence de ces ondes et trouver les conditions nécessaires à leur réalisation. »* Mais sans succès. Il échangeait souvent avec Lodge sur le sujet.

Expériences de Lodge (3)



Expériences de Lodge

Lodge parvint finalement en 1887 à créer ces vibrations que l'on pensait devoir se propager normalement le long des fils, à leur surface, puisqu'ils ne pouvaient pénétrer à l'intérieur, à de telles fréquences (d). Il déchargeait une bouteille de Leyde entre les boules de l'éclateur A, l'onde se propageait le long des 2 fils d'inductance L, dont on pouvait ajuster la capacité C, jusqu'à l'éclateur B d'où elle revenait vers A. Il fallait ajuster L et C pour obtenir une onde stationnaire dont la fréquence était donnée par la formule de Thomson. L'étincelle était maximale lorsque la longueur du conducteur était d'une demi-longueur d'onde, ou un multiple. Il obtenait la résonance avec un conducteur long de 95 ft, ce qui donnait une fréquence de 5 MHz. Ce problème de l'accord émetteur-récepteur apparaîtra essentiel tout au long des progrès de la TSF. Lodge la concrétisera sous le vocable *Syntonie*.

Avec cette première démonstration expérimentale des ondes de Maxwell, il comptait étonner ses collègues à Bath en 1888, au meeting annuel de la *British Association*, mais ce fut un jeune physicien allemand, Heinrich Hertz qui en fut la vedette, ayant réalisé mieux, des ondes se transmettant, non le long des fils, mais dans l'espace, ayant toutes les propriétés des ondes lumineuses. Bon joueur, Lodge se réjouit de ce succès étonnant, les équations de Maxwell exprimaient donc une réalité physique, pas seulement une théorie. Il lia des rapports amicaux avec son jeune devancier.

Dans son livre de 1892, Hertz signale qu'il travaillait sur le même sujet sans le savoir : *« Le professeur O. Lodge de Liverpool a, pendant que j'exécutais les recherches décrites dans ce livre, … institué une série d'expériences sur la décharge de condensateurs très petits qui le conduisirent à l'observation des vibrations dans les fils. Comme il s'était placé absolument au même point de vue que Maxwell, et qu'il s'efforçait de tout son zèle de prouver la justesse de ses idées, on ne peut douter que si je ne l'avais pas devancé il ne fût arrivé aussi à observer des ondes dans l'air et par suite à mettre en évidence la vitesse finie de propagation de la force électrique. »*

L'espoir un peu déçu de Lodge était d'arriver aux fréquences très grandes des ondes lumineuses puisqu'elles étaient aussi électromagnétiques ; mais quel procédé électrique serait capable de générer ces fréquences, 10 000 fois plus élevées que celles des ondes hertziennes les plus courtes ? Ce rêve de créer de la lumière directement à partir d'oscillations de circuits électriques conformément à la théorie de Maxwell a souvent hanté les électriciens. Ce serait une lumière dépensant théoriquement très peu d'énergie pour la créer. Tesla s'en est approché avec la haute fréquence. La récente diode électroluminescente s'en approche encore mieux, la lumière qu'elle produit est presque la moitié de sa valeur théorique.

Expériences de Hertz

Hertz ne songeait pas à vérifier l'existence des ondes de Maxwell dans ses premiers travaux, mais une question proche. Il l'explique au début de son livre de 1892, « *Recherches sur la propagation de la force électrique »,* regroupant l'ensemble de ses sept mémoires successifs (4).

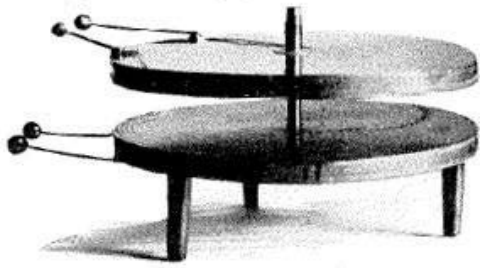
Lorsqu'il était étudiant à l'académie de Berlin en 1879, fut proposé sur l'initiative de son professeur Helmholtz un sujet de concours doté d'un prix : *établir expérimentalement une relation quelconque entre les forces électrodynamiques et la polarisation diélectrique des isolants, en*

produisant soit une force électrodynamique par des phénomènes ayant lieu dans les isolants, soit une polarisation des isolants par une force induite.

Helmholtz l'encouragea à travailler sur ce sujet qui devait remettre en cause ou confirmer les hypothèses de Maxwell sur ce *courant de déplacement* dans les diélectriques solides. Les premiers essais de Hertz en utilisant les oscillations électriques de la décharge des bouteilles de Leyde ne donnèrent pas de résultat probant ; il abandonne provisoirement, mais cela avait éveillé son attention sur les vibrations électriques.

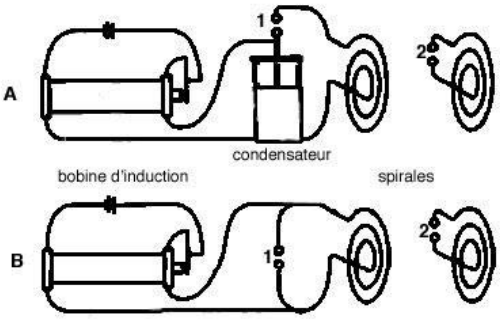
Devenu professeur à la Technike Hochschule de Karlsruhe, la plus ancienne d'Allemagne, il explique : *« Peut-être n'aurais-je jamais découvert une nouvelle forme de ces vibrations sans le hasard qui fut le motif déterminant des recherches qui suivent, et se présenta pendant l'automne 1886. Dans la collection de l'Ecole, où j'ai exécuté ces recherches j'avais découvert et utilisé pour mon cours une paire de spirales dites de Riess ou Knochenhauer …*

Ces spirales sont des galettes coaxiales constituées d'un ruban de cuivre enroulé en spirale dont les extrémités sont deux petites boules formant éclateur (e). On peut rapprocher ces bobines pour avoir une forte mutuelle induction. Elles étaient destinées à illustrer dans les cours l'expérience de la découverte de l'induction par Faraday en 1831 (I-5, f). Dans la bobine inférieure est déchargée une bouteille de Leyde, chargée au préalable par une machine électrostatique. Le courant induit dans la seconde bobine, dont l'espace entre boules peut être réglé à un intervalle réduit par une vis micrométrique, se manifestait sous forme d'une l'étincelle visible par l'assistance.



e Spirales de Riess

Hertz fit quelques essais préliminaires pour préparer son cours. D'abord il rechargea le condensateur d'accumulation, la bouteille de Leyde, au moyen d'une bobine d'induction (f-A). Ensuite il fit l'essai avec des batteries de bouteilles de Leyde plus petites et fut très étonné que l'arc de l'éclateur induit 2 se maintenait. En supprimant même la bouteille de Leyde, il éclatait toujours (f-B). Étrange !



f Premières expériences de Hertz- 1886

Ce fait fut déterminant, et pour le comprendre Hertz fit plusieurs montages pour vérifier et étudier ces nouvelles vibrations qui semblaient correspondre à celles que Maxwell avait prédites. En réalité, dans le premier cas, l'étincelle sur l'éclateur 2 devait être la superposition de deux phénomènes, l'induction classique d'un courant à la fréquence de la décharge de la bouteille de Leyde et de la bobine, plus le courant résultant de la propagation d'une vibration à très haute fréquence : *«… en faisant varier les conditions de l'expérience, j'observai le phénomène de l'étincelle secondaire (Nebenfunken), point de départ des recherches qui suivirent …Ma conviction se fortifia quand je découvris que j'avais devant moi des vibrations régulières.*

Le premier mémoire - Sur des vibrations électriques très rapide - retrace mes recherches fin 1886 et début 1887. »

À ce stade, il rencontre un collègue, von Bezold, qui lui apprend qu'il avait lui-même observé des phénomènes semblables, décrit dans une publication peu connue. Mais il s'était arrêté là, sans essayer d'en tirer toutes les conséquences, ce que compte faire Hertz.

Pendant plus d'un an, 1887 et 1888, il va faire des séries d'expériences dans deux directions parallèles :

- Utiliser ces vibrations à très haute fréquence pour répondre à la question du prix de l'Académie de Berlin.

- Expérimenter pour comprendre les propriétés, les conditions de production et de détection de ces vibrations ou ondes. En particulier reproduire avec elles les phénomènes connus de la lumière, réflexions et autres, puisque Maxwell les avait déclarés identiques.

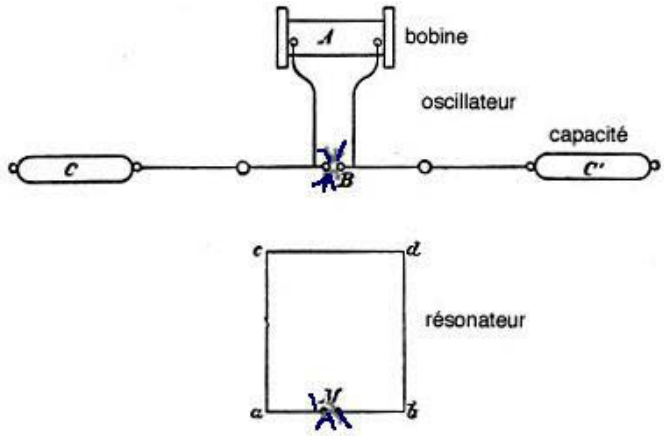
Le détail du cheminement intellectuel et expérimental est intéressant, mais serait long à rapporter. Il figure dans les mémoires qu'a publiés Hertz à mesure de la progression de ses travaux, rassemblés ensuite dans son livre de 1892, et commentés par divers auteurs.

La question de Berlin sur la polarisation des diélectriques, l'occupa pendant l'été 1887. Une première expérience échoua et la seconde réussit, exposée dans son mémoire n°6 : *Sur les effets d'induction produits par les phénomènes électriques dans les isolants.*

Un autre problème, très différent, se présenta aussi au cours des essais. Hertz remarque qu'une étincelle de l'oscillateur peut influencer l'étincelle secondaire, en modifiant la longueur de l'espace nécessaire à son apparition. Il le reproduit dans un vase où il fait le vide et constate que cet effet devient plus accentué. C'était la ***découverte de l'effet photoélectrique***, qui fut étudié par plusieurs savants mais dont l'explication ne sera donnée que par Einstein. La lumière ultra-violette provoque par émission d'électrons, l'ionisation de l'espace entre deux électrodes sous tension.

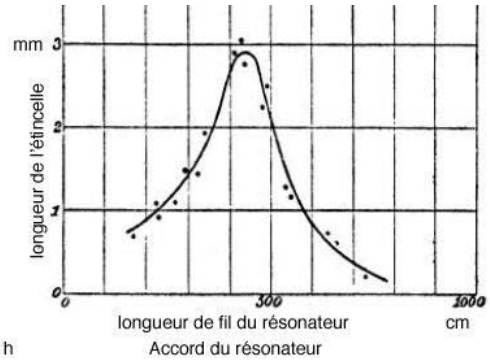
Simultanément, Hertz poursuivait les essais pour mieux comprendre cette influence d'un circuit émetteur qu'il dénommait alors *oscillateur* sur un circuit proche, récepteur qu'il qualifiait de *résonateur*, termes empruntés par analogie avec les expériences d'acoustique, spécialité de son ancien professeur Helmholtz. En effet, comme pour le son, il fallait un certain accord entre les dimensions des deux appareils pour avoir un effet maximum : « *C'est alors que je découvris ces phénomènes d'une extrême régularité et d'une variété infinie qui me parurent si étonnants. Ils sont décrits dans le cinquième mémoire - De l'action d'une vibration électrique rectiligne sur un circuit voisin - Quand j'eus découvert ces phénomènes très réguliers et que j'y vis clair, je fus rempli de joie.* »

Le local où Hertz faisait ses expériences était vaste, 15 m, permettant d'éloigner le résonateur, loin de l'oscillateur et de constater que l'effet diminuait très peu à des distances croissantes jusqu'à 12 m. C'était surprenant, car normalement les actions électriques diminuaient avec le carré de la distance, pas ces vibrations. Leurs longueurs d'ondes, fonction de l'impédance de l'oscillateur étaient de plusieurs mètres. Plus tard Hertz opéra jusqu'à 30 cm, ondes que nous qualifions de *courtes*. Il était aussi étrange qu'elles disparaissaient à proximité des piliers métalliques du bâtiment.



g Montage fondamental de la découverte des ondes par Hertz

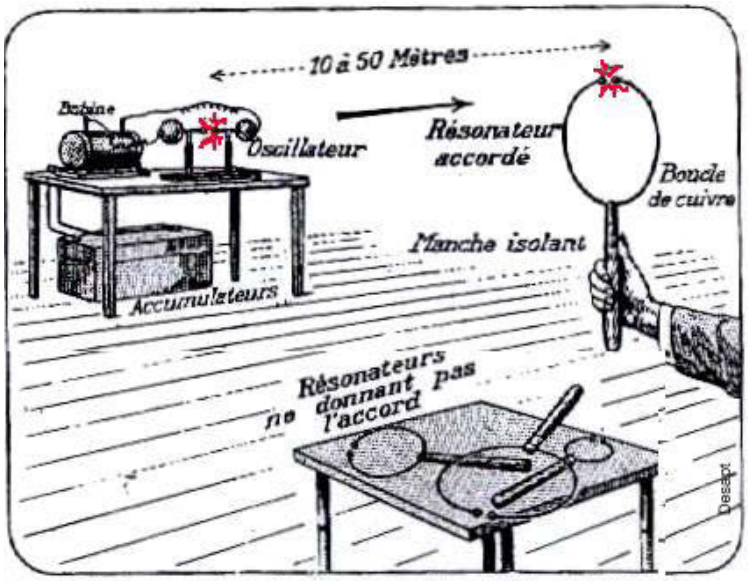
Le schéma qui donnait les meilleurs résultats était celui de (g) dans lequel la bobine alimentait un dipôle rectiligne d'un mètre, terminé par deux capacités C et C'. Les valeurs de ces éléments définissaient la fréquence ou longueur de l'onde émise. Le résonateur pouvait avoir différentes formes, rectangulaire ou circulaire, et sa longueur devait être optimisé pour avoir l'accord de résonance (h).



h Accord du résonateur

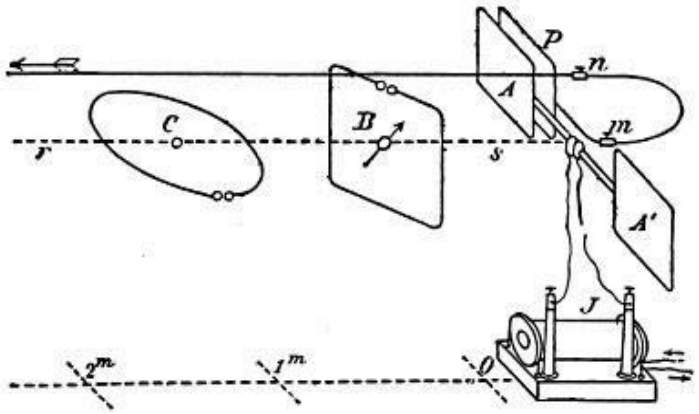
Le dessin (j) illustre la disposition des éléments.

Hertz se devait alors de vérifier un point essentiel, les ondes devaient se propager à une vitesse finie, la vitesse de la lumière. Il réalisa une adaptation de son montage basée sur les interférences, permettant de mesurer la vitesse dans l'espace et le rapport entre cette vitesse et celle des ondes le long d'un conducteur électrique (k). L'expérience donnait environ 280 000 km/s dans l'espace, à peu près la vitesse de la lumière, mais seulement 200 000 km/s le long du conducteur. Cette différence n'était pas conforme à la théorie de Maxwell. Cela renforça les arguments de ses contradicteurs.



j Découverte des ondes électromagnétiques - Hertz - 1887

Deux ans plus tard, le mathématicien H. Poincaré fit observer qu'il avait fait une erreur, le facteur $\sqrt{2}$ était oublié dans la valeur de la période. Hertz s'en excusa dans son livre de 1892. Les expériences des genevois Sarasin et de la Rive confirmèrent la valeur de 300 000 km/s.



k vitesse de propagation des ondes

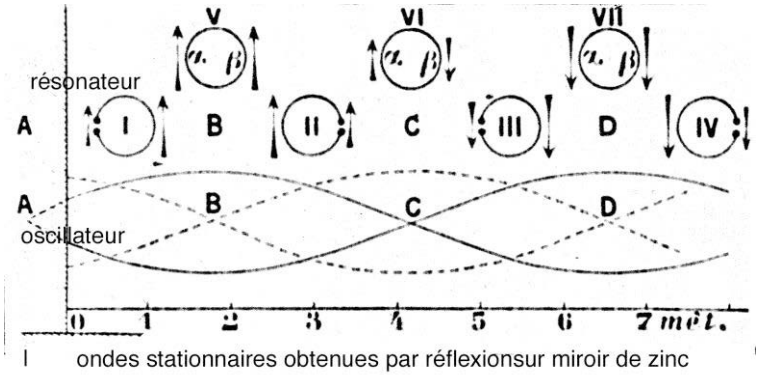
Il fallait ensuite vérifier que l'on pouvait reproduire avec ces ondes les mêmes expériences qu'avec celles de la lumière :

- La propagation rectiligne avec réflexion sur un mur revêtu d'une plaque de zinc, formant des ondes stationnaires avec les champs électriques et magnétiques α et, décalés d'un quart de période (l). La diffraction, la réfraction dans un gros prisme de résine, de même la polarisation (m).

Toutes les lois de l'optique de la lumière s'appliquaient à ces vibrations ou oscillations électriques dénommées aussi *rayons électriques*, puisque identiques aux rayons lumineux, à la longueur d'onde près. Elles devinrent ensuite *ondes hertziennes ou* électromagnétiques.

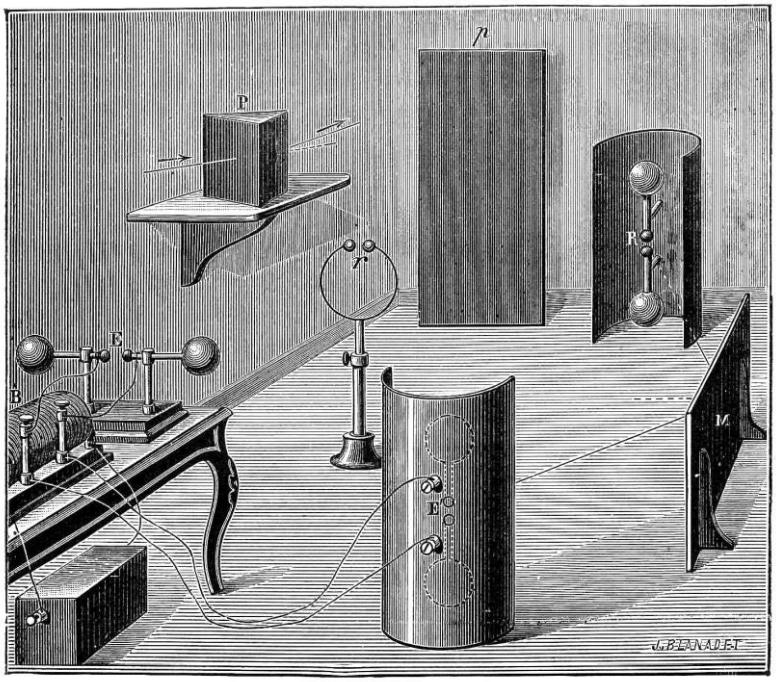
Hertz concluait dans son dernier mémoire, présenté à l'Académie des sciences de Berlin : « *Pour moi, les faits observés me paraissent mettre hors de doute l'identité de la lumière, de la chaleur rayonnante* (l'infrarouge),*et des mouvements électrodynamiques.*

Je crois que cette identité conduira à des conséquences aussi profitables pour la théorie de l'optique que pour l'électricité. »



l ondes stationnaires obtenues par réflexionsur miroir de zinc

Quand on lui posa la question classique, à quoi cela peut-il servir ? La réponse fut celle de la plupart des grands découvreurs : « *Cela n'a aucune sorte d'application - C'est juste une expérience qui permet de prouver que Maître Maxwell avait raison - Nous avons simplement ces ondes électromagnétiques mystérieuses que nous ne pouvons voir à l'œil nu, mais elles sont là.*

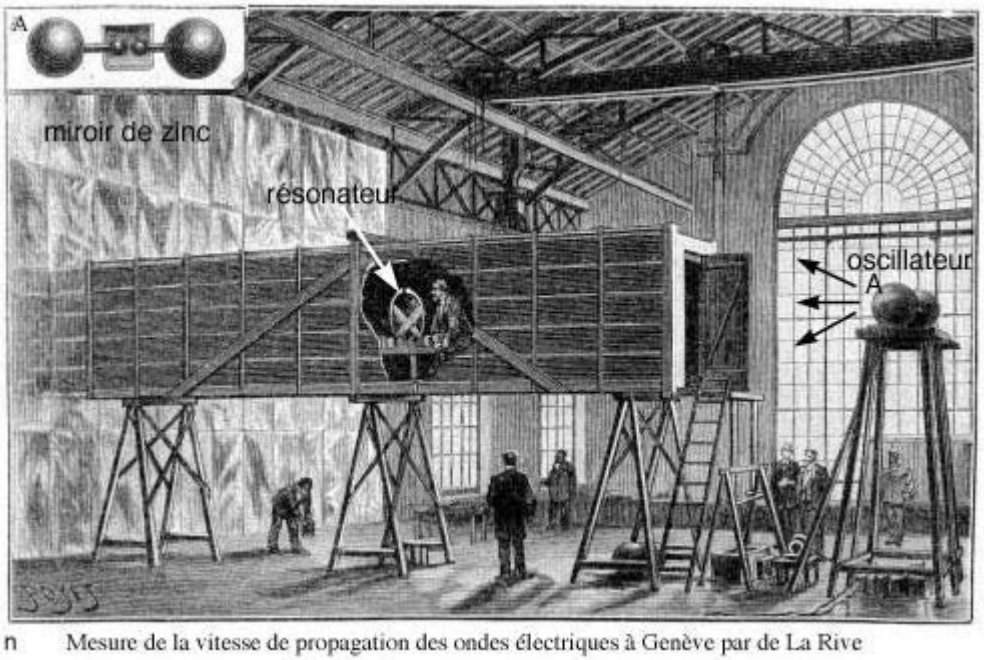


m Vérification des lois de l'optique avec les ondes élecriques

Néanmoins, pendant plusieurs années à partir de l'été 1888, date de l'annonce de la découverte au congrès de Bath, ce fut un événement dans le petit monde scientifique et parmi les théoriciens de l'électricité. Pour la plupart, ils découvraient Maxwell, presque ignoré jusque-là. On essayait de reproduire les expériences de Hertz et de trouver des améliorations, mais personne n'envisageait l'application pratique dont l'importance allait se révéler après 1894. Il y avait soit de l'enthousiasme, soit un certain scepticisme sur divers points qu'il fallait approfondir, en particulier la vitesse de propagation dont les mesures de Hertz étaient assez différentes de celle de la lumière - réalité ou erreur de mesure ?

Expériences de Genève

Deux genevois, Édouard Sarasin et Lucien de La Rive, fils d'Auguste souvent cité, avaient réalisé des mesures dans leur laboratoire dont les dimensions restreintes limitaient la précision. Des ondes de longueur assez grandes, plusieurs mètres ou une dizaine de mètres permettraient des mesures plus précises. En 1892, ils installent leur expérience des interférences dans le vaste espace des usines hydrauliques du Rhône à Genève (n).



n Mesure de la vitesse de propagation des ondes électriques à Genève par de La Rive

Rappelons que la longueur d'onde L en mètre est reliée à la fréquence F en Hertz et la vitesse de la lumière par la relation :

Fréquence (Hz) x Longueur d'onde (m) = 300 000 000 (m/s)

L'oscillateur A, dont les éclateurs sont dans un bain d'huile, est à 15 m du miroir de zinc – les rayons réfléchis forment des interférences avec les incidents dans le tunnel, obscur pour observer l'étincelle du résonateur qu'on déplace - aux nœuds, l'étincelle est éteinte – aux ventres elle brille. La mesure de la distance entre les nœuds est la demi-longueur d'onde, la fréquence s'en déduit, puis la vitesse, proche de 300 000 km/s

D'autre part, les expérimentateurs ont noté que *» la longueur d'onde constatée dans le mouvement émanant du même oscillateur varie d'une manière continue avec les dimensions du résonateur »,* ce qui impliquerait qu'un oscillateur doit émettre toute une gamme d'ondes, et que « *chaque résonateur choisit dans cet ensemble, l'ondulation dont la période correspond à la sienne propre* », mais cet effet qu'ils appelèrent, *résonances multiples*, était plus compliqué et leur explication erronée (5).

D'autres expériences ont montré que la vitesse dans l'eau était 8,5 fois plus faible que dans l'air, précisément l'indice de réfraction de l'eau. Le carré de ce nombre, soit 72, se trouve très proche de la constante diélectrique de l'eau. On retrouve une correspondance semblable avec l'alcool.

Maxwell avait vraiment tout prévu !

Quel prodigieux bon en avant va déclencher après 1888 l'utilisation de ces ondes électro-magnétiques, révélées par les mathématiques de Maxwell puis découvertes par les expériences de Hertz !

L'électricité jusque-là prisonnière dans les fils, va se propager partout dans le vide apparent de l'espace, les gaz et nombre de corps solides et même liquides.

Compléments

1 - Maxwell

La recherche d'information sur Maxwell commence d'abord par un tri dans les ouvrages, et surtout études et articles de revues scientifiques parus depuis un siècle.

Hertz qui a transformé les idées théoriques de Maxwell en réalité physique écrivait : « *Quelque admiration que j'éprouve pour les parties mathématiques de la théorie de Maxwell, je n'ai jamais été vraiment certain d'avoir deviné la pensée de Maxwell pour ce qui est de la signification physique de ces énoncés.*

Pour Maxwell, le principal théoricien de l'électricité, cela nécessitait d'aller un peu plus au fond. Il faudrait d'abord lire, parmi ses publications successives, le monument qu'est son *Traité d'Electricité et de Magnétisme,* 2 tomes de 600 pages chacun, une suite de notes et réflexions justifiées par de longs développements mathématiques.

En dehors de la préface et d'un survol, je n'ai pas eu la persévérance de me plonger dans cette austère lecture pour deux raisons : les notations mathématiques souvent utilisées par Maxwell sont basées sur les quaternions, « inventés » par Hamilton, remplacées aujourd'hui par le vectoriel : d'autre part, il n'y a pas de fil conducteur, de plan organisé. Cela résulterait d'une refonte complète que Maxwell avait entrepris, mais n'a pu finir. Personne n'a encore osé y mettre de l'ordre.

Le *Traité* de 1873, regroupant ses communications depuis 1861, apparaît surtout comme un rassemblement de beaucoup d'idées plutôt qu'un document didactique. J.J. Thomson faisait remarquer que le Professeur Maxwell était enclin à laisser égarer sa pensée dans des directions au-delà de la portée de l'imagination de ses étudiants, quand il ne s'astreint pas à suivre strictement son cours.

Ce qui lui valu d'échouer deux fois à sa nomination à des chaires professorales dans son Ecosse natale, l'Université préférant de bons pédagogues au génie trop bouillonnant d'imagination.

Maxwell appartenait à la catégorie des savants ne se prenant pas du tout au sérieux et doués pour l'humour. Il composa une chanson sur un thème d'actualité : *Ballade de la Compagnie transatlantique du Télégraphe* (Crowther ci-après). Se plaignant de la vie pas drôle qu'il menait à Aberdeen : « *Je n'ai pas risqué la moindre calembredaine depuis deux mois, et si quelque jeu de mots me monte aux lèvres, je dois me mordre la langue »*

Bibliographie :

- J. Clerck Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Claredon Press, Oxford, 1873

Traduction en français : *Traité d'électricité et de magnétisme* - James Clerk Maxwell - 2 vol. - reproduction de l'édition Gauthier-Villars, 1885 - URL : http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k951636

- *Traité élémentaire d'Electricité.* Le lecteur intéressé par un document simple trouvera sur *Gallica,* en plus du *Traité,* un ouvrage facile à lire, la traduction du*Traité élémentaire d'Electricité* que Maxwell a commencé à écrire vers 1877, mais qu'il n'avait pas terminé. Après son décès, des amis l'ont complété et un professeur, William Garnett, l'a fait édité. La traduction de G. Richard a été imprimé chez Gauthier-Villars en 1884. Au début du livre figure en 40 pages une intéressant condensé des *Travaux en Electricité du Professeur Clerk Maxwell* par Garnett, extrait de la première biographie, *Life of James Clerk Maxwell,* Londres, 1882.

- J.G. Crowther, James Clerk Maxwell - Traduction française M.A.Bera- Hermann Paris 1948.

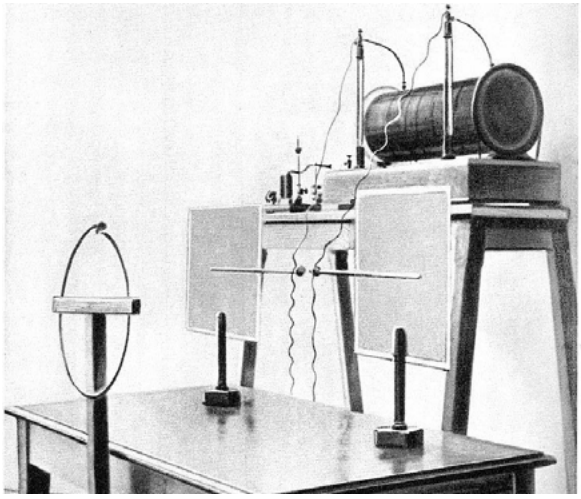
2 – Sauf par Lucia Galvani, un siècle plus tôt (I-2)

3 - expériences de Lodge. Voir Lumière électrique (cnum.cnam.fr) vol 30, n° 42, oct 1888, p.130

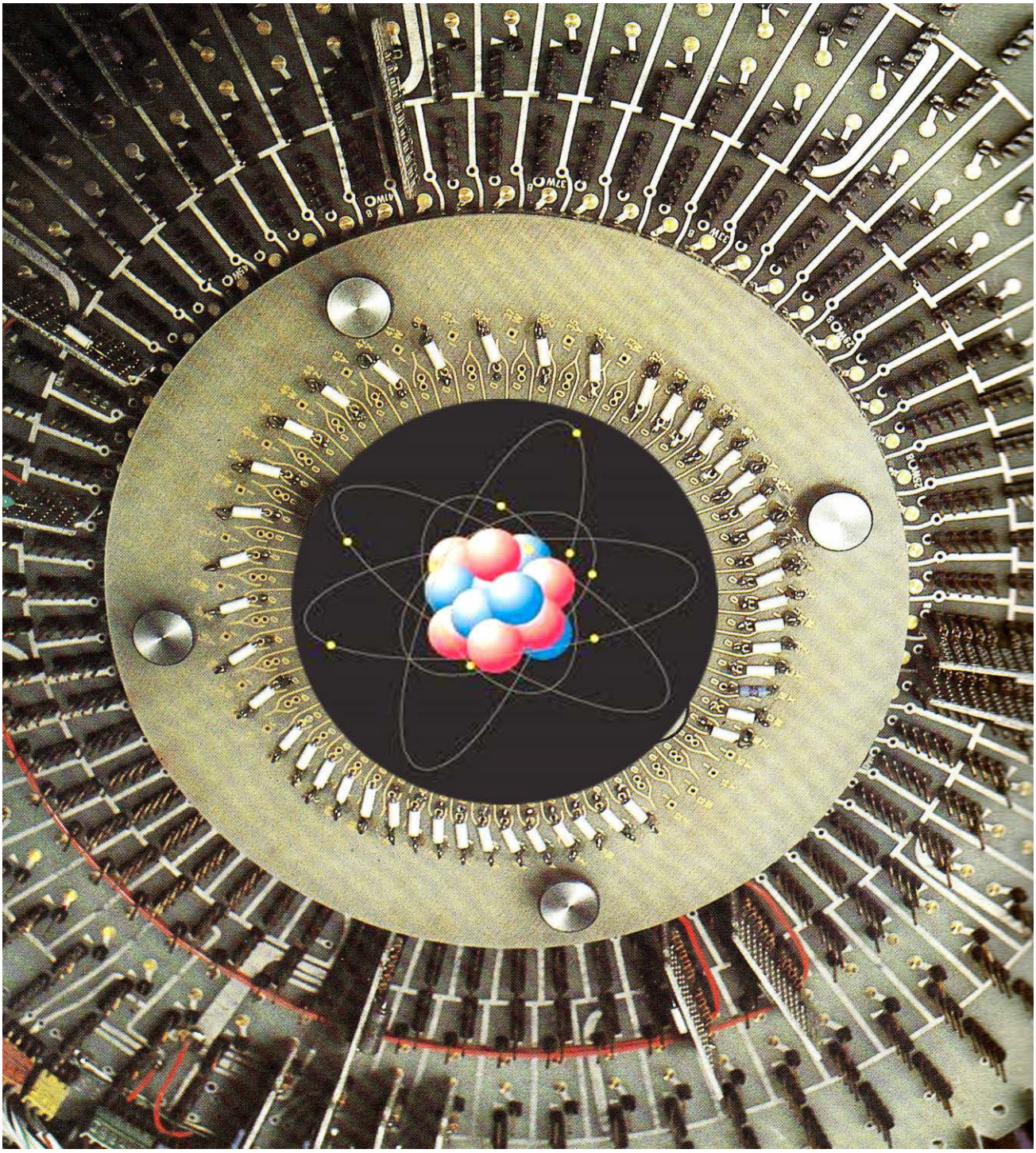
4 - Heinrich Hertz, *Untersuchungen über der elektrischen Kraft* - Leipzig 1892- 94

Une traduction française, *Recherches sur la force électriq*ue, a été éditée dans une série d'article de la Lumière électrique de 1892 - cnum.cnam.fr. La laborieuse démarche inventive de Hertz est développée dans ce document dont il existe sur le web nombre d'extraits par divers auteurs.

5 – Ce constat est en contradiction avec la **syntonie** que proposera Lodge plus tard pour la TSF. L'explication des expérimentateurs de Genève était erroné. Successivement Poincaré donna une autre explication, puis Bjerkness donna l'explication finale en l'attribuant au fait que la bobine envoyait un train d'ondes amorties. Ce qui permit à Blondlot de déterminer la vitesse de propagation à 302 000 km/s. Le long d'une ligne, il trouvait 298 000 km/s. D'autres expérimentateurs trouvèrent les années suivantes le même ordre de grandeur.



Reproduction de l'expérience de Hertz



4 – Rayons cathodiques - Matière radiante

Rayons X - Électron

Pour réaliser la première grande centrale hydroélectrique du monde sur le Niagara en 1895, (IV-4), les électriciens d'Amérique n'avaient pas eu besoin de connaître l'électron, et produire 36 000 kW avec 10 alternateurs.

D'ailleurs, il serait difficile de trouver un physicien du XIX^{e} qui ait consacré ses recherches à l'identification de ce que ses aînés avaient dénommé charge électrique au siècle précédent. Coulomb avait simplement défini la mesure des quantités de charges électriques, entités inconnues sur lesquelles s'était fondée l'électrostatique.

Mais l'étonnante découverte par Volta d'un fluide électrique en mouvement généré par une pile de rondelles en métal avait fort peu de rapport avec l'accumulation des charges générées par les grosses machines à friction. L'électrostatique ne fut plus alors qu'un sujet de recherche très secondaire, sauf pour Maxwell dans les années 1860.

Par contre l'invention de la bobine d'induction et le perfectionnement des pompes à vide ouvrirent pour les chercheurs un nouveau domaine inexploré, les étranges phénomènes lumineux qui se manifestent dans des tubes à gaz raréfié, soumis à des tensions élevées de plusieurs kV, avec des vides plus ou moins profonds.

Ils furent nombreux tentés par l'exploration de ces phénomènes, chacun approfondissant les expériences des précédents. Deux noms sont plus remarqués: celui de **Geissler** pour les variétés de ses tubes lumineux très décoratifs que l'on peut considérer comme les premiers de la lignée des tubes d'éclairage à décharge, décrits en III-1 ; celui de **Crookes** qui en fit la synthèse en 1879.

Tous ces travaux sur ces rayons cathodiques, la matière radiante, ont finalement débouché sur l'invention de l'oscilloscope, premier et essentiel instrument des électroniciens. Le hasard saisi par un esprit curieux lui fit découvrir les rayons X. Et pour finir le siècle avec éclat, le couple classique raisonnement-expériences a fait découvrir l'électron.

La matière radiante

Rappelons que les tubes à décharge sont des appareils simples : un tube de verre, soudé aux deux extrémités après évacuation plus ou moins partielle de l'air. Deux électrodes internes, cathode et anode, sont scellées de différentes façons, suivant l'expérience et reliées à la sortie d'une bobine d'induction, donnant une haute tension de quelques kV.

Les belles stries et colorations qu'obtenait Geissler l'étaient à des pressions de l'ordre du mm de mercure. Par contre en réduisant progressivement la pression avec les pompes perfectionnées de Sprengel, les colorations disparaissent.

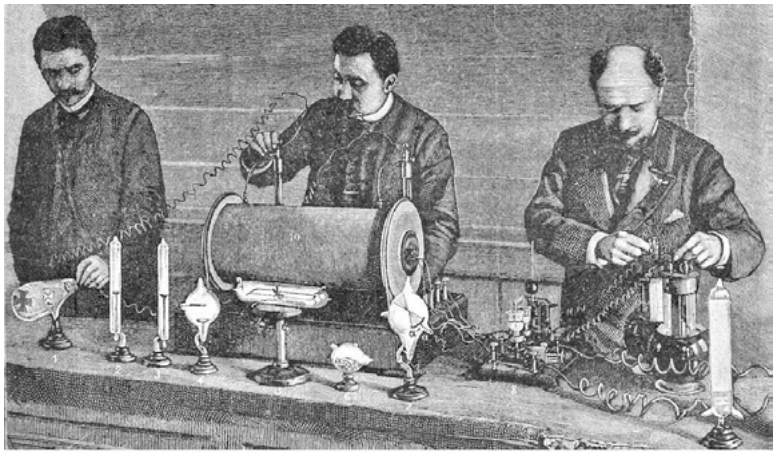
Les allemands J. Plucker et J. Wilhelm Hittorf de Münster furent les pionniers dans ce domaine en 1865/1869 ; ils remarquèrent que la cathode émettait une sorte de rayonnement de molécules.

À cette époque, le terme molécule signifiait simplement une particule, dont on ne savait rien. E. Goldstein les appela *rayons cathodiques.*

L'Anglais William Crookes, reprenant les travaux des prédécesseurs, de Hittorff à C.F.Varley, expliquait que ces rayons rendaient lumineux le gaz résiduel, par choc sur les molécules de gaz. Lorsque l'on diminuait la pression, le nombre de chocs diminuait, jusqu'à s'annuler. Il dénommait libre parcours, la distance moyenne qu'une molécule du rayon émis pouvait parcourir sans rencontrer une molécule de gaz. C'était notre interprétation actuelle du *libre parcours moyen*.

Crookes esquissait une explication de ces phénomènes en classant les résidus gazeux à très basse pression comme un quatrième état, complétant les états solide, liquide ou gazeux, *l'état radiant*, notre plasma actuel.

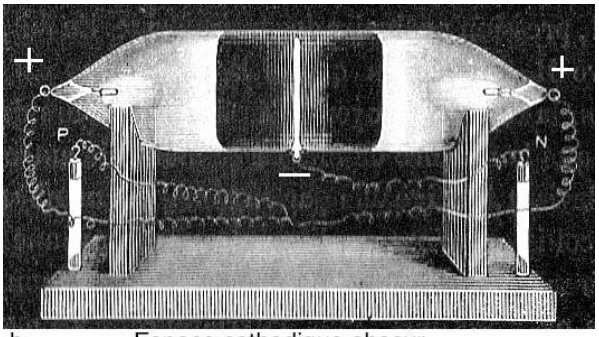
Il présenta le 22/8/1879 au congrès de la British Association de Sheffield un mémoire résumant les connaissances rassemblées par plus d'une dizaine de chercheurs et physiciens : *On Radiant Matter*. Elles étaient accompagnées d'une série d'expériences visualisant les propos du conférencier, les propriétés de la matière radiante (1) (a)



a Expériences de Crookes - 1879

Ses conclusions étaient :

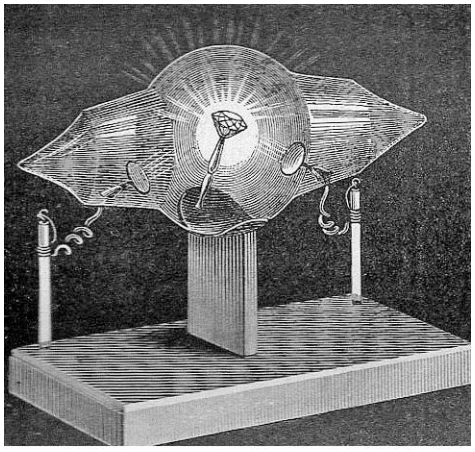
– L'espace obscur au pôle négatif augmente lorsque le vide est plus poussé. Dans tube de la figure (b) est disposé un disque métallique relié au pole négatif de la bobine d'induction ; les deux extrémités sont reliées au pôle positif. Les spectateurs constataient l'espace obscur qui se manifestait sur 25 mm de chaque coté de la cathode. L'explication de Crookes était que cet espace, qui augmentait en baissant la pression, représentait le libre parcours des molécules rayonnées par le disque.



b Espace cathodique obscur

– La matière radiante exerce une action phosphorescente énergique partout où elle frappe. Comme les gaz résiduels qui s'illuminent lorsqu'ils sont frappés par la matière radiante, les solides deviennent phosphorescents, à un plus fort degré. Le verre des tubes prend des colorations d'intensité et de couleur variable suivant les matériaux qui sont inclus. Le verre d'urane prend une couleur vert foncé, le vert anglais se clore en bleu, le verre allemand en vert pomme.

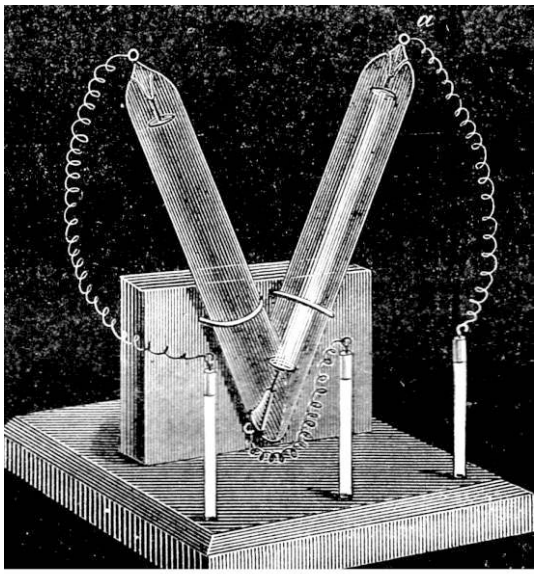
Beaucoup d'autres substances deviennent aussi phosphorescentes sous l'effet du rayonnement, le sulfure de calcium, l'aluminate de glucine, le silicate d'alumine émet lui une belle lumière jaune, l'émeraude une lumière cramoisie. Mais c'est le diamant qui donne la lumière la plus brillante. Celui de l'expérience (c) brillait en vert clair avec l' éclat d'une bougie.



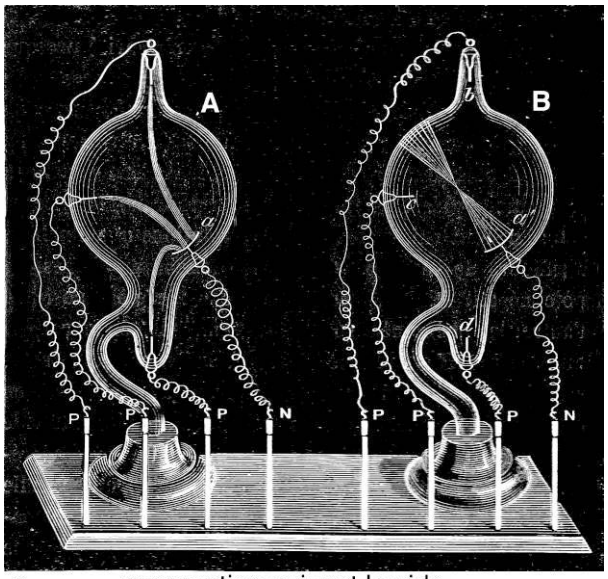
c Phosphorescence verte du diamant

– La matière radiante se propage en ligne droite.

Dans l'expérience (d) un tube en forme de V porte deux électrodes aux extrémités.



d Essai de propagation en ligne droite



e propagation suivant le vide

Dans la branche de droite, le faisceau issu de la cathode, illumine le tube d'une lumière verte et il s'arrête au niveau du coude qu'il ne peut franchir.

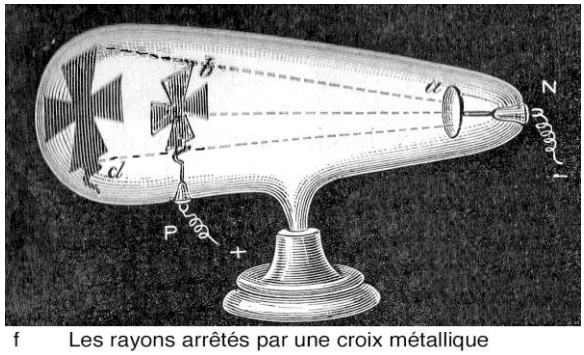
Cette propriété ne s'applique que si le vide est très profond.

Une autre expérience permet de visualiser le comportement des rayons dans deux boules dont le vide est différent ; la cathode a est une coupelle concave reliée au négatif N, et il y a trois autres électrodes qui seront reliées successivement au positif P (e). À gauche la pression dans la boule A n'est que de quelques mm de mercure, à droite la boule B a un vide maximal.

La boule A étant branchée sur le négatif N, le positif P est branché successivement sur les trois électrodes. Chaque fois une trace lumière violette courbe s'établit entre le positif et le négatif. Dans la boule B, quelle que soit l'électrode positive branchée, pas de trace lumineuse mais les rayons se propageant en ligne droite forment sur le verre une tache phosphorescente de lumière verte.

– La matière radiante interceptée par un solide projette une ombre

Dans le tube (f) on a introduit une croix en aluminium reliée au pole positif. La cathode, à droite, reliée au pole négatif émet des rayons rectilignes, une partie sont arrêtés par la croix et reproduit une croix sombre sur le fond phosphorescent.

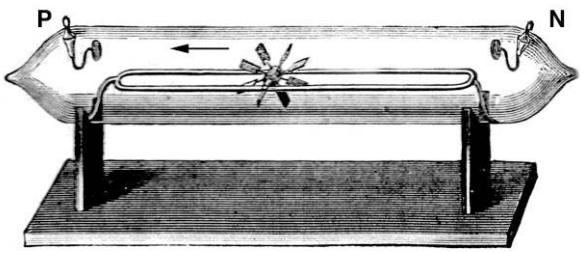


f Les rayons arrêtés par une croix métallique

– La matière radiante exerce une action mécanique sur les corps qu'elle frappe

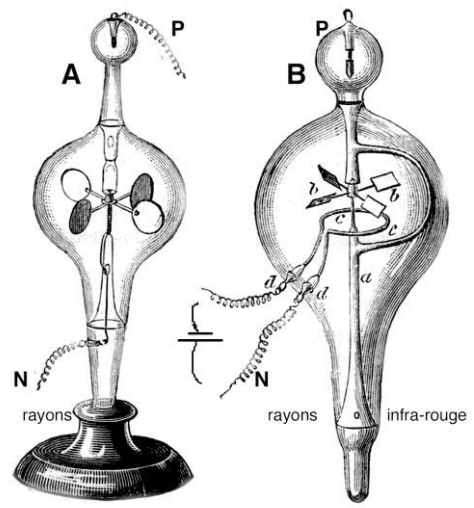
Comme la matière radiante est arrêtée par un corps solide, si celui-ci peut être mis en mouvement, le choc des molécules devrait le déplacer.

L'expérience (g) de Gimingham vérifie cette action étrange. Dans le tube vidé, avec deux électrodes aux extrémités, l'une est l'axe d'une petite roue avec des palettes de mica, qui roule sur deux rails de verre. Si l'on inverse anode et cathode, le sens du mouvement change, la roue s'éloignant toujours de la cathode.



g Les rayons font tourner le moulinet

Une autre expérience consiste à réaliser un tube en forme de boule, renfermant un moulinet de quatre



h Rotations par les rayons ou infra-rouge

palettes en mica à axe vertical, en aluminium recouvert sur une face de mica (hA). L'axe est relié au pole négatif de la bobine d'induction, au sommet est scellée l'électrode positive. À la pression de quelques mm de mercure, se forme sur la surface en métal un halo de lumière mauve, celle en mica reste obscure. En diminuant la pression dans le tube, le halo est repoussé sur l'enveloppe en verre puis disparaît, la rotation commence et s'accélère plus le vide est profond.

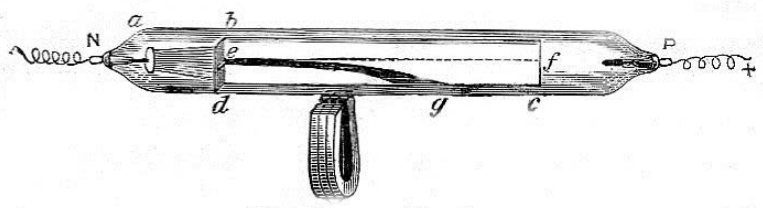
Une autre expérience non décrite permet de vérifier que cette faible énergie mécanique peut se transformer en chaleur.

Une troisième expérience (hB) révèle un autre phénomène. Dans la boule, le moulinet est constitué d'un axe en acier portant quatre palettes en mica transparent b. L'axe est relié à l'électrode supérieure positive. Sous les palettes est disposé un fil de platine en anneau ouvert c dont les deux extrémités sortent de l'ampoule en dd'.

En branchant la bobine, l'anneau c étant la cathode, le moulinet tourne rapidement, phénomène identique au précédent. Si alors on débranche les fils de liaison à la bobine et l'on connecte ceux de l'anneau à une pile, l'anneau est porté au rouge et le moulinet tourne rapidement comme dans l'expérience précédente.

Les rayons cathodiques se comportent donc comme des rayons lumineux, mais dans cette expérience, s'y ajoutent aussi des électrons émis par effet thermoïonique.

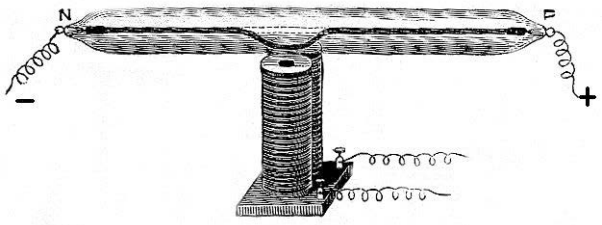
Nota : Cette dernière expérience de rotation par un rayonnement infrarouge est souvent reproduit dans des radiomètres tournant simplement sous l'effet de la lumière extérieure.



k Déviation par aimant

– La matière radiante est déviée par un aimant

Un tube (k) où le vide a été poussé très loin contient un écran phosphorescent b-c. La cathode N émet ses rayons à travers un écran de mica d percé d'un trou. Sans l'aimant, une ligne de lumière e-f rectiligne traverse le tube jusqu'à l'anode P. Avec l'aimant, la ligne de lumière se courbe et s'arrête en g.



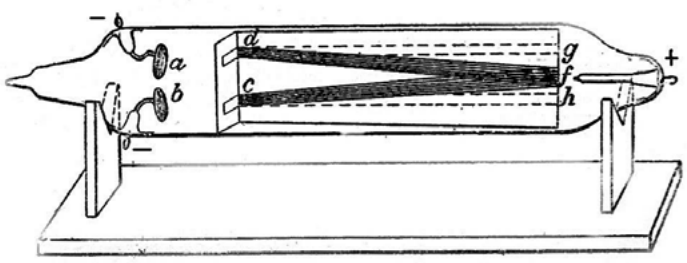
j Déviation par électro-aimant

Si le vide est imparfait dans le tube (j) on remarque une mince ligne de lumière violette et lorsqu'on excite l'électroaimant la ligne de courant s'incurve vers l'électro puis reprend l'horizontale jusqu'à l'électrode positive. Le rayonnement n'est donc pas de la même nature que lorsque le vide est parfait.

– Deux rayonnements de matière se repoussent

Si les aimants dévient les rayons, Crookes cherche alors si deux rayonnements parallèles s'attirent comme des conducteurs traversés par un courant de même sens. Dans le tube (l) où le vide est parfait est placé l'écran phosphorescent en longueur. Il y a deux cathodes a-b disposées en face d'un écran percé de deux trous d et c pour lancer un ou deux courants de matière radiante.

Si ces courants transportent un courant électrique, ils se comporteront comme des fils conducteurs et s'attireront, mais s'ils sont simplement composés de molécules négatives, ils se repousseront.



Deux rayons parallèles se repoussent

On alimente successivement les cathodes a puis b , leur rayonnement suit le parcours d-f puis c-f pour rejoindre l'électrode positive. Si l'on maintient seulement un seul rayonnement d-f, depuis la cathode a ; puis on alimente la cathode b, le rayon suit brièvement le trajet c-f et les deux rayons se repoussent pour prendre les trajets horizontaux d-g et c-h.

Crookes en déduit que les courants de matière radiante sont composés de molécules électrisées de même signe, négatif comme il le pense, et se repoussent alors comme des corps chargés d'électricité de même signe.

Conclusions partielles

Crookes constate simplement, sans l'expliquer, une différence fondamentale :

– Lorsque le tube contient encore du gaz à pression réduite, la trace lumineuse est bien un courant dans un plasma que nous savons (pas lui) constitué d'électrons, d'atomes de gaz ionisé positifs, et d'atomes neutres.

– Lorsque le tube est presque totalement vide, la trace phosphorescente n'est plus qu'un faisceau d'électrons seuls qui ne réagissent plus comme un courant, mais comme un flux de particules négatives qui se repoussent mutuellement.

Il a cependant bien compris que dans le second cas, avec vide profond, les molécules émises par la cathode et accélérées par le champ électrique, ne rencontrent plus celles de gaz trop raréfié (libre parcours moyen plus long que le tube), choc qui dans le premier cas provoque l'ionisation des atomes perdant un électron et émission de photon lorsqu'ils captent un autre électron, revenant à l'état neutre.

Toutes ces expériences de Crookes regroupant celles d'une dizaine de chercheurs permettent de percevoir le long cheminement intellectuel et expérimental des physiciens vers une finalité qu'ils ignorent, la réalité de l'électron et les immenses conséquences qui en découleront. C'était la recherche fondamentale d'aujourd'hui : chercher à comprendre.

Ce ne sont pas les seules recherches sur l'électricité dans les gaz plus ou moins raréfiés, comme les tubes de Geissler. D'autres très approfondies ont aussi été conduits par plusieurs chercheurs, W. Spottiswoode, Warren de la Rue, W. Müller, Moulton, Gassiot, W. Thomson, et décrits dans plusieurs documents :

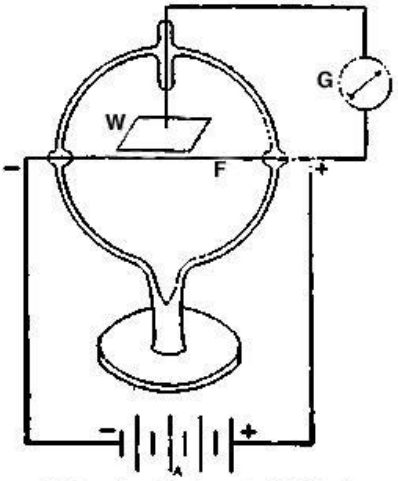
- Mémoire de Müller et de le Rue, à la Société Royale 23/08/1977, sur les stries et la décharge disruptive réellement continue, par des batteries de 1000 à 8000 piles, source différente de la bobine d'induction dont la décharge est discontinue mais à fréquence élevée

- Mémoire de Spottiswoode et Moulton du 2/4/1879 sur l'état sensitif des décharges dans les gaz raréfiés, suivi d'une deuxième partie le 8/4/1880 sur l'état sensitif des décharges dans le vide, la phosphorescence et les courants moléculaires.

Mais ces travaux n'amenaient pas de nouveaux faits majeurs pour expliquer ces courants moléculaires ou cathodiques, des électrons pour nous. Deux camps s'opposaient sur leur nature, corpusculaire d'après les Anglais Crookes, Thomson et autres, ondulatoire pour les Allemands, Hertz en particulier.

Le problème fut alors un peu délaissé par les physiciens pendant une douzaine d'années

L'effet Edison



m Tube de Elster et Geistel

Pourtant, ce problème aurait pu être repris à l'occasion d'une découverte apparemment secondaire, faite indépendamment par deux équipes.

En 1882, deux physiciens d'Heidelberg, Julius Elster et Hans Friedrich Geitel, avaient exploré la conductivité dans les tubes à gaz à basse pression à la suite de Hittorf. Une ampoule contenant de l'air résiduel était traversée par un filament F chauffé au rouge par une pile. Au-dessus de ce filament était suspendue une plaque de platine W reliée à un galvanomètre G qui déviait sous l'effet d'un faible courant (m). Ils publièrent un mémoire (1), mais celui-ci ne fut pas remarqué. Seul Lee de Forest indique que cette expérience fut à l'origine de son Audion, ancêtre de la triode, lequel était un tube à gaz ionisé, mais pas à vide (V-5). On ne savait pas en 1882 que les métaux chauffés au rouge, dans les gaz à faible pression, émettaient des électrons qui ionisent ensuite les atomes de gaz permettant véhiculant des courants. Ce fut W. Richardson qui étudia cet effet thermoïonique.

Effet Edison

L'année suivante, en 1883, Edison et ses assistants cherchait à remédier à un grave défaut des lampes à filament, dont le carbone se vaporisait et déposait sur le verre en le noircissant. Ensuite la diminution du filament l'amenait à trop chauffer et se rompre. Il place une plaque entre les deux éléments d'un filament en U espérant recueillir ainsi presque la moitié des émissions de carbone de chacun des éléments, plutôt qu'il se dépose sur le verre. La lampe (n) a été présentée au stand Edison à l'exposition de 1884 à Philadelphie, donc probablement proche de l'original.

La plaque était maintenue par une tige métallique scellée dans le verre et sortait dans le culot de la lampe. On ne sait pas quel opérateur avait en main un galvanomètre pour mesurer du courant, branché par un fil sur la borne positive de la lampe. Probablement par hasard, il toucha avec l'autre fil la tige de la plaque et constata une déviation. Il signala l'anomalie, on étudia le problème et s'aperçut que ce courant était plus fort lorsque la lampe était plus lumineuse. Il n'était pas dans l'esprit de Menlo Park de perdre son temps pour comprendre quelque chose qui n'avait pas d'application apparemment rentable. Aussi Edison y vit un moyen pour contrôler le courant, donc la puissance de la lampe, c'est-à-dire un compteur. Il déposa à tout hasard un brevet en 1884, jamais utilisé comme la plupart. Il constata que si l'on connecte le galvanomètre non plus à la borne positive, mais à la négative, il n'y avait aucun courant. Cet effet redresseur fut à l'origine de la diode de Fleming.

Il est intéressant de constater que c'est exactement l'expérience d'Elster et Geitel, à la différence que ces derniers étudiaient le comportement des tubes à gaz raréfié, différent des tubes à vide profond, comme la lampe Edison.

Bien connu, comme tout ce qui se rapportait à Edison, cet effet ne suscita pas un grand intérêt, si ce n'est l'année suivante une étude par W.H. Preece, directeur du Post Office de Londres. Fleming l'étudia un peu, mais ne prit son brevet pour une diode détectrice que 20 ans plus tard. D'ailleurs cette diode fut très peu utilisée pour la radio ; la triode résulte d'après son inventeur de l'expérience d'Elster et Geitel, et non de la diode de Fleming (V-5)

Découverte des Rayons X

Cette découverte inattendue, par hasard, simple et rapide, est une retombée collatérale des travaux de tous ces physiciens à la recherche du comportement des décharges dans les tubes à gaz raréfiés. Ils ne cherchaient rien de précis, simplement comprendre. Démarche toujours très classique aujourd'hui, et parfois fructueuse, par hasard.

Comme à chaque découverte, il y avait au moins deux précurseurs connus, parmi les dizaines de chercheurs qui ont expérimenté avec ces tubes depuis Hittorf à Crookes. Tesla qui avait produit des rayons invisibles avec un tube de Crookes particulier en 1892. Il a ensuite développé le sujet dans une conférence en 1897. L'Allemand Philip Lenard qui avait modifié un tube avec une petite fenêtre en métal mince d'où était sorti un rayonnement qu'il pensait être des rayons cathodiques. On peut aussi ajouter le challenger de Tesla, Edison, ainsi que Pupin.

Wilhelm Conrad Röntgen expérimentait donc sur des tubes de Crookes à l'université de Würzburg. Le soir du 8 novembre 1895, il remarque dans l'obscurité relative de son labo qu'un écran, à quelques mètres, devenait fluorescent quand le tube était sous tension. Cet écran était revêtu de platino-cyanide de baryum. Que faisait-il là ? Röntgen ne l'a pas dit. Encore le hasard.

Pensant que ce serait un effet des rayons cathodiques, qu'on croyait confiné dans le tube. Röntgen enveloppe le tube dans une boite en carton noir. La phosphorescence persiste.

Il s'agit de rayons inconnus qu'il dénomme provisoirement X.

En quelques semaines, il en examine les propriétés et cherche leur nature :

– Les rayons X traversent tous les corps à divers degrés, variables suivant leur épaisseur et leur densité.

– Une épaisseur de 15 mm d'aluminium les affaiblit sensiblement, mais ils sont presque opaques à 1,5 mm de plomb.

– Le verre les affaiblit suivant la quantité de plomb contenu.

– L'œil n'est pas traversé, ils sont invisibles.

– la fluorescence est variable, sur la calcite, le verre ordinaire, plus accentuée sur le verre à l'uranium.

– Les similitudes avec les rayons lumineux sont assez prononcées, réfraction dans un prisme, réflexions sur certains métaux. Il n'a pas pu étudier des interférences. Ces rayons X ont le même effet que la lumière sur la plaque photographique, ce qui rend aisée leur étude.

– Ils sont produits par le choc des rayons cathodiques sur la paroi en verre, mais en sont différents, en particulier ne sont pas déviés par l'aimant.

– Il pense qu'ils sont liés aux vibrations de l'éther.

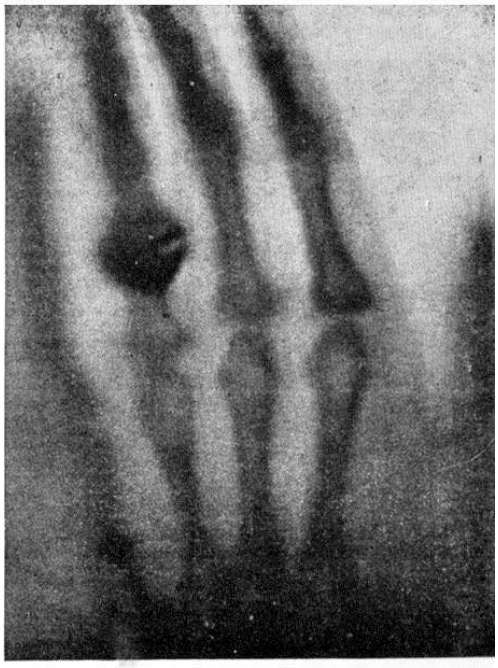
Toutes ces remarques sont consignées sur un mémoire : *Sur une nouvelle sorte de rayons* (2).

LA PHOTOGRAPHIE DE L'INVISIBLE

Par M. **L. OLIVIER**, Dr ès sciences
Directeur de la *Revue générale des sciences*.

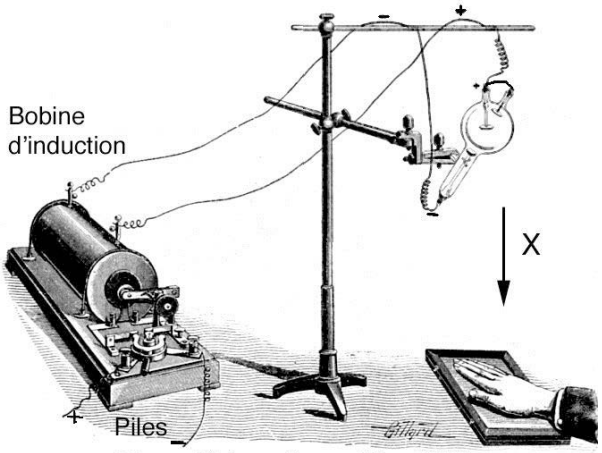
La nouvelle de la grande découverte que vient de faire le professeur Röntgen a passé directement de son laboratoire dans le public, où elle s'est propagée avec la rapidité de l'éclair avant même que les journaux scientiques aient eu le temps d'en parler.
Il n'est bruit, en ce moment, que des « rayons X »

(*La Presse médicale*, nº 9, du 29 janvier 1896.)

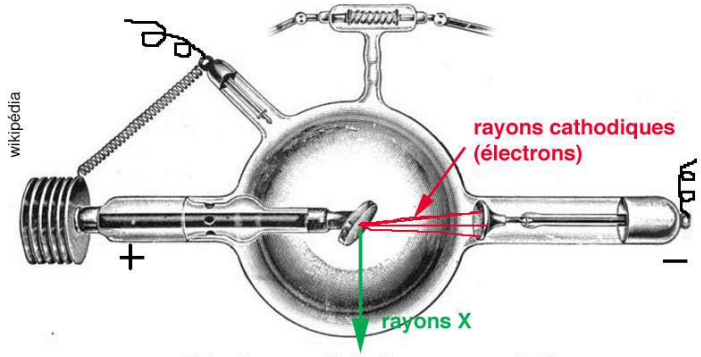


o LA PREMIÈRE RADIOGRAPHIE D'UNE MAIN.

En dehors des physiciens très intrigués, cette découverte intéressa beaucoup le public, voir l'invisible dans le corps humain c'était magique, comme la première radio-photographie de la main de Bertha Röntgen (o). On remarque une grosseur sur l'annulaire, ce n'est pas de l'arthrose mais sa bague en or.



p Dispositif de radiographie - 1896



q Tube à rayons X de Cossor - vers 1902

Des améliorations suivirent. Sur la figure (p) on perçoit en bas du tube la cathode émettrice de rayons cathodiques, en fait des électrons, découverts deux ans plus tard. Ces rayons accélérés dans le fort champ électrique résultant de tensions de 20 à 40 000 V viennent frapper une anode inclinée qui renvoie des rayons X à travers l'ampoule vers la droite. Elle a été dénommée anti-cathode. Au-dessus une autre anode a un rôle auxiliaire.

Après 1900, un premier constructeur anglais de verreries scientifiques, Alfred Cossor, commercialisait des tubes à rayons X (q). Au-dessus de l'ampoule, un « adoucisseur » avait pour rôle le maintien d'un vide adéquat. À l'arrière de l'anti-cathode un radiateur servait à la refroidir.

La production des rayons X par le bombardement des rayons cathodiques sur les atomes de l'anode ne fut comprise qu'après la découverte de la structure de l'atome en 1912. Friedrich et Knipping démontrèrent que ces rayons X étaient de même nature que la lumière mais de très haute fréquence, dans un large spectre.

Après 1920, la cathode dite froide devint cathode chaude en la réalisant en tungstène chauffé, produisant plus d'électrons par émission thermoïonique.

Les rayons X provoquent l'ionisation des espaces d'air qu'ils traversent. Par exemple, l'espace entre deux plaques d'un condensateur chargé à fort potentiel puis isolé, se décharge par ionisation. Cette propriété est utilisée dans les chambres d'ionisation pour la recherche.

La nocivité des rayons X pour l'homme, brûlures, modifications génétiques et cancer, ne fut comprise que progressivement. Marie Curie elle-même, l'ayant négligé, en est morte.

La dernière machine d'imagerie médicale utilisant les rayons X a été le scanner dans lequel le tube générateur tourne rapidement autour de la partie à examiner. Ses multiples images sont analysées par informatique pour donner une série de photos de coupes transversales.

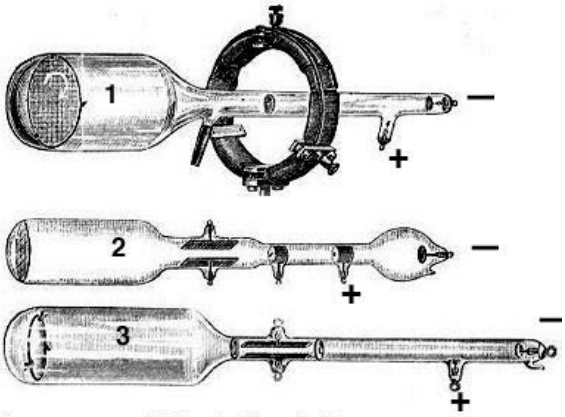
Le tube de Braun

Ferdinand Braun, professeur allemand à Strassburg, s'intéressait aux débuts de la TSF, domaine où il apporta une nette amélioration de puissance et de sélectivité avec un couplage par induction du circuit d'antenne (V-5) qui contribua à sa nomination au prix Nobel de 1909.

On n'avait aucun moyen à l'époque pour mesurer ou visualiser les courants HF générant des ondes dans l'antenne, uniquement l'intuition vérifiée par des expériences. Il y avait bien l'ondographe inventé par Blondel en 1892, mais les capteurs étaient électromagnétiques et n'enregistraient que des fréquences assez basses (IV-3).

Braun connaissait les travaux sur les tubes de Crookes et jugea que ces rayons cathodiques permettraient de visualiser sur un écran les phénomènes électriques très rapides qu'il étudiait pour la TSF. On savait que les rayons étaient déviés, soit par le champ magnétique transversal d'une paire de bobines, soit par le champ électrique entre les plaques d'un condensateur.

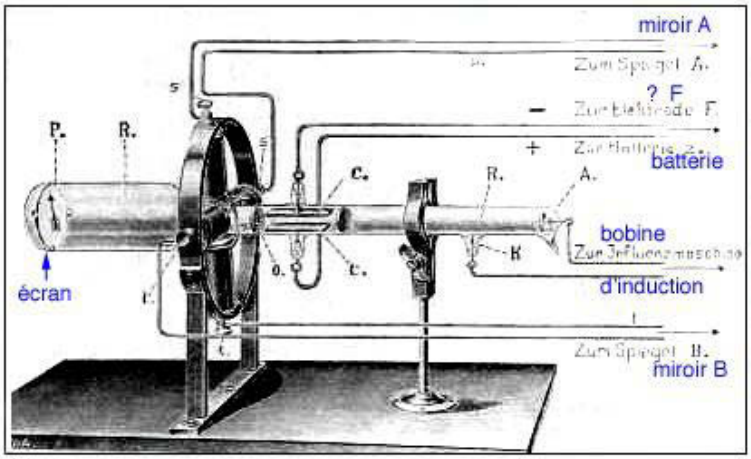
Il essaya plusieurs types de tubes réalisés par Müller, verrier, successeur de Geissler. À l'extrémité opposée à la cathode, le tube de fort diamètre se terminait par un disque en mica revêtu de produit phosphorescent quadrillé pour permettre des mesures. Dans la partie initiale du tube, le faisceau était aminci en passant par un ou plusieurs trous de 2 mm dans un diaphragme. Le tube 1 de la figure (r) avait un écran de diamètre 13 cm, un diaphragme et une bobine torique ; Les tube 2 et 3 dont la bobine est retirée avaient une paire de plaque de déviation par champ électrique ainsi que deux diaphragmes.



r Différents tubes de Braun

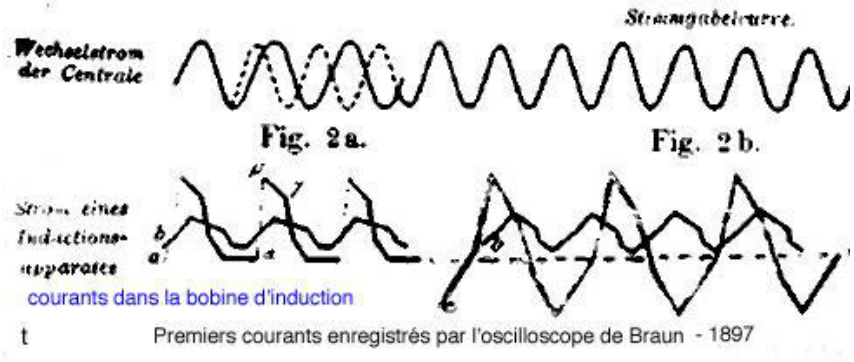
Braun publia son mémoire en février 1897, *Procédure pour visualisation et étude de courants variables*. (3) Professeur orienté vers la pratique, il ne cherche pas à comprendre la nature des rayons cathodiques, mais à les utiliser comme nouveau moyen de mesure.

Le tube (s) ressemble au tube 3 précédent avec 2 paires de bobines, l'une horizontale sert à faire défiler le faisceau horizontalement, formant ce qu'on appelle aujourd'hui la base de temps, l'autre vertical dévie en fonction du signal envoyé par un capteur A à miroir rotatif de König. Un autre signal à enregistrer arrive sur les plaques du condensateur.



s Premier oscilloscope de Braun

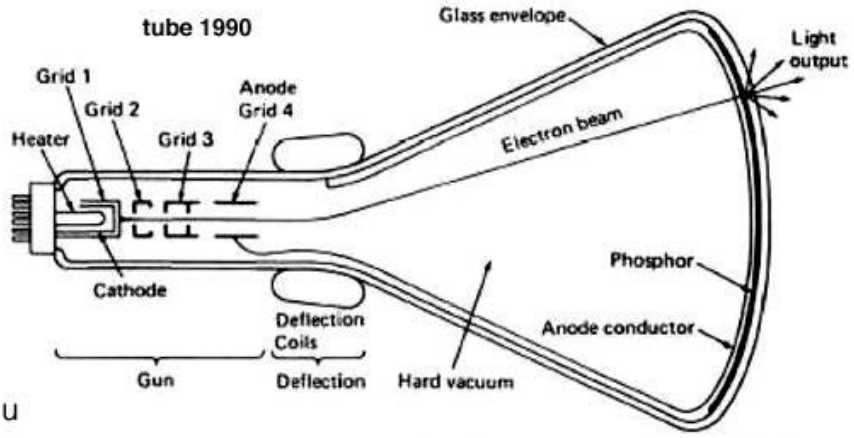
Avec son tube, Braun enregistrait les sinusoïdes très déformées dans la bobine d'induction (t). Cet appareil de recherche a été fabriqué pour les laboratoires à l'usine anglaise Cossor.



t Premiers courants enregistrés par l'oscilloscope de Braun - 1897

Lorsque l'on commença à envisager la télévision au début du XX^{e}, le tube de Braun apparut comme la solution pour transformer des signaux électriques en images sur un écran. Il résolvait le problème de la réception comme l'ont envisagé Hell puis Rosing, mais pour l'émission, ce fut beaucoup plus difficile.

Le tube cathodique, CRT, est devenu le symbole de la télévision pendant tout le XX^{E} siècle (u).



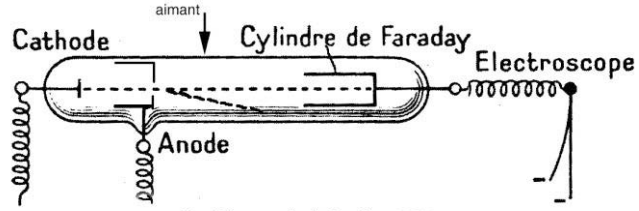
u

Découverte de l'électron

La découverte des rayons X avait ranimé la curiosité des chercheurs pour comprendre ce qui se passait dans le tube de Crookes. Quelle était la nature de ces rayons cathodiques qui se transformaient en un autre rayonnement étrange, capable de traverser presque toutes les matières, alors que les rayons qui les avaient créés ne traversaient même pas le verre du tube ?

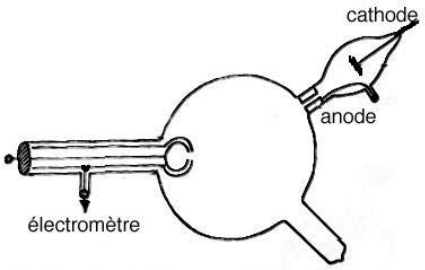
Ces rayons cathodiques n'étaient pas vraiment assimilables à un courant, car ils circulaient du moins au plus, à l'envers du courant normal, depuis Volta. On pouvait supposer qu'ils étaient chargés négativement, parce qu'ils sortaient de la cathode négative qui les repoussait.

Ce doute fut levé en 1895 par un jeune préparateur agrégé de l'Ecole Normale, Jean Perrin. Il plaça dans un tube, un cylindre de Faraday en face de la cathode où se dirigeaient les rayons cathodiques (v). Le cylindre était relié à un électroscope dont la déviation indiquait la charge électrostatique. A la mise sous tension, le faisceau entrant dans le cylindre faisait dévier les feuilles de l'électroscope du côté négatif. Si l'on approchait un aimant, le faisceau dévié ne rentrait plus dans le cylindre, l'électroscope ne déviait pas. Le faisceau cathodique était donc bien négatif.



v Expérience de J.Perrin- 1895

En 1897, Joseph John Thomson, professeur au Laboratoire Cavendish consacre des recherches pour élucider le problème des rayons cathodiques (4). Il commence par reprendre l'expérience de Perrin qu'il ne connaissait peut-être pas. L'ampoule qu'il conçoit à cet effet est plus élaborée, les rayons sont dirigés sur deux tubes métalliques coaxiaux fendus (w). Les rayons sont bien négatifs.

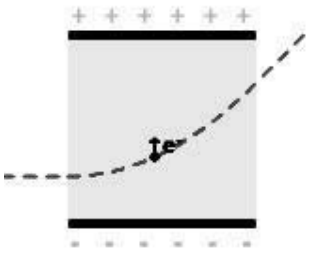


w Version de Thomson du tube de Perrin

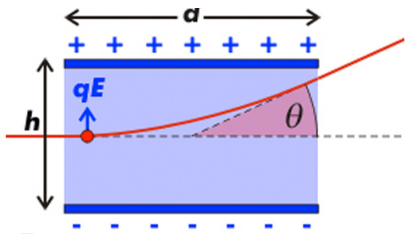
La controverse persistait entre les partisans de la nature ondulatoire des rayons, en général les Allemands, Hertz Lénard, Wiedmann, et les Anglais, Crookes, Thomson qui les considéraient comme des particules.

Hertz avait montré que les rayons n'étaient pas déviés par le champ électrique lorsqu'ils traversaient l'espace entre les deux plaques d'un condensateur. De plus ils traversaient une mince feuille d'or, pas possible pour des particules.

Thomson conteste ce résultat, fait des essais qui démontrent l'inverse, les rayons sont repoussés par la plaque négative (x).


x Le champ électrique dévie les rayons

L'erreur de Hertz venait de ce que le tube n'était pas bien vidé d'air.

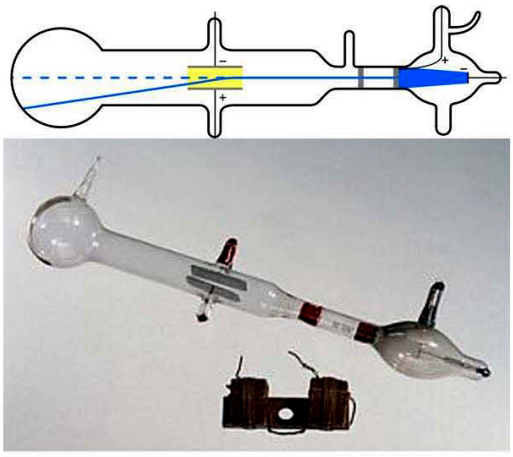


calcul et mesures de q/m

Le gaz résiduel ionisé par les rayons provoquait la décharge des plaques, les ions positifs allants sur la plaque négative et l'inverse, diminuant fortement le champ électrique.

Pour l'expérience suivante, il combine un tube particulier qui permet d'appliquer au faisceau, à la fois un champ électrique par deux plaques de condensateur, et un champ magnétique par deux bobines (y). Cela lui permet de calculer la vitesse V des rayons qui est le rapport de la valeur du champ électrique sur celle du champ magnétique V = E/B.

Ensuite, connaissant V, il va calculer le rapport de la charge à la masse q/m d'une particule, en mesurant les valeurs E, d et Θ du schéma (z). Le calcul est détaillé dans *cambridge physics* (1).


y Tube de Thomson

Ce rapport est la charge spécifique d'une molécule ou corpuscule constituant les rayons cathodiques. Surprise, ce rapport est près de 2000 fois celui de la plus légère particule connue, l'ion d'hydrogène par électrolyse. Ou bien il a une charge énorme, ou bien une masse très faible. Il estime que la deuxième hypothèse est la bonne, jusqu'à d'autres vérifications.

Thomson opérait avec des électrodes en aluminium - il les remplace par divers matériaux - rien ne change. Ces corpuscules, nom qu'il leur donne, existent donc peut être dans tous les corps. C'est alors un composant universel de la matière, inclus dans l'atome qu'on pensait être le plus petit constituant.

Sur la suggestion de l'Irlandais George Stoney qui avait donné en 1891 le nom électron à la charge électrique unitaire, ce nom fut étendu au corpuscule de Thomson, contraction de électric ion.

L'année suivante 1898, l'effet photoélectrique permet de vérifier que la charge e produite est bien du même ordre de grandeur que la charge de l'atome H dans l'électrolyse, donc sa masse est environ le 1/1000 de celle de l'atome H

Ensuite, en 1899, Thomson met au point avec son assistant Wilson une méthode permettant de mesurer indépendamment e et e/m.

En 1900, Pierre et Marie Curie identifient les rayons bêta, issu de la radioactivité, comme étant des électrons.

Finalement, Millikan trouve en 1909 une méthode très précise pour mesurer cette charge.

En 1906, J.J. Thomson reçoit le prix Nobel « en reconnaissance pour les grands mérites de ses recherches théoriques et expérimentales sur la conduction de l'électricité par les gaz ». Étrange, l'électron est libre dans le vide, quand il n'y a plus de gaz.

En 1937, ironie, son fils Georges Paget Thomson reçoit le Nobel pour avoir démontré que l'électron est une onde. Louis de Broglie avait émis l'hypothèse de cette dualité onde-particule en 1924.

Électron

Masse $m_e = 9{,}1093897 \times 10^{-31}$ kg $\quad m_e = 1/1836$ masse de l'atome H

Charge $q_e = -1{,}60217733 \times 10^{-19}$ coulomb

Conséquences de la découverte de l'électron

En se limitant à la première moitié du XX^e^, elles ont été d'une importance variable suivant les domaines.

– L'électricité énergie

Cela peut paraître surprenant, mais les applications dans ce domaine n'ont pratiquement pas évolué avec la connaissance de l'électron, si ce n'est une meilleure compréhension de certains phénomènes tels l'arc électrique ou l'effet corona, cousin des feux de St Elme

– L'électricité information

Dans ce domaine, l'électron n'a pas fait naître de nouveaux moyens pour le transport d'information, mais a magistralement fait évolué TSF, TV et autres. L'irruption des tubes à vide, où son extrême liberté, rapidité, légèreté, sensibilité aux champs électriques et magnétiques étaient à la base de l'électronique, maîtrise de l'électricité dans les tubes à vide. Ce furent le tube de Braun, ancêtre du tube cathodique, la diode de Fleming puis la triode de Lee de Forest et ses nombreux descendants.

– La matière

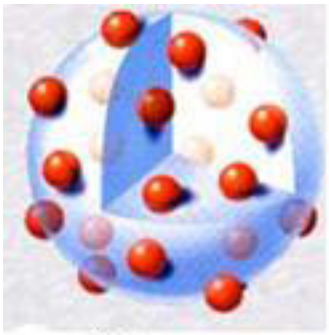
La découverte de l'électron a été le point de départ des recherches sur la structure atomique de la matière, qui ont ouvert une nouvelle branche prolifique de la physique.

– Depuis 2500 ans, la matière était constituée de différents grains suivant les corps, l'*atomos* des Grecs.

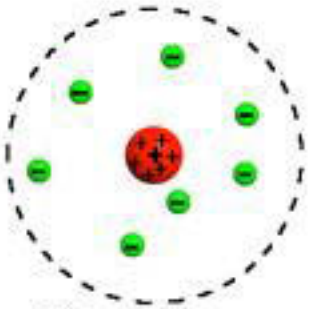
– 1898 -Thomson imagine alors un atome comme une masse positive dans laquelle sont mélangés des électrons, le modèle du *plum-pudding*.

– 1911 - Rutherford propose un modèle planétaire où les électrons tournent autour d'un noyau central positif comme les planètes autour du soleil.

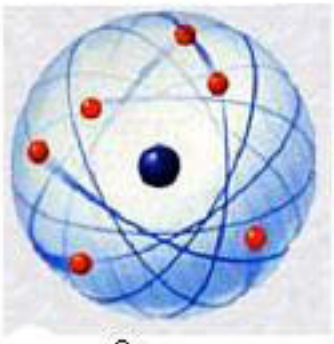
– 1913 - Niels Bohr explique les raies spectrales par une quantification des orbites en niveau d'énergie



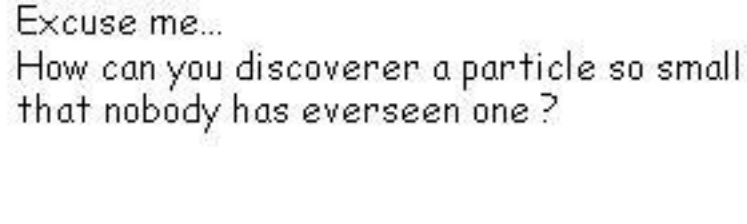
1 Thomson

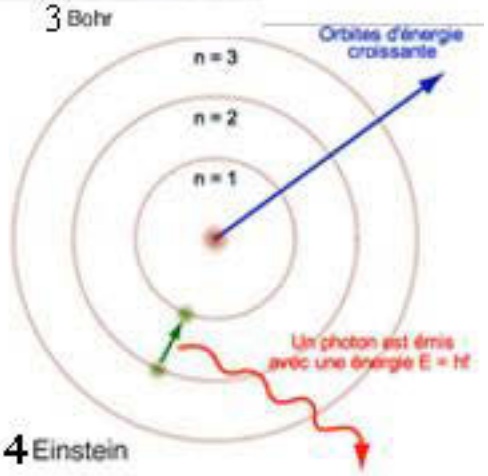


2 Rutherford



3 Bohr





4 Einstein

Compléments

Bibliographie

1 -Décharges dans les gaz raréfiés :

J.E.H. GORDON *Traité expérimental d'électricité et de magnétisme,* T2, p.114/301, traduct. de l'anglais, Librairie Baillère et fils Paris, 1881.

A. RITTER VON URBANITZKY, *Electricity in the Service of Man,* p.198/224, traduct. de l'allemand, Cassel & Company, Londres, Paris, 1890.

W. CROOKES, *La lumière radiante,* La lumière électrique, t.1, n°11, p.209/213, 1879.

J. ELSTER ET H. GEITEL, *Conduction of electricity through Gases*,Wied. Ann. XVI, p. 193, 1882 et années suivantes jusqu'en 1889

2- Rayons X

W. C. RÖNTGEN, traduction de *Über eine neue Art von Strahlen,* 12/95.: bibnum.education.fr

Fr.wikipédia.org/wiki/Rayon_X. Les rayons X ont été probablement aperçus par la plupart des chercheurs sur les tubes cathodiques, mais sans analyse.

Physique des rayons X - CERF 200www.imre.ucl.ac.be/rpr/RDGN3120/rayonsX.pdf

3- oscilloscope

F. BRAUN, *Über ein Verfahren zur Demonstration und zum Zudium des zetlichen Verlaufes variabler Ströme,* Annalen der Physik und Chemie 60 p. 552/559, 1897.

crtsite.com/page3.html

Braun peut être considéré comme l'inventeur de l'oscilloscope et du tube cathodique. Bien qu'utilisant les mêmes éléments que ses prédécesseurs, il innovait en lui trouvant une nouvelle utilisation importante. Comme Gaulard et le transformateur et le courant alternatif (ch.IX-2)

4 - Electron

cambridgephysics.org > electron

www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/électron/46271

Wikipedia

5 -Antériorité - La découverte de l'électron semble avoir été faite en 1890 par Arthur Schuster physicien anglais, d'origine allemande, d'après en.wikipedia.org/wiki/Electron

" Et ça marche même la fenêtre fermée !...."

5 – TSF - Radiophonie

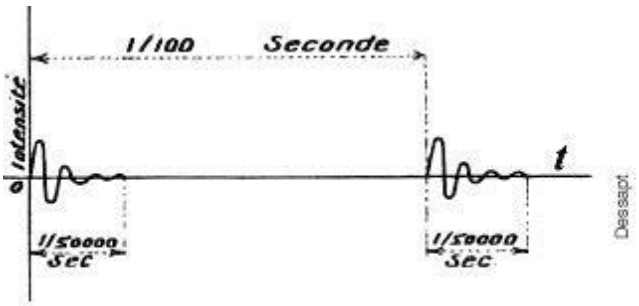
Jusqu'à la fin du XIX$_e$ siècle, les électriciens exploitaient déjà largement les propriétés de ce fluide inconnu qui circulait dans les conducteurs électriques ; c'est alors qu'une autre nature d'électricité fut découverte, les ondes électromagnétiques. Elles se propageaient dans les isolants et le vide, en dehors des conducteurs. On pensait que ce vide devait être néanmoins rempli par quelque chose, l'éther. C'était d'abord une découverte remarquable sur le plan scientifique, mais surtout ces ondes ont rapidement déclenché une application inimaginable, un nouveau procédé électrique pour transporter l'information de l'autre coté de la terre, mais sans aucun fil, les signaux télégraphiques, puis la voix et la musique, ensuite l'image animée et bien d'autres choses.

Les précurseurs

Ils ont approché les problèmes en constatant ou réalisant des transmissions de signaux à distance sans fil, sans pouvoir les expliquer ; ou bien avaient conçu des dispositifs ou expériences qui seront ultérieurement exploités pour produire ou détecter des signaux sans fil.

- Pardonnons d'abord à **Lucia Galvani** et son mari de ne pas avoir compris en 1780 que le tressaillement des grenouilles, chaque fois que l'arc d'une machine électrostatique proche était déclenché, résultait d'un train d'ondes capté par son scalpel et elle-même comme antenne (I-2). Un siècle d'avance, c'est beaucoup trop. La grenouille était ainsi l'ancêtre des détecteurs d'ondes.

- Un phénomène proche était constaté en 1838 par **Joseph Henry**, co-découvreur avec Faraday de l'induction, lorsqu'il perçut un faible courant fugitif dans un circuit éloigné de plusieurs mètres, au moment où il déchargeait une bouteille de Leyde dans l'arc d'un éclateur.



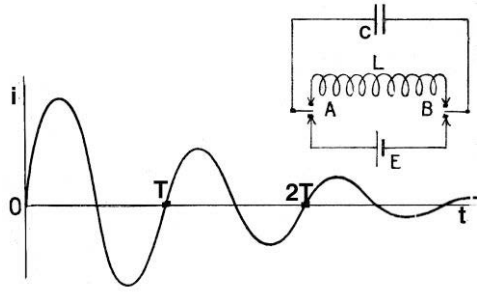
l Courant de l'arc de décharge d'une bobine d'induction

- Puis **Helmholtz**, étudiant en 1847 la décharge des condensateurs, remarquait qu'elle pouvait se produire avec un courant oscillant décroissant. Fait essentiel qui permettra de créer les courants à haute fréquence, générateurs d'ondes.

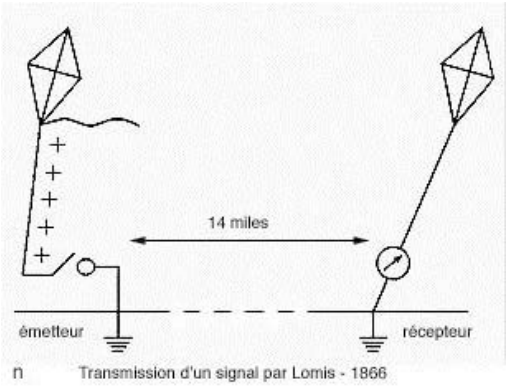
- **Wilhelm Feddersen** de Leipzig constate expérimentalement en 1858 que les décharges d'une bobine de Rhumkorff , ou d'induction, sont une série d'oscillations amorties. Il utilise le système du miroir tournant imaginé par Wheatstone, imprimant la trace sur une plaque photographique. (l)

- En 1853 **W. Thomson** en explique la théorie et définit la période T de ce courant de décharge oscillant amorti, inverse de la fréquence f : $T = 2\pi\sqrt{LC}$

en supposant que la résistance R est faible (m). Ce calcul de la période d'une oscillation, donc de sa fréquence, à partir des éléments L, C, R, d'un circuit deviendra essentiel.



m Courant de décharge d'un condensateur



n Transmission d'un signal par Lomis - 1866

- L'américain **Mahlon Loomis** fait en 1866 une expérience de transmission d'un signal à 14 miles en utilisant l'électricité atmosphérique avec un fil de 200 m suspendu à un cerf-volant (n). Il prend en 1872 le premier brevet de télégraphie sans fil, *Improvement in Telegraphing* (US Patent 129,171) mais n'arrive pas à trouver les fonds pour étudier et perfectionner son système

(carnetdevol.org/TSF/loomis)

- **Hughes**, déjà inventeur d'un télégraphe performant, puis du microphone à grains de charbon, le plus répandu, détecte avec celui-ci en 1879 les signaux émis à 500 yards par l'oscillation du courant de l'arc d'une bobine d'induction, ou de Ruhmkorff (II-4). Il présente l'expérience, d'abord à 60 yards puis à 500 yards, aux « experts » de la Royal Society, le président W. Spottiswood, G. Stokes et le professeur Huxley, qui concluent à une transmission par induction, ignorant probablement ces ondes dont Maxwell venait de révéler l'existence. Ce phénomène d'induction n'intéresserait personne, même pour faire un télégraphe sans fil à petite distance, le sujet du moment étant le téléphone à fil, transmettant loin. Hughes, professeur de musique n'ayant que des connaissances électriques limitées ne poursuivit pas. Pourtant les premiers télégraphes sans fil ont transmis des signaux, dix ans plus tard, au moyen des ondes émises par l'arc d'une bobine d'induction et les recevaient aussi avec des tubes à limaille, proches du microphone à grains. Hughes était donc sur la bonne voie, par hasard.

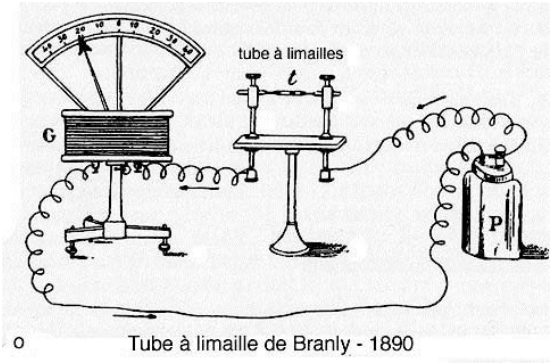
- L'italien **Calzecchi Onesti** étudie et publie en 1884 des recherches sur la variation de résistance des poudres ou limailles métalliques, variantes des grains de charbon du microphone.

- Le Français Varley s'intéresse au tube à limaille pour en faire un parafoudre à résistance variable, permettant l'écoulement des courants de surtensions à la terre.

- Le physicien français Edouard Branly travaille lui aussi sur ces poudres ou limailles et leur découvrit en 1890 une propriété curieuse, qui ne se révélera importante que quatre ans plus tard, détecter des trains d'ondes électromagnétiques, des signaux.

Branly faisait des recherches sur l'influence de la lumière sur la conductivité des conducteurs, en particulier l'ultraviolet. Il prit d'abord une petite lame de verre platinée ou dorée, ensuite une lame d'ébonite sur laquelle il écrasait de la poudre de cuivre. La lame était soumise à la lumière d'une lampe à arc. Il constatait alors qu'à l'état normal, la résistance électrique était très grande, tandis qu'elle diminuait fortement quand la plaque était éclairée par l'arc. Pour l'occulter il la masquait avec un carton, et malgré cela la diminution de résistance se manifestait encore. Estimant qu'il s'agissait alors d'un effet électrique, non lumineux, il pensait le supprimer avec du métal, mais en prenant un grillage laissant passer uniquement la lumière, la diminution de la résistance ne se produisait plus. C'était donc l'influence électrique de l'arc, pas sa lumière, qui produisait l'effet. En éloignant la lampe du corps étudié, même à une dizaine de mètres, dans une autre pièce, les murs pas plus que le carton ne gênaient la transmission (1).

Après beaucoup d'essais, Branly découvrit que l'effet était plus sensible lorsque les métaux, au lieu d'être déposés en couche mince, étaient sous forme de limailles dans un tube. Il fit part de cette découverte à l'Académie des sciences, fin 1890 : Variations de conductibilité sous diverses influences électriques « Si l'on forme un circuit comprenant un élément Daniell, un galvanomètre et le conducteur métallique, plaque d'ébonite cuivrée ou limaille dans un tube, il ne passe le plus souvent qu'un courant insignifiant ; mais il y a une diminution brusque de résistance accusée par une forte déviation quand on vient à produire dans le voisinage du circuit une ou plusieurs décharges électriques… L'action peut être constaté à plus de 20 m à travers des cloisons et murs. Les variations de résistance sont considérables, de plusieurs millions d'ohms à 2000 ou même 100. La diminution n'est pas passagère. » (o)



Tube à limaille de Branly - 1890

Pour nous, ce tube de Branly allait devenir un nouveau détecteur d'ondes, plus pratique et précis que le résonateur de Hertz, semblable au système conçut en 1884 par Calzecchi Onesti, que Branly ignorait probablement.

Mais en 1890, ni Branly ni les académiciens n'avait pas encore bien compris que ce tube détectait les ondes de Maxwell émises par l'arc de la lampe, ondes dont Hertz allait démontrer l'existence en 1892. C'était l'un des nombreux effets de l'électricité que l'on découvrait par hasard sans le comprendre. D'ailleurs dans ses communications pendant les années qui suivirent, Branly n'a jamais évoqué la possibilité que cette perturbation résultât des ondes de Maxwell, dont peu de physiciens avaient connaissance. Aucune expérience vers cette hypothèse n'est signalée avant 1894. Certains ont pensé que le nom de radioconducteur que Branly lui donna plus tard, n'étant pas satisfait du nom de cohéreur donné par Lodge, avait un rapport avec la future radiophonie, qui n'apparut qu'après 1915. Ce nom signifiait pour Branly qu'il détectait des rayons d'énergie radiante, ou rayons électriques, cathodiques, mis en évidence par Crookes, à cette époque - comme son radiomètre captant l'énergie des rayons lumineux (V-2).

.Ensuite Branly chercha longtemps une explication à ce phénomène de brusque diminution de résistance ; Lodge en proposa aussi une autre, mais il leur manquait à tous deux la connaissance de l'électron et de la structure de l'atome.

On rapporte que d'autres ont aussi constaté des transmissions de signaux électriques à distance, sans explication. Mais nul n'imaginait que ces signaux transmis avaient un rapport avec les prédictions théoriques de Maxwell, qui n'étaient d'ailleurs connues après 1873 uniquement par quelques dizaines de scientifiques.

Ce n'est que nous, qui connaissant la suite, construisons l'histoire des découvertes comme une progression linéaire, logique, d'une succession de causes et leurs conséquences, alors qu'elle n'est le plus souvent que celle de hasards, détours, erreurs, intuitions ou coups de génie.

L'idée de propagation de signaux électriques à distance était simplement dans l'air, ou plus précisément dans ce cas, dans l'éther (V-3).

Les ondes, nouveau vecteur électrique d'information

Au début de la décennie 1890, les électriciens étaient très occupés dans le domaine de l'électricité-énergie par le développement qu'allait prendre le courant alternatif, dont la supériorité sur le continu était définitivement établie. Dans le domaine de l'électricité-information, les développements soutenus du télégraphe et du téléphone prenaient un rythme de croisière. La nouvelle civilisation industrielle n'avait pas grand besoin d'un nouveau vecteur d'information.

Néanmoins l'idée d'utiliser les ondes de Maxwell-Hertz, pour transmettre des signaux sans fil, a effleuré quelques pionniers, reproduisant l'expérience finale de Hertz avec des cohéreurs de diverses variantes pour transmettre des signaux à des dizaines, centaines de mètres, puis des km.

– En France, Blondlot, Turpain, Cornu – en Italie Righi – en Amérique, Fessenden — en Allemagne, Braun, Slaby — en Inde, Bose — en Nouvelle-Zélande, Rutherford — et en Angleterre, les maxwelliens Lodge et Heaviside ainsi que W. Thomson.

– W. Crookes présenta à l'AIEE en 1891 une communication remarquée sur les possibilités d'une télégraphie sans fil à partir des travaux de Hertz. Elle fut publiée dans Nature et Fortnightly Review (1/1892)

D'autres sont connus pour avoir fait avancer la question à divers degrés, ou tout au moins essayé :

Expériences de Preece – 1892

William Henry Preece était l'ingénieur en chef du Général Post Office de Londres, en charge des liaisons télégraphiques et téléphoniques d'une importance considérable pour une nation insulaire, particulièrement ses liaisons sous-marines avec le monde entier.

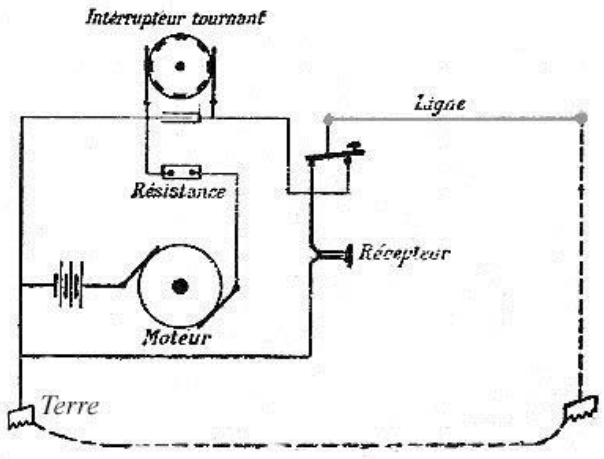
Cet ingénieur se considérait comme un praticien, souvent en désaccord avec les scientifiques, trop théoriciens à son goût.

Au cours des années 1880 plusieurs cas avaient été signalés d'une réception anormale de signaux ou de paroles sur des circuits éloignés de parfois plusieurs centaines de mètres de la ligne où ils étaient normalement transmis, sans que l'on puisse attribuer cette anomalie à une conduction par la terre. Il s'agissait d'induction électromagnétique, ce que nous dénommons aujourd'hui la diaphonie.

Des essais avaient été conduits en 1886/87, avant que les ondes hertziennes soient connues, pour tenter de communiquer sans conducteur. L'américain Dolbear avait pris en 1886 un brevet pour communiquer sans fil avec l'induction.

En 1892, Preece, réalise plusieurs essais d'un système qu'il savait probablement basé sur l'induction électromagnétique classique, bien qu'il dût connaître la récente découverte de Hertz. Mais il laissait planer le doute, son intention étant d'apparaître comme l'un des futurs promoteurs de cette télégraphie sans fil que son expérience pressentait prochaine.

Son procédé consistait à disposer deux postes émetteurs-récepteurs A et B comprenant chacun un longue ligne accrochée entre deux poteaux. Les deux fils étaient parallèles, et leur longueur devait être celle de la distance séparant les 2 postes, pouvant atteindre quelques km. L'appareil relié à la ligne de chaque poste comprenait (p) un interrupteur rotatif entraîné par un moteur qui envoyait dans la ligne le courant haché 250 fois par seconde d'une batterie de 100 éléments lorsque le manipulateur Morse était manœuvré au poste émetteur. Au poste récepteur, un signal audible était entendu avec un récepteur téléphonique. Le système a fonctionné entre les deux rives du canal de Bristol sur 5,3 km depuis Pennarth. Une autre expérience a aussi réussi à l'île d'Arran sur 6,4 km. Preece reconnaissait que l'établissement de longues lignes entre deux postes distants de quelques km limitait ce procédé à quelques cas particuliers. Il était dénommé, à tort, à ondes électromagnétiques ou plutôt à ondes magnétiques pour le situer par rapport aux ondes électriques de Hertz, terme qui subsistera jusqu'au début du XX$_e$ siècle. Ces travaux restèrent peu connus jusqu'à la présentation médiatique que fit Preece en juin 1897 à la Royal Institution.



Poste de télégraphie sans fil par induction
Système Preece - 1892

Preece annonçait en 1894 : Il serait facile de parler entre la France et l'Angleterre, à travers le détroit de Douvres. Marconi le démontrera en 1899, pas avec le même procédé, mais avec des signaux transmis par ondes hertziennes.

Tesla prophétise - 1893

Promoteur des fréquences et tensions élevées, Tesla avait déjà fait en 1891 une conférence très remarquée sur les nouvelles possibilités d'éclairage à haute fréquence avec un seul fil (IV-3). En 1893, toujours sur ce thème, il organisa une nouvelle conférence - démonstration au Franklin Institut de

Philadelphie, puis à St Louis : « *On Light and other High Frequency Phenomena* ». D'autre part, il affirmait la possibilité de transmettre sans conducteurs des signaux intelligibles et peut être même de l'énergie. Dans ce but, une source à haute fréquence serait reliée d'une part à la terre et d'autre part à un corps isolé de grande surface produisant quelque action électrique suffisamment puissante pour qu'elle soit perceptible, au moyen d'instruments convenables, en un point quelconque de la surface de la terre. Cela reposait donc sur des bases très hypothétiques, pas encore vérifiées aujourd'hui.

Alors que Tesla ne rapprochait nullement ces effets, d'une action à distance par les ondes électromagnétiques de Maxwell-Hertz, beaucoup y ont vu, après sa mort, l'anticipation de la TSF que Crookes avait déjà suggérée en 1891.

En effet, l'expérience présentée, suivant un témoignage décrit par M. Cheney, ressemblait beaucoup à celle de Hertz. L'oscillateur du transmetteur était un puissant transfo de 5 kW alimentant une batterie de bouteilles de Leyde une bobine et un éclateur. D'une borne de l'éclateur montait au plafond un fil, probablement vers une plaque formant condensateur, l'autre borne était mise à la terre.

Le récepteur était constitué d'une autre batterie, d'une bobine, de condensateurs, mais l'éclateur était remplacé par un tube à décharge de Geissler dans un gaz à faible pression. Celui-ci était relié comme le transmetteur, d'un côté à un fil montant au plafond à une plaque invisible, de l'autre à la terre. Lorsque l'on fermait l'interrupteur du transfo sur une ligne puissante, celui-ci grognait et gémissait, les extrémités des bouteilles de Leyde grésillaient et les étincelles crépitaient sur l'éclateur. A 10 m de là, le tube de Geissler s'illuminait dans l'obscurité où l'on avait plongé la salle. C'était magique. Ainsi la TSF était née, concluait G. Broughton, le fils du témoin, des années plus tard.

Conclusion un peu trop hâtive, celui-ci ignorait peut-être l'expérience de Hertz de 1887 et surtout que des ondes électromagnétiques étaient bien impuissantes à produire les tensions élevées nécessaires pour amorcer un tube de Geissler. Il s'agissait d'induction électrostatique à hautes fréquence et tension, comme dans ses démonstrations précédentes d'éclairage de 1891.

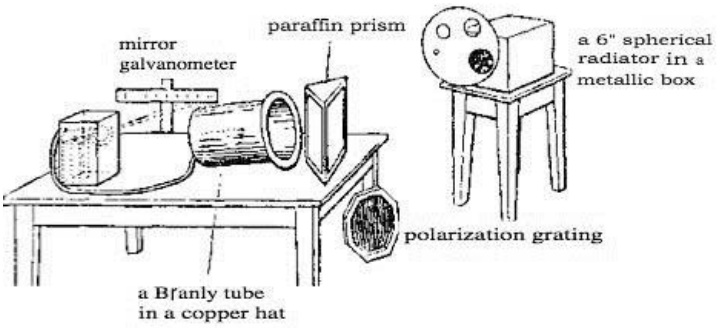
Dans leur enthousiasme, certains supporters ajoutent même que le tube de Geissler, à faible pression de gaz, anticipait la future lampe triode sous vide, de même que les fils qui montaient au plafond de la salle depuis l'émetteur et le récepteur anticipaient l'antenne.

On trouve facilement partout, ce que l'on a envie d'y voir.

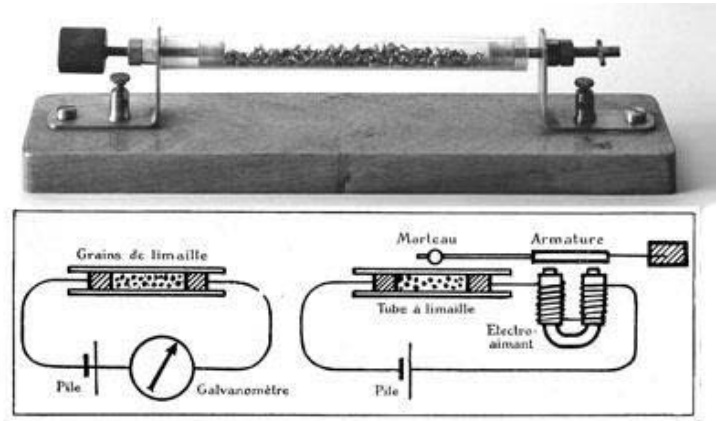
Lodge réalise la première expérience de télégraphie sans fil – 1894

Le 1er janvier, Hertz disparaissait à 36 ans, atteint d'une grave maladie du sang. La seule reconnaissance officielle de sa magistrale découverte fut de donner son nom à l'unité de fréquence en 1930.Lodge est invité par la Royal Institution à présenter en juin 1894, une *lecture* pour rappeler les travaux de Hertz, qu'il étoffa avec ses propres réflexions et travaux. Cette conférence, lecture en Angleterre, se déroula en trois parties :

- Le premier sujet concernait la physique, la reproduction des expériences de Hertz avec démonstrations de l'identité de la lumière avec ces ondes, réflexion, réfraction, polarisation. Le matériel utilisé était différent. Sur le croquis approximatif (q), publié par l'Electrician, figure l'oscillateur à bobine de Rhumkorff *(radiator)* particulier, sphérique pour obtenir des ondes courtes de 17 cm, plus pratiques pour une démonstration. Hertz était déjà descendu à 66 cm pour certaines expériences. La différence était le récepteur accordé, un *coherer*, variante améliorée du tube à limaille de Branly, nom que lui avait donné Lodge.

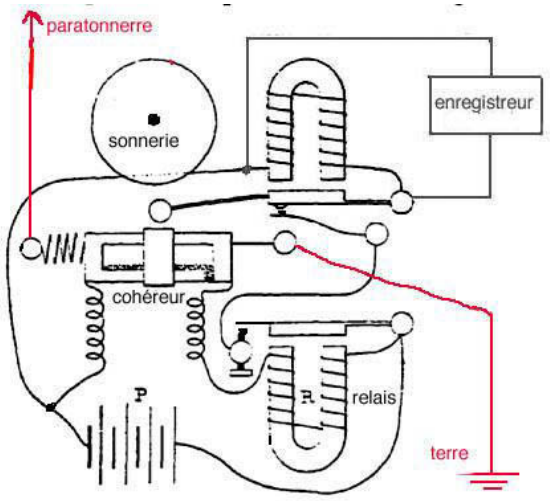


q Expériences de Lodge - Royal Institution - juin 1894 - *The Electrician 33*



r Cohéreur - décohéreur de Lodge -1894

C'était la première fois qu'un tel dispositif (r) était utilisé dans le rôle de détecteur d'onde. Cependant il l'a modifié en le complétant d'un petit électro-aimant frappeur de sonnerie, le décohéreur, dont le choc sur le cohéreur le ramenait aussitôt à son état résistant après chaque bref captage d'un train d'onde. Le schéma (s) montre comment la résistance subitement faible du cohéreur entraîne l'excitation du relais, lequel actionne d'une part un trembleur, une sonnerie dont le marteau frappe le tube qui reprend sa forte résistance, d'autre part un enregistreur. À cette conférence de juin, l'enregistreur devait permettre à l'assistance de visualiser la transmission d'une onde. Lodge adopta un simple galvanomètre à miroir projetant un petit spot sur écran. Le résultat n'était pas très spectaculaire, le spot n'étant pas fixe, sans doute l'influence du trembleur. L'Electrician fit remarquer ce défaut qu'il faudrait supprimer.



s Schéma du récepteur de Lodge (en noir) de Popov (adjonction rouge) d'après G. Ferrié (1909)

- Le second sujet traité concernait la physiologie - *An Electrical Theory of Vision* - Il nous paraît aujourd'hui sans grand intérêt, ce n'était pas le cas pour Lodge. L'identité de nature des ondes hertziennes et de la lumière l'intriguait beaucoup et il cherchait leurs points communs. À l'émission, on ne comprenait pas comment naissait la lumière tant naturelle qu'électrique des lampes à incandescence, à arc ou tubes à décharge. Au contraire, pour les ondes, on savait depuis peu les produire avec des oscillations électriques, mais pas à la fréquence très élevée des ondes lumineuses. À la réception, l'œil captait la lumière, mais pas les ondes des circuits électriques. Lodge pensait que l'œil se comportait comme un cohéreur multiple capable d'analyser chacune des longueurs d'onde et de les transmettre au cerveau par les nerfs. Avec son assistant Robinson, il conçut un récepteur d'ondes sélectif basé sur le principe du contact à résistance variable et le présenta en 1891 à la *Physical Society*. Quand le tube de Branly fut présenté en Angleterre en 1892, Lodge chercha à l'adapter à ce problème en le modifiant de diverses façons, mais sans succès.

- La troisième partie de la lecture fut une démonstration de transmission à distance. Le *radiator*, émetteur, fut placé dans la bibliothèque et le récepteur, cohéreur et son témoin visuel le galvanomètre étaient restés dans le théâtre à une distance de 40 yards. Les émissions d'onde étaient bien transmises, témoignant que les murs en pierre étaient traversés par les ondes électriques, alors que la lumière capable d'aller beaucoup plus loin dans l'air était bloquée par ces murs.

Lodge n'évoqua à aucun moment que cette transmission à distance sans fil pourrait peut-être s'appliquer à des signaux télégraphiques, si leur portée était augmentée. Ce n'était pas sa préoccupation, centrée sur la démonstration d'un phénomène électrique très curieux. Mais l'un des spectateurs, Alexander Muirhead, ingénieur des télégraphes, anticipait des applications. Il rencontra Lodge pour l'aider à améliorer techniquement dans ce sens sa conférence qu'il devait présenter à nouveau à Oxford au meeting d'août 1894 de la British Association.

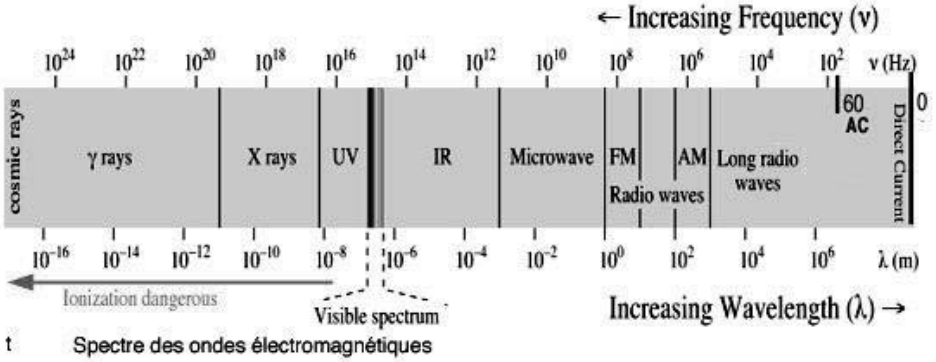
Pour la démonstration de transmission à distance, il s'agissait cette fois d'une véritable transmission télégraphique de points et traits de l'alphabet Morse avec des appareils procurés par Muirhead. L'émetteur commandé par un manipulateur Morse était dans le laboratoire Clarendon et la réception des signaux devant l'assistance regroupée au théâtre du Musée. La distance était de 180 feet, une cinquantaine de mètres. Il est probable qu'il aurait été possible d'aller beaucoup plus loin, mais ce n'était pas l'objectif de cette première expérience.

L'important était de démontrer la possibilité de transmettre des signaux télégraphiques, points et traits, sans fil et à travers des murs.

Le schéma de montage était pratiquement identique à celui de Londres en juin, sauf le galvanomètre à cadre, remplacé soit par un récepteur Morse, soit par un siphon recorder, détecteur très perfectionné conçu par W. Thomson pour recevoir et imprimer les faibles messages télégraphiques transocéaniques. Son intérêt était de visualiser devant l'assistance des lettres reçues en Morse (V-1).

La démonstration de Lodge à Oxford, première transmission télégraphique sans fil, au moyen d'un cohéreur semblable au tube de Branly, était un événement dépassant le petit cercle des physiciens et télégraphistes, pour atteindre le grand public. Il fut amplifié par des articles de *Nature* et de *The Electrician* et peut être considéré comme **la naissance de la TSF.** Ce n'était plus une simple expérience de laboratoire et le monde des télégraphistes réalisa l'importance que pouvait prendre ce nouveau vecteur d'information en le perfectionnant.

Cette année 1894 marqua le départ des recherches et essais pour rendre exploitable cette nouvelle application extraordinaire de l'électricité sous forme d'ondes, se propageant sans aucun fil dans les isolants et l'air. Ce fut alors pendant des décennies une succession de perfectionnement, ponctués de découvertes et inventions, pour arriver à l'exploitation des ondes électromagnétiques à la fin du XIX^{E} siècle, illustrée en (t)



t Spectre des ondes électromagnétiques

***L'antenne** de Popov – 1895-1896*

A. Stepanovitch Popov, professeur à l'Ecole de la Marine de Cronstadt, près de St Petersbourg faisait des travaux sur l'électricité atmosphérique. Il cherchait un moyen pour étudier les décharges de courant qui se manifestaient dans un paratonnerre lorsque se produisait un éclair lointain, pensant qu'elles étaient oscillatoires, comme Lodge l'avait suggéré. Pour les capter il installa un long fil métallique suspendu au sommet d'un mat de 30 m et relié à la terre comme les paratonnerres et cherchait un moyen de mesure à adapter dans ce fil. Prudemment, il n'expérimentait que si l'orage était assez loin, ne voulant pas suivre son ancêtre Richmann, le premier savant foudroyé un siècle auparavant à St Petersbourg pendant la préparation d'une expérience analogue (I-1).

Ayant eu connaissance par *l'Electrician* des expériences de Lodge, il adopta son schéma avec le cohéreur, le relais et le décohéreur, en y ajoutant les éléments figurés en rouge (s). L'enregistreur utilisé par Popov était celui de E. Richard qui notait simplement une impulsion et le cohéreur était relié d'un côté au paratonnerre, de l'autre à la terre pour raison de sécurité. Lorsqu'il recevait une décharge et devenait conducteur, le relais se fermait, l'enregistreur recevait une impulsion, la sonnerie

émettait un son et en retombant, son marteau décohérait le tube redevenant très résistant, jusqu'à la prochaine impulsion.

Notons simplement que cette expérience n'était pas vraiment nouvelle. Un siècle plus tôt, Galvani avait constaté le sursaut, à chaque éclair lointain, de la grenouille attachée comme le cohéreur au fil d'un paratonnerre. C'est normal, l'arc électrique a les mêmes propriétés, qu'il soit produit par une machine électrostatique, la foudre ou une bobine d'induction.

Popov ne pouvait pas enregistrer les courants oscillants comme il le souhaitait, mais avait réalisé un compteur de coups de foudre. Il communiqua ce résultat en mai 1895 à la Société de physique de St Petersbourg qui le publia et le recommanda aux stations météorologiques.

Il ne fallut pas longtemps à Popov et aux lecteurs de son mémoire pour réaliser qu'il avait réalisé un capteur très sensible d'ondes produites à des km par les éclairs de foudre, l'antenne. Il déclarait : *« Je pense qu'après des perfectionnements, mon appareil serait applicable à la transmission de signaux à distance, quand un générateur puissant de ces vibrations sera inventé.* »Il pensait, aussi puissant que la foudre.

Il lui fallait essayer si les ondes de Hertz produites avec un éclateur à partir d'une bobine seraient aussi reçues. Ce fut naturellement le cas avec le transmetteur que Popov construisit avec éclateur et bobine comme ceux de Hertz, puis Lodge et autres. Il fit en mars 1896 une démonstration devant la Société de physique à l'université. À une distance de 250 m, séparé par des bâtiments, fut transmis en Morse par télégraphie le mot Heinrich Hertz, premier message transmis par TSF. Une deuxième transmission de télégraphie sans fil en public fut ainsi réussie. Il est probable qu'il ait équipé aussi le transmetteur d'un fil-antenne mis à la terre comme le récepteur.

La découverte de l'antenne a été essentielle pour le développement de la TSF. Comme toujours, il fallait essayer de comprendre son rôle pour optimiser sa réalisation pratique, dans la station de transmission comme de celle de réception. Après quelques années, on comprit qu'elle était théoriquement le support d'une onde stationnaire à la fréquence de l'onde transmise. Il y avait un maximum de tension et un minimum d'intensité au sommet d'une antenne de transmission, avec l'inverse au sol, renvoyant l'onde réfléchie. Slaby démontra que la longueur d'onde était égale à quatre fois la hauteur de l'antenne.

En France, A. Blondel fut l'un des principaux théoriciens. Max Abraham et H. Poincaré firent la théorie complète de l'antenne en partant des équations de Maxwell et l'enseignaient dès 1908 à l'École supérieure des Postes et Télégraphes.

Sur la liste des expérimentateurs, dont les essais moins connus étaient aussi concluants, figurent Rutherford qui réalisa en 1895 une transmission de un mile au Cavendish Laboratory et Henry Jackson, Capitaine de la Royal Navy, qui s'intéressait plus particulièrement au secret des communications avec des essais entre navires.

Au cours du développement de la TSF, puis de la radiophonie, la théorie et l'expérimentation se succédaient ainsi en alternance, avec les travaux de nombreux participants, essayant des améliorations un peu au hasard, pour voir. Une méthode de recherches parfois productive.

Marconi entre en scène – 1896-1897

C'était un jeune Italien de 22 ans, vivant à Bologne, qui va devenir très rapidement le principal développeur de la télégraphie sans fil pendant les premières années.

Guglielmo Marconi, dont la formation scolaire insuffisante, en partie avec des précepteurs à domicile, ne lui avait pas permis d'entrer à l'Université de Bologne, ni à l'Ecole navale ; il se passionna alors en 1894 pour les travaux de Hertz après avoir lu dans le *Nuovo Cimento* la conférence présentée par le professeur Righi, suivant la publication de celle de Lodge dans *The Electrician.*

Dans la grande villa familiale, il construisit un transmetteur à bobine d'induction avec des éclateurs particuliers étudiés par Righi et un récepteur basé sur le schéma de Lodge avec une variante

du cohéreur. Au cours de l'été 1895 ce montage lui permettait de transmettre des signaux à des dizaines puis centaines de mètres en perfectionnant l'émetteur. Il reliait l'un des cotés du dipôle à la terre, comme on le faisait pour les câbles télégraphiques, l'autre à une plaque surélevée pour adapter sa capacité comme sur le montage de Hertz. Avec diverses petites, mais pertinentes modifications, il aurait obtenu une transmission à deux km, ce qu'aucun document d'époque n'atteste. De plus, il plaçait le récepteur dans une boîte en métal, mise à la terre pour éviter des inductions parasites venant de l'arc du transmetteur. Il eut quelques difficultés avec les douaniers en arrivant à Londres l'année suivante avec cette boîte, qu'il faisait passer pour une *secret box* mystérieuse.

Londres, fin 1895

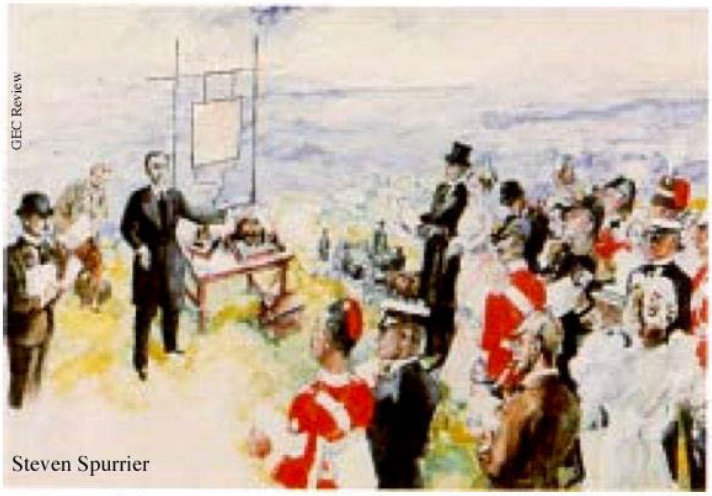
Marconi envisageait le développement de son système et le proposa au gouvernement italien par l'intermédiaire d'un ami de la famille, le Général Ferrero, ambassadeur d'Italie à Londres. Il s'y rendit alors avec sa mère irlandaise, Annie Jameson, fille d'Andrew Jameson, dirigeant de la puissante Irish Wiskey Company. En février 1896 la famille s'installait à Londres chez un cousin, Henry Jameson-Davis. Le gouvernement Italien lui annonça qu'il le laissait libre de prendre un brevet pour exploiter son invention mondialement.

Un ami de la famille, Campbell Swinton, lui fit une lettre de recommandation pour W. Preece, ingénieur en chef des télégraphes anglais, à qui il présenta sa secret box en juin. Celui-ci fut très intéressé par les travaux et résultats acquis en 1895 par ce nouveau venu dans le petit monde des télégraphistes sans fil, wireless. Il va alors le prendre sous son aile pour l'aider à développer l'appareil qu'apporte ce jeune Italien et simultanément apparaître lui-même comme l'acteur important du développement du télégraphe sans fil qu'il pressentait. Il avait aussi l'arrière-pensée de l'utiliser dans les controverses techniques qu'il avait par ailleurs avec les maxwelliens, Lodge, Fitzgerald, surtout Heaviside (5). Le succès de Marconi serait pour Preece un excellent exemple de la supériorité qu'il prônait de la pratique sur la théorie.

On comprend mieux le rapide démarrage que va prendre le développement de la télégraphie sans fil par Marconi, devant qui tous les obstacles et difficultés classiques vont s'effacer. Les relations familiales lui ouvrent les portes des personnes les mieux placées pour l'aider et vont être un élément essentiel pour une réussite dans les affaires et surtout trouver le financement. D'autre part le patronage de Preece lui apportera au début les aides pratiques nécessaires pour les essais et conseils techniques de télégraphistes chevronnés.

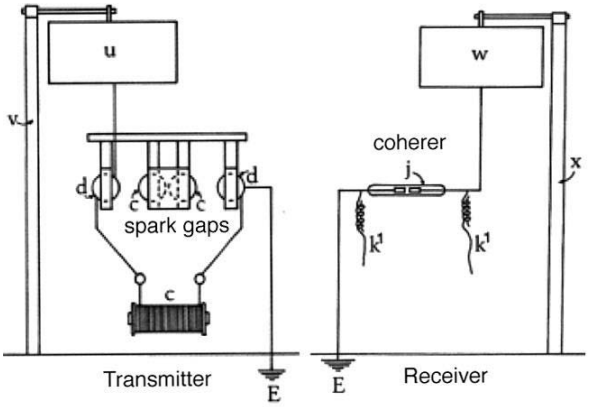
Premiers succès

Preece présente Marconi aussitôt en juillet au General Post Office (GPO) et au War Office pour réaliser une transmission de 300 yards. Il obtient alors les crédits pour faire une première démonstration le 2 septembre à Salisbury Plain devant des représentants qualifiés du GPO, de la Marine et de l'Armée (u). L'observateur de la Marine était le capitaine H. Jackson, lequel avait réalisé quelques mois plus tôt avec succès des communications entre navires avec un matériel semblable.

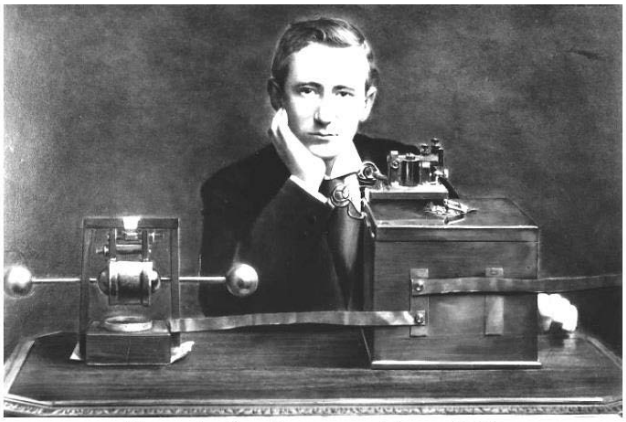


u Expérience de Marconi à Salisbury Plain - 1896

La distance de transmission atteignit un mile. Lorsque le contenu de la secret box fut dévoilé, on constata avec surprise sa simplicité, le matériel des postes transmetteur et récepteur était, à des détails près, semblable à celui des expérimentateurs Lodge, Bose, Rutherford, Jackson, Righi et autres à la même époque.



v Brevet anglais n°12039 de Marconi 2/6/1896



w Marconi présente sa secret-box - 1896

Le brevet anglais 12039, déposé le 2 juin 1896, couvrait plusieurs variantes, dont l'utilisation de réflecteurs avec des miroirs paraboliques pour mieux concentrer les ondes comme la lumière, idée de Hertz, mais abandonnée pour sa complexité.

Dans le montage (v) du transmetteur, l'arc de la bobine est divisé en trois arcs en série, entre 4 sphères, suivant l'idée de Righi, système donnant plus de puissance. L'un des pôles est à la terre, l'autre relié à une plaque un peu surélevée, jouant le rôle théorique de condensateur pour ajuster la longueur d'onde, solution proche de celle appliquée par Hertz. Le récepteur utilise un cohéreur amélioré dont l'un des pôles est à la terre, l'autre relié à une plaque w semblable à l'émetteur. La connexion au circuit d'enregistrement du signal est réalisée avec deux inductances k1 et k2, pour éviter une dérivation de la haute fréquence vers le circuit.

Si l'on oublie celui de Loomis en 1872, ce serait le premier brevet sur la télégraphie sans fil, il sera complété l'année suivante.

Au meeting de la British Association, fin septembre à Liverpool, Preece avait préparé une annonce : Un Italien est arrivé avec une Secret Box permettant un nouveau système de télégraphie sans fil. Il a transmis avec succès un message à la distance de un mile à Salisbury Plain.

Ce n'est que pour accentuer le mystère que Preece avait annoncé que cette boîte était secrète. Elle ne contenait rien de nouveau, son enveloppe en métal n'était qu'un blindage pour éviter des inductions parasites (w) : à gauche le transmetteur, les éclateurs de Righi, à droite la boîte contenant le récepteur, sauf l'enregistreur télégraphique au-dessus. La mise à la terre commune est la barrette visible à l'avant.

Preece avait réussi l'intronisation officielle de Marconi dans le monde des télégraphistes anglais. Il poursuivit en donnant une lecture, accompagné de Marconi, à Toynbee Hall le 12 décembre. La presse convoquée révèle Marconi, *inventor of wireless.* D'où une vive réaction des milieux scientifiques, considérant que Lodge se trouvait ainsi outragé, sans compter une dizaine d'autres chercheurs.

D'ailleurs dans son brevet n°12039, Marconi ne réclamait pas la nouveauté, seulement des perfectionnements, tout en déclarant : « *Je pense que je suis le premier à découvrir et utiliser un procédé pratique pour réaliser une transmission télégraphique et une réception intelligible de signaux produits par des oscillations de Hertz.* » Pour les spectateurs de la démonstration de Lodge à Oxford deux ans auparavant à Oxford, c'était un peu trop.

Net progrès grâce à l'antenne

Le système de Marconi utilisait une plaque un peu surélevée, formant condensateur, en principe, reliée à l'une des bornes de l'éclateur du transmetteur, l'autre étant à la terre. La disposition était identique aux bornes du cohéreur dans le récepteur. Au cours d'essais Marconi s'aperçut, semble-t-il, que la distance de transmission augmentait en plaçant cette plaque plus haut de quelques mètres, reliée à l'appareil par un fil.

Lors d'une deuxième expérience à Salisbury Plain, en mars 1897, on suspendit la plaque de condensateur à un mât haut de 50 pieds (15 m). Un long fil la reliait au transmetteur constituant une

antenne. Le résultat fut étonnant, la distance de transmission avec une longueur d'onde courte de 2 m, atteignit 4 miles. L'intérêt de la plaque s'avérait faible, on la supprima, en conservant seulement le fil.

Marconi aurait ainsi redécouvert l'antenne de Popov. Il semble fort improbable que lui-même ni personne dans son entourage n'ait pas eu connaissance des essais d'antenne réussis par Popov, datant de près d'un an.

Ce progrès majeur sera confirmé par une succession d'expériences utilisant diverses formes d'antennes. En mai 1897, une transmission entre les deux rives du Bristol Channel, soit 9 miles, fut organisée avec une très haute antenne suspendue à un cerf-volant, d'abord de 150 pieds (46 m) sans succès, puis réussie avec une hauteur de 300 pieds.

Le net progrès technique depuis les présentations de Lodge en 1894 était la haute antenne avec mise à la terre.

Preece présente au monde technique la Transmission Sans Fil.

Le succès de Bristol Channel incita Preece à faire une importante lecture à la Royal Institution le 4 juin : *Transmission des signaux à travers l'espace, sans fils conducteurs. – Expériences de MM. W. H. Preece et Marconi* (3).

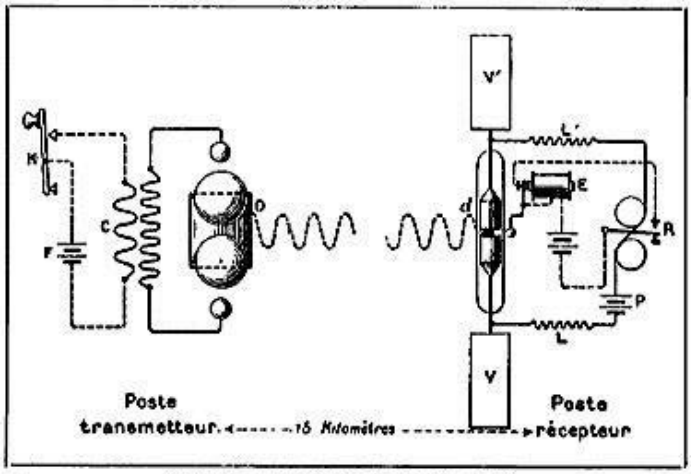
Pour bien comprendre l'objectif de cette opération de communication, citons le préambule qui la précède dans l'une des revues françaises, l'Industrie Électrique : « Depuis quelques mois, la presse anglaise fait de discrètes allusions aux expériences de transmission à travers l'espace faites en Angleterre par un jeune savant italien, M. Marconi, avec le concours de M. W. H. Preece le savant ingénieur en chef du Général Post Office de Londres. …Cette lecture restera comme un des principaux évènements scientifiques de l'année 1897. »

– La première partie est une introduction expliquant la nouveauté des ondes de Maxwell.

– La seconde explique la transmission des "ondes électromagnétiques" par Preece, une propagation à distance par induction expérimentée en 1892 et décrite ci-dessus. Cela permettait à Preece de se placer ainsi en précurseur dans ce nouveau domaine des transmissions à distance, Marconi apparaissant comme un suiveur, bien que ses « ondes » soient totalement différentes.

– La troisième, transmission par ondes électriques, est la plus longue, elle commence par "En juillet 1896, M. Marconi apporta en Angleterre un nouveau système… M. Marconi utilise les ondes électriques ou hertziennes de très grande fréquence qui dépendent des variations du champ électrique à la surface d'une ou plusieurs sphères. Il a inventé un nouveau relais dont la délicatesse et la sensibilité dépassent celles de tous les appareils électriques connus."

Le schéma (x) envoyé à la presse internationale résume le système. Ce n'était pas néanmoins celui de l'expérience du Bristol Channel réalisée avec une « antenne « de 300 pieds qui avait permis un mois plus tôt de transmettre à 9 miles.



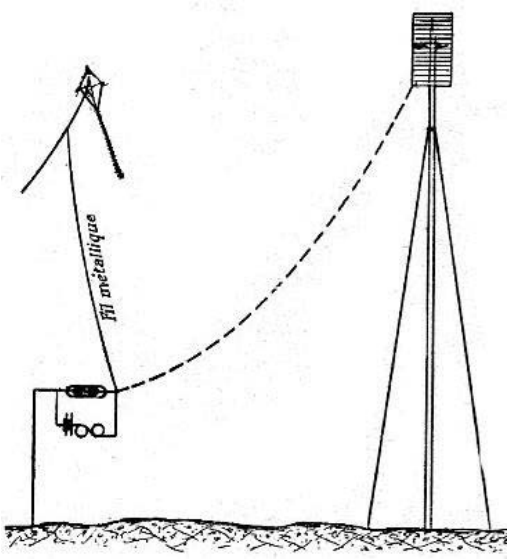
x Principe du système Marconi - 1897

À gauche, le transmetteur avec bobine d'induction et éclateurs du modèle à trois espaces de décharge de Righi. Sa particularité est que l'espace d'arc entre les deux boules centrales de 10 cm de diamètre est rempli d'huile de vaseline, pour éviter la détérioration progressive de la surface des boules – système déjà adopté en 1892 par de La Rive à Genève.

La distance de transmission dépendait : - 1) de la longueur d'arc fonction de la puissance de la bobine, un arc de 15 cm permet de transmettre

jusqu'à 6 km, au-delà il faut aller jusqu'à un arc de 50 cm. – 2) du diamètre des sphères, et double si elles sont pleines plutôt que creuses.

À droite, le récepteur avec cohéreur de Branly modifié et l'enregistreur Morse. Les deux volets métalliques v et v' ont une fonction capacitive pour accorder théoriquement le circuit sur la longueur d'onde de l'émetteur, probablement 1,2 m. Preece indique ensuite qu'on peut les placer en hauteur au sommet d'un mat ou recouvrir d'étain un cerf-volant (y). Dans ce cas, il faut relier l'autre borne du cohéreur à la terre.



y Redécouverte de l'antenne par Preece et Marconi.

Plus tard, on supprimera ces volets en hauteur qui ne servent à rien et le même système sera adopté pour le transmetteur C'était une façon discrète de réinventer progressivement l'antenne de Popov sans jamais le citer, celui-ci ne l'ayant pas breveté.

Il est aussi précisé : « Plusieurs messages peuvent être transmis en même temps dans plusieurs directions à la fois. Il suffit d'accorder les transmetteurs et récepteurs pour la même fréquence. »

La présentation conclue : « Bien des points pratiques sont encore à étudier et perfectionner… Au point de vue des communications avec les navires et les phares, il constitue un progrès scientifique d'une importance considérable. »

Dans cette longue présentation d'une heure probablement, seuls les noms de Hertz et de Branly ont été cités ; celui de Lodge aussi, mais uniquement pour avoir donné le nom de cohéreur au tube de Branly. On peut imaginer la réaction des dizaines de scientifiques.

Preece avait réussi à créer une image d'inventeur exceptionnel du jeune Italien, à le « lancer » tel une vedette pour une carrière technique et industrielle qui se révèlera réussie.

Marconi met en place les bases d'une entreprise ambitieuse

À peine deux ans après son arrivée à Londres avec sa secret box , Marconi a réussi son entrée sur la scène du développement de la TSF, dont il va être le principal acteur, pendant une dizaine d'années.

Bien sûr, il bénéficiait d'appuis très solides et efficaces :

- Le coaching ou mentorat du personnage le plus puissant d'Angleterre dans le domaine de la télégraphie, W.H. Preece, dont les motivations ont été évoquées : prouver qu'un praticien comme lui-même peut mieux réussir qu'un scientifique dans une très nouvelle technique électrique.

- Il bénéficiait pour ses travaux et investissements d'un financement assuré par la riche société familiale Jameson Irish Wiskey Company, souhaitant placer des capitaux dans une affaire industrielle d'avenir.

Il compensait une compétence technique sommaire en constituant progressivement autour de lui un *technical staff* de haut niveau. Assisté sur le plan pratique par un fidèle, George Kemp, et au départ par les techniciens du Post Office. Plus tard Dr. J. Erskine-Murray en 1898, puis Dr. W. H. Eccles en 1900 et sir John Ambrose Fleming, *scientific adviser*. Tout cela ne retire rien aux qualités propres du jeune Italien qui se révélera non un inventeur mais un développeur intelligent et dynamique, doublé d'un manager sachant diriger une équipe, et en plus très doué pour les affaires.

Avec de tels atouts, personne ne pouvait le concurrencer, même avec un niveau scientifique supérieur, ni Lodge occupé par son travail à l'Université de Liverpool, ni le Capt. Jackson au service de la Royal Navy.

Certes, on peut lui reproche de n'avoir rien inventé, mais seulement appliqué les idées d'autres (4). C'est vrai, bien que ses assistants aient trouvé des perfectionnements originaux.

Sans l'efficace impulsion de Marconi jointe à la disponibilité d'importants capitaux, il aurait fallu néanmoins des années de plus pour aboutir à un niveau équivalent de développement de la TSF.

La structure industrielle

Le mois de juillet 1897 fut bien rempli, car le 20 était créée la Wireless Telegraph and signal Co. fortement liée au whisky. En effet Jameson Davis, cousin de Marconi, ingénieur dans le moulinage des céréales, en fut le premier directeur général et sept des huit autres souscripteurs étaient dans cette activité. Marconi était l'un des cinq directeurs. La compagnie lui acheta les droits du brevet pour £15 000 en espèces, plus 60 000 en actions et 40 000 en actions futures suivant le développement. Elle devint en 1900 Marconi's Wireless Telegraph Co. Ltd. Simultanément Marconi ouvrait dès 1897 une wireless Factory à Chelmsford pour fabriquer les appareils transmetteurs et récepteurs pour ses expériences et qu'il commençait à vendre.

La filiale américaine, Marconi's Wireless Telegraph Company, fut créée en 1899. Elle devint en 1919 Radio Corporation of America, RCA, la société la plus puissante d'Amérique dans le domaine radio, puis TV.

Le marché

Dès le départ, Marconi voulait reproduire avec le « sans fil » le processus industriel et commercial du télégraphe, puis celui du téléphone par Bell, semblable aussi à celui de l'éclairage qu'avait essayé de dominer, un temps, Edison : créer des réseaux dont les usagers payaient essentiellement l'utilisation, sans leur vendre en principe les matériels de chaque extrémité, production et utilisation. L'exploitation payante du conducteur de liaison était la base de leur activité. Mais pour la TSF, il n'y avait pas de conducteur, sinon l'éther, avantage financier mais grave inconvénient, car n'importe qui équipé d'un récepteur adapté recevait les messages envoyés par le transmetteur. Cette question du secret impossible des messages freina au début l'intérêt des marines de guerre et armées qui le tournèrent par des procédés de cryptages.

Aussi, Marconi ne s'intéressa pas au départ à la télégraphie terrestre, fonctionnant bien avec ses fils, mais à télégraphie maritime entre les navires ou entre navires et terre, là où il n'y avait pas de fils possibles et un besoin vital de communication. Dans cet objectif, il va y spécialiser, après deux années d'essais, la Marconi International Marine Co. en 1900.

Cela impliquait que les stations d'émissions et réceptions devaient appartenir à sa société, de même le personnel d'exploitation. Exigence commercialement indispensable puisque Marconi ne pouvait pas avoir l'exclusivité de la liaison, l'éther ; condition qui s'avéra, après une dizaine d'années, incompatible avec la sécurité en mer.

Pour endiguer la concurrence et conserver si possible un monopole, l'outil de base était le brevet. Marconi avait fait un premier dépôt en juin 1896, le brevet anglais n° 12039, complété le 2 mars 1897 par les soins du meilleur expert en brevet J. F. Moulton, accordé le 2 juillet 1897. Ce brevet n'est qu'un assemblage classique d'éléments connus, décrit sur le schéma (x) en y rajoutant l'antenne à la terre sur l'émetteur et le récepteur.

Les essais-démonstrations

La stratégie de Marconi pendant plusieurs années était intelligente et fut efficace.

Il fallait simultanément : - 1) explorer en pratique les possibilités maximales du système et les accroître. - 2) identifier les problèmes et butées techniques pour progresser. - 3) essayer de trouver des

solutions, la plupart empruntées aux autres expérimentateurs et scientifiques, qui se multipliaient dans chaque pays. - 4) Construire son image commerciale d'inventeur à destination des ses futurs clients, la navigation maritime en premier lieu, en accentuant leur aspect spectaculaire.

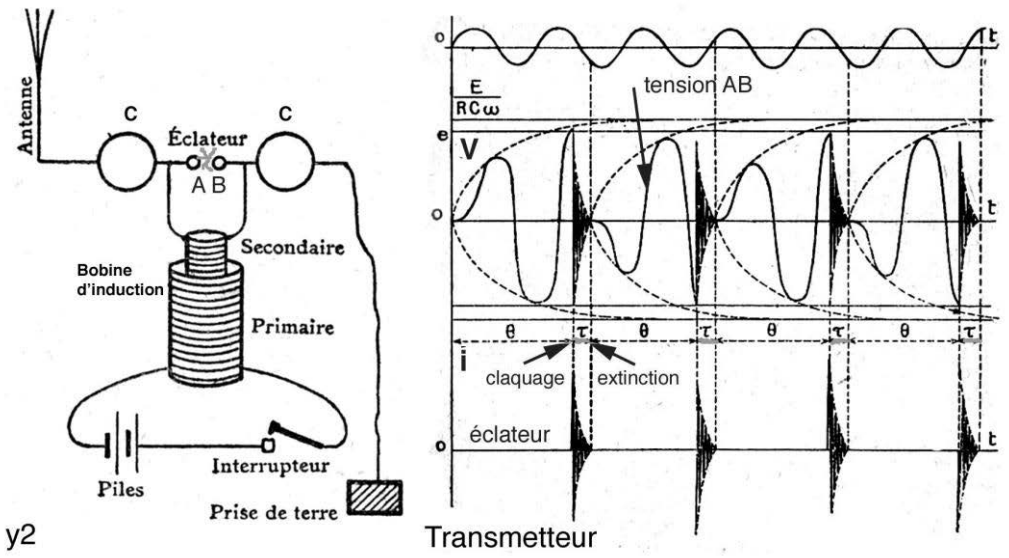
Après trois années d'émergence (1894-1897),la TSF entre dans une phase de perfectionnements et maturation (1897-1917), que l'on peut subdiviser en 5 étapes techniques.

Le développement industriel et commercial s'amorcera vers 1920

1ère étape - Premiers perfectionnements 1897-1902

La TSF pouvait être considéré comme inventée et validée, malgré une forme matérielle étonnamment simple et rustique au départ.

– L'émetteur ou transmetteur est une bobine d'induction connectée directement d'un côté à un long fil d'antenne, de l'autre à la terre ; entre les deux, l'éclateur (y2). Lorsque la tension AB aux bornes de la bobine monte au seuil de claquage, le condensateur C se décharge dans l'éclateur par un courant à haute fréquence.



– Le récepteur, un cohéreur, capte les impulsions recueillies par une antenne semblable, transmettant ces signaux à l'enregistreur télégraphique, par un simple relais. (s, ci-dessus)

Les électriciens, théoriciens comme praticiens de tous pays qui se lançaient dans cette aventure, avaient déjà dû s'adapter, dix ans plutôt, à la compréhension du nouveau courant alternatif à basse fréquence, se substituant en grande partie au continu. À la fin du siècle, il leur fallait à nouveau découvrir puis maîtriser une nouvelle forme d'électricité, les courants à haute fréquence, avec leurs particularités comme l'accord en résonance. Ces courants HF généraient par l'antenne ces ondes, qu'on recueillait par une autre antenne des dizaines de km plus loin, pour les transformer électriquement en signaux télégraphiques courts ou longs de l'alphabet Morse.

En parallèle, ils devaient imaginer le comportement étrange de ces ondes invisibles pour l'homme, pourtant de même nature que la lumière visible.

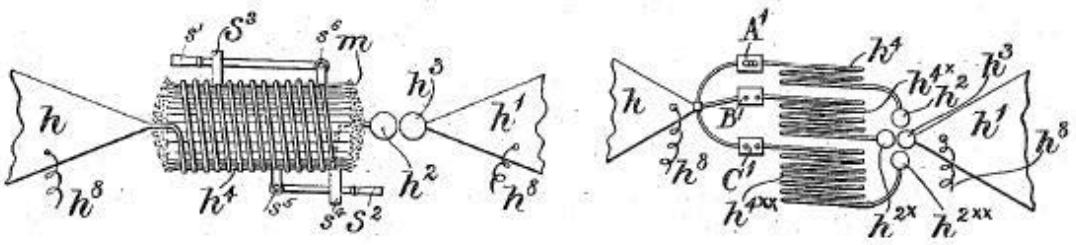
Un certain nombre de problèmes étaient perçus dès le début, d'autres apparurent progressivement. Le plus important au départ était d'accroître la distance de transmission, mais cela dépendait de multiples facteurs, qu'il fallait traiter individuellement. Les années précédant et suivant le changement de siècle furent bien occupées par deux problèmes :

La syntonisation

C'est le réglage que nous effectuons toujours aujourd'hui par un bouton agissant sur une capacité variable pour accorder la fréquence de notre récepteur sur celle de l'émetteur choisi.

Les premiers appareils émettaient et recevaient simultanément dans une trop large gamme de fréquences, approximativement fonction des caractéristiques L et C du circuit. Dès que le nombre d'émetteurs s'accroîtrait, il était évident que chacun devait émettre sur une fréquence différente des autres ; le récepteur, lui, devrait pouvoir s'accorder sur la fréquence d'un seul émetteur.

Lodge qui avait reproduit les expériences de Hertz savait déjà que la fréquence propre des circuits émetteurs et récepteurs devait être proche pour amplifier le signal par résonance. Hertz l'ajustait en modifiant la capacité. Lodge préféra la solution plus pratique d'insérer dans le circuit d'antenne une inductance de valeur variable, suivant la longueur d'onde souhaitée. Ce fut un net progrès.



It shows a method of tuning an antenna ("h"-"h1") by adding inductance in series with the antenna. To the left is a continuously variable inductance, while at the right there are different present inductances h4, h4x or h4xx.

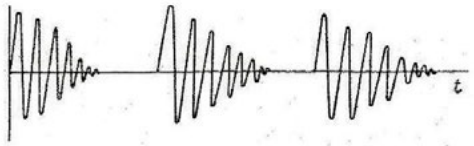
z Brevet Lodge de syntonisation

Une autre amélioration sur le récepteur fut de séparer en deux le circuit unique du cohéreur, en les couplant par induction. Le circuit ouvert de l'antenne comprenait le primaire d'un transformateur dont le secondaire constituait un second circuit comprenant le cohéreur. Mais il n'eut pas l'idée d'accorder ces deux circuits. Associé avec Muirhead, il déposa le brevet anglais n°11575 le 10/5/1897 (z). Tout le monde, en particulier Marconi, utilisa le procédé. Lodge avait d'autres activités que de s'occuper de procès et ce fut Muirhead qui finalement vendit en 1911 ce brevet à la Compagnie Marconi pour une forte somme et Lodge y devint conseiller scientifique pour 7 sept ans.

Couplage des circuits et mise en résonance

Lodge avait déjà remarqué, lors de sa présentation de 1894, l'impossibilité d'obtenir dans le même circuit d'émission une forte énergie de l'oscillation et simultanément un rayonnement persistant de l'antenne. En effet l'éclateur de la bobine d'induction régulait à grande cadence la charge de la capacité, laquelle générait à sa décharge le courant oscillant directement dans l'antenne avec des pertes sensibles. Celle-ci rayonnait alors des trains d'ondes trop rapidement amortis, ne permettant pas des transmissions à grande distance. (za)

Marconi essaya d'augmenter la puissance des décharges de la bobine d'induction sans grand succès. Il ne dépassait guère 15 km.



za oscillations amorties

La solution fut trouvée en 1898 par le physicien allemand Ferdinand Braun de l'université de Strasbourg, pour résoudre un problème semblable. (5)

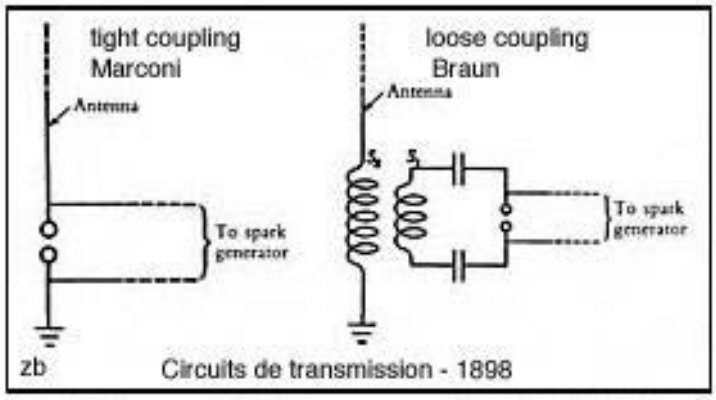
Les ingénieurs de l'AEG à Berlin cherchaient un système capable de concurrencer le système Marconi et tentaient de transmettre des signaux électriques à fréquences acoustiques par l'eau, détectables par un écouteur de téléphone, mais sans grand résultat. Trois bricoleurs de Strasbourg pensent avoir trouvé un meilleur système que les berlinois et s'adressent à Braun pour le

perfectionner. Celui-ci n'arrive pas à améliorer sensiblement ce procédé d'hydro-télégraphie, qui sera abandonné comme les tentatives précédentes de Preece et autres.

Mais intéressé par ce sujet, les recherches de Braun le conduisirent à appliquer à la TSF une amélioration importante qu'il avait conçu pour le procédé aquatique.

Il remplaça le couplage direct, *tight coupling*, du circuit oscillant sur l'antenne, pratiqué jusque-là, par celui de deux circuits, *loose coupling*, couplés par induction, sorte de transformateur sans fer, eux-mêmes mis en résonance. (zb) Un premier test du 20/9/98 fut positif, l'amortissement plus réduit des trains d'ondes permettait de transmettre bien plus loin à 35 km et la puissance était concentrée sur une gamme de fréquences plus réduite, augmentant ainsi la sélectivité. Cela résolvait le grand problème qu'avait bien identifié Lodge.

Il déposait un brevet allemand en 1898 : « *... en résumé, je revendique comme mon invention, un système télégraphique par étincelles dans lequel, au lieu des vibrations de Hertz, on emploie des vibrations plus lentes qui se produisent, notamment en présence de bobines d'induction, à la décharge de bouteilles de Leyde ...* »



Cette invention importante résultait, comme cela se produisait parfois en histoire des sciences, de l'invention par Braun en 1897 d'un nouvel appareil, le tube de Braun, pour nous l'oscilloscope ou tube cathodique (ch. X-2). Il lui permit de visualiser les oscillations électriques à très haute fréquence.

On découvrit que ce schéma de deux circuits couplés et accordés à haute fréquence avait au moins une antériorité inconnue, un brevet US de Tesla de 1891, mais qui n'était pas appliqué à l'émission d'ondes électromagnétiques, mais la production de courants à haute tension et à haute fréquence pour un procédé d'éclairage et plus tard la transmission d'énergie. C'était le transformateur résonant de Tesla, décrit en fin de chapitre IX-3.

Une autre antériorité était celle du résonateur du docteur Oudin, identique à celui de Tesla si ce n'est qu'il utilisait un autotransformateur et son application était l'usage thérapeutique de courants à haute fréquence. Tesla, ni Oudin n'avaient encore songé à appliquer ce procédé à la TSF.

Braun appliqua aussi pour le récepteur le principe identique de séparation en deux circuits de Lodge, mais il oublia dans son brevet de préciser qu'ils étaient accordés en résonance. Le cohéreur n'était plus directement dans le circuit d'antenne, mais couplé à l'antenne par un transformateur.

Ces deux importants progrès, la syntonisation de Lodge et les deux circuits couplés de Braun se retrouveront pendant une dizaine d'années dans tous les montages, à quelques variantes près. (zc) En particulier dans ceux de Marconi.

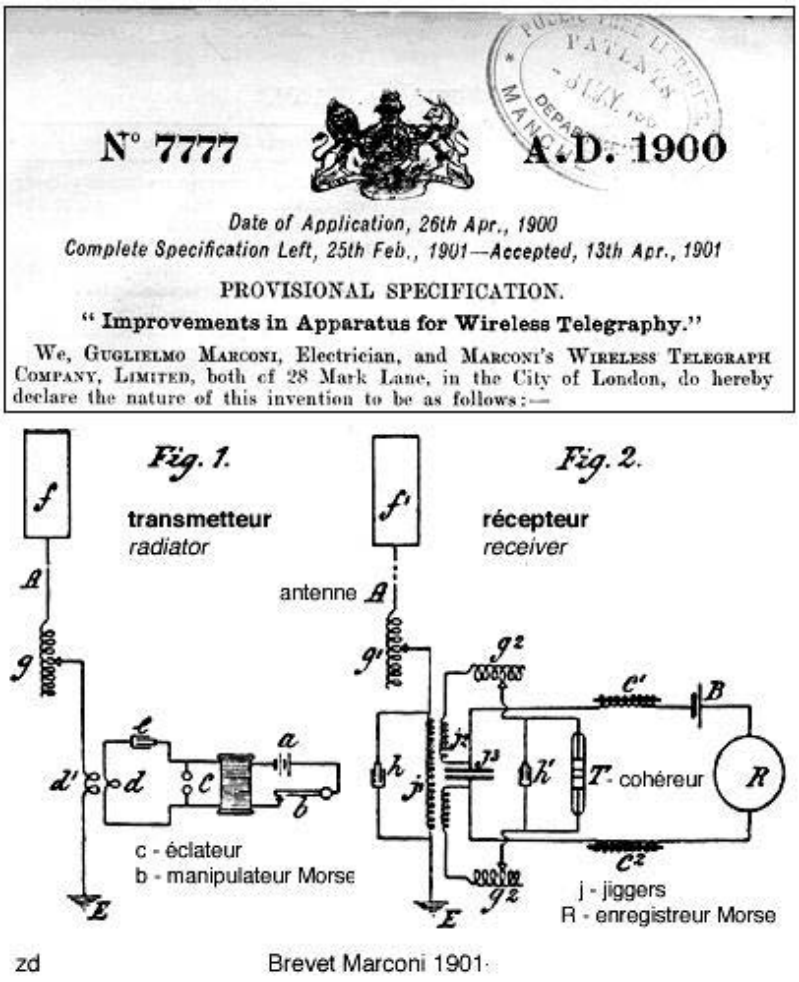
Le brevet 7777, « four - seven's » de Marconi

À partir de 1897, Marconi s'engageait dans son grand projet. Il cherchait les perfectionnements indispensables et les vérifiait par des essais réels, car la technique de la TSF ne pouvait être mise au point dans des laboratoires, mais dans la nature. En 1900, estimant qu'il était sur la bonne voie, il dépose un brevet anglais sous le n° 7777, accordé en 1901, qui sera souvent évoqué devant les tribunaux. Le récepteur utilisait aussi le principe des deux circuits accordés mais avec une variante qui l'a fait dénommé jiggers par Marconi. Elle résultait des travaux croisés de Lodge et de Braun. (zd)

Le système global transmetteur-récepteur était parfois désigné comme regroupant quatre circuits accordés, puisque la syntonisation voulait que les deux circuits accordés du transmetteur le soient aussi, par principe, avec ceux du récepteur.

Le quatre-fois-sept était censé figer à cette date l'état de la technique de la TSF, cumul des propres réflexions de l'équipe Marconi - Fleming et des travaux de Lodge, Braun, Slaby, Stone, Bose, Rutherford et autres. Ceux-ci, on s'en doute, acceptait fort mal cette exploitation de leurs recherches, se traduisant par la monopolisation de l'éther, propagateur d'ondes, bien commun de l'humanité.

Il restera le brevet de base du système Marconi, que compléteront quelques brevets de détails. Cependant tous les constructeurs, dans différents pays, commençaient à proposer des matériels de télégraphie sans fil, considérant que la technique nécessaire à cette activité était dans le domaine public, résultant des recherches de multiples personnes.


N° 7777 A.D. 1900

Date of Application, 26th Apr., 1900
Complete Specification Left, 25th Feb., 1901—Accepted, 13th Apr., 1901

PROVISIONAL SPECIFICATION.

" Improvements in Apparatus for Wireless Telegraphy."

We, Guglielmo Marconi, Electrician, and Marconi's Wireless Telegraph Company, Limited, both of 28 Mark Lane, in the City of London, do hereby declare the nature of this invention to be as follows:—

zd Brevet Marconi 1901

S'ils devenaient trop gênants pour la Marconi Wireless, elle déclenchait contre eux une procédure de contrefaçon. Ce fut de 1900 à 1943 de longues batailles juridiques autour du 7777. En Angleterre, la *British Telegraph and Telephone* Co perdit le procès que lui intentait Marconi pour contrefaçon ; pourtant elle contestait le brevet Marconi qui utilisait le brevet Braun de 1899, lui-même très proche du transformateur résonant breveté par Tesla en 1891. La Cour suprême anglaise confirma la validité du brevet Marconi, plusieurs parlementaires ayant des intérêts dans la société.

À l'inverse, le brevet Marconi fut invalidé plus tard par deux fois : en France, en 1914, après une longue procédure – ensuite, très tardivement en 1943 aux Etats-Unis, mais pour d'étranges raisons, apparemment financières. (6)

Propagation des ondes

C'était la grande inconnue. Comme la lumière, elles devaient se propager en ligne droite, mais avec l'avantage de traverser des murs. Arriveraient-elles à traverser sur terre des collines et l'eau de la mer pour atteindre des points au-delà de l'horizon visible, à une cinquantaine de km ou plus, imposant à l'onde de traverser une épaisseur d'eau correspondant à la rotondité de la terre ?

Les ondes dirigées

Déjà Hertz avait essayé de concentrer des ondes comme la lumière, avec un miroir parabolique. Plusieurs chercheurs l'ont suivi dans cette voie et effectué des essais avec différentes formes d'antenne, mais sans améliorer notablement la distance de transmission. Ils ont cependant remarqué qu'à la réception les antennes cadres étaient moins encombrantes et permettaient aussi de repérer la direction d'où venait un signal. C'était le début de la radiogoniométrie, très utile aux navires pour se situer au large des côtes, ou repérer un émetteur clandestin pendant la guerre. (zd2)

zd2

Expériences et perfectionnements

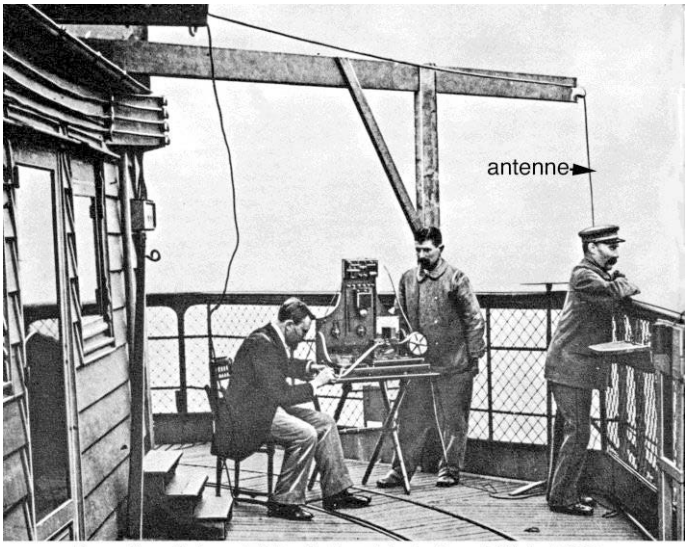
Ils vont se succéder principalement dans cinq pays, Angleterre, Russie, France, Allemagne, Etats-Unis, par des inventeurs de plus en plus nombreux, avec des matériels progressivement améliorés.

Relatons les plus significatifs par année :

1898

- Lors des régates de Kingstown à Dublin, puis à Cowes, Marconi réalise pour les journaux les premiers reportages, en temps réel, par TSF, sur une distance de 32 km entre un navire en mer et la côte.

- En France, parmi les pionniers, figurait Eugène Ducretet, fabricant d'appareils en association avec Popov. Il réalise avec E. Roger une liaison TSF sur 4 km entre le Panthéon et la tour Eiffel (ze) (zf). Ce petit événement sur le plan technique inaugurait le rôle important que tiendra pendant des années la Tour Eiffel comme support privilégié d'antenne d'émission. Moins pour la réception, car sa masse d'acier était absorbante pour les ondes (7).



ze Première liaison TSF du haut de la tour Eiffel -1898

L'armée missionna le jeune capitaine Gustave Ferrié, polytechnicien, au comité franco-britannique pour le développement de la TSF. À ce titre il participa à la préparation de la liaison à travers le Channel.

Pour la Marine, ce fut le lieutenant Camille Tissot qui établit la première station de TSF française entre le phare de Trezien et Ouessant.

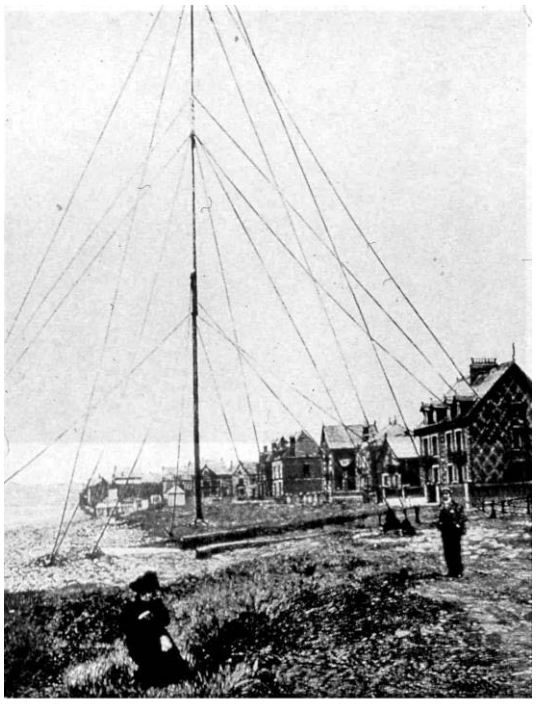
Sur le plan théorique, le professeur André Blondel et Henri Abraham furent les inspirateurs de plusieurs avancées.

- En Allemagne, Braun fait les premiers essais de son nouveau couplage sur la liaison de 42 km avec Mutzing.

zf Récepteur TSF Ducretet - expérience Tour Eiffel 11/1898

Auguste Slaby établit la liaison Berlin- Jüterborg distant de 60 km, avec une antenne inductive et détermine que la hauteur de l'antenne doit mesurer le quart de la longueur d'onde

zg Essais du système Braun à Cuxhaven



zh Antenne de Vimereux

1899

– Braun établit en Mer du Nord une liaison de 62 km avec Cuxhaven, qui deviendra régulière l'année suivante avec l'île Héligoland (zg).

– Marconi réalise la liaison France-Angleterre entre Douvres (South Foreland), et Vimereux (Pas de Calais), soit 46 km. Les antennes, d'abord hautes de 45 m, sont ensuite réduites à la limite inférieure de la réception, soit 37 m. Le nouveau récepteur était équipé du petit transformateur d'accord dénommé jigger (zh).

Après des essais de communication dans un seul sens, puis dans l'autre depuis chacune des stations, les échanges sont obtenus entre la station de Vimereux et deux navires de guerre français équipés d'antennes, l'un de 22 m, l'autre de 31 m. Au cours de leur déplacement le long de la côte, la portée maximale sans obstacles fut de 50 km, réduite à 20 ou 25 km avec l'obstacle du Cap Gris-Nez. Les ondes arrivaient donc à contourner les obstacles par diffraction, mais affaiblies.

Ce fut une réussite, sauf les essais de syntonisation, très incertains.

– Marconi propose alors à Ferrié d'équiper l'armée française, mais à un prix exorbitant et l'obligation que seul un opérateur de la Cie Marconi était habilité à s'en servir. Ferrié consacra alors le reste de sa carrière à développer la TSF pour l'armée française.

– Marconi renouvelle un reportage en direct à l'occasion de l'America Cup à New York. Les Américains sont impressionnés.

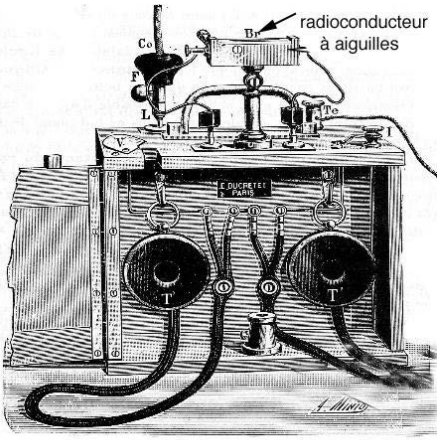
– En Russie, des croiseurs de la flotte firent des échanges à 25 km avec des matériels Ducretet-Popov.

– Tissot communique avec des navires à 42 km de Brest, au cours d'une campagne d'essais d'un début d'équipement de la Marine Nationale avec les appareils Popov-Ducretet.

– Au cours de manœuvres de la Royal Navy, Capt Jackson nota que la communication entre le HMS Juno et l'Europa était bonne entre les navires éloignés de 60 miles (96 km), alors que la distance entre le sommet de l'antenne et l'horizon était de 31 miles. Ce qui signifiait que les ondes auraient traversé une masse d'eau de 30 miles d'épaisseur et 500 feet de hauteur, si elles s'étaient propagées en ligne droite.

Donc les ondes semblaient se propager en suivant la courbure de la terre. Par réfraction ?

1900



zj Récepteur Popov-Ducretet à écouteurs- 1900

– Le récepteur Popov-Ducretet équipé d'un nouveau radio-conducteur avec 6 aiguilles en acier permettait de recevoir à 50 km. Le signal était reçu au son direct avec des écouteurs, sans relais ni enregistreur télégraphique (zj). Trop délicat, ce détecteur ne fut pas généralisé.

– Premier sauvetage grâce à la TSF de Popov- Bréguet des 27 pécheurs russes en perdition dans le golfe de Finlande. Ducretet reçoit une décoration de l'Empereur de Russie.

– Marconi réalise un second essai sur 54 km entre Salisbury Plain et Bath.

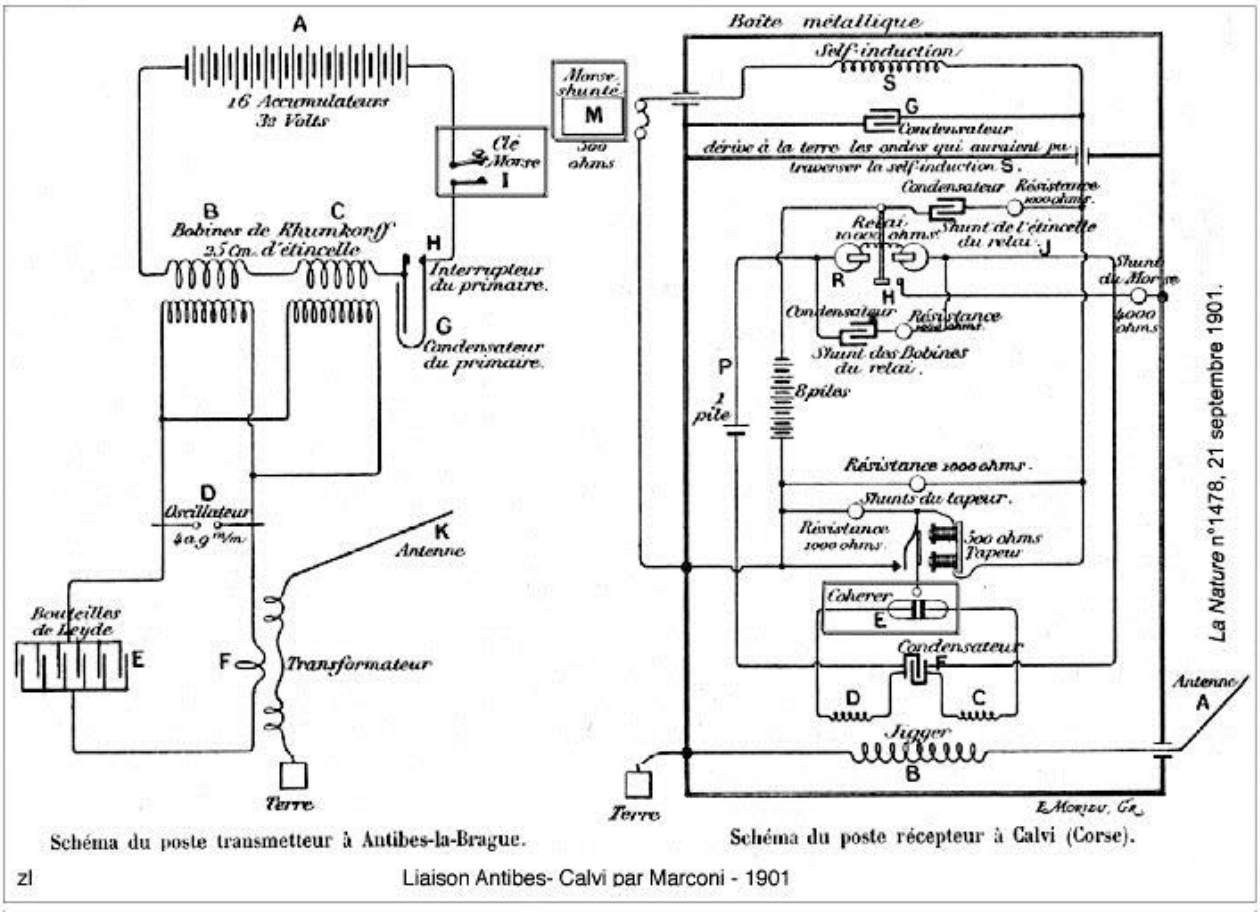
– Un nouveau dans le monde des « sans-filistes », Reginald Fessenden, canadien de Pittsbourg, arrive à transmettre assez mal la voix humaine, une petite phrase mais audible à un mile seulement, en modulant le signal d'émission à haute fréquence par un micro.(8) C'est le précurseur de ce qu'on dénommera la radio-téléphonie, puis radiophonie six ans plus tard, lorsqu'il aura changé les principes de l'émetteur et du récepteur.

Ce petit événement aux conséquences extraordinaires ne fut connu qu'en 1906.

1901

- Marconi va tester son troisième système, celui décrit dans son brevet 7777, tout en préparant une tentative de liaison transatlantique.

- Expériences entre la Corse et le continent

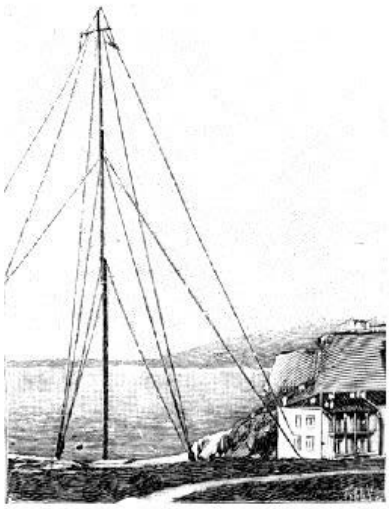


zl Liaison Antibes- Calvi par Marconi - 1901

Une distance de 175 km séparait les stations de Biot, à côté d'Antibes et Calvi en Corse. Le navire Princesse Alice du prince de Monaco y participait en mer.

Les antennes étaient constituées de quatre conducteurs en parallèle accrochés à un mat de 55m de haut. L'énergie de petits accumulateurs alimentait deux bobines d'induction en parallèle donnant un arc de 25 cm (zl1). Le schéma resta classique quelques années pour tous les expérimentateurs, avec quelques variantes. On remarque que le circuit de l'antenne d'émission, comme celle de réception était couplée magnétiquement au circuit actif par une sorte de transformateur sans fer à haute fréquence que l'on appellera souvent un tesla à l'émission, et chez Marconi un jigger à la réception.

Plusieurs séries d'essais étaient prévus. Communication simple entre les deux stations et le navire avec trois longueurs d'ondes, 300 m, 200 m et 70 m. La plus longue correspondant à la longueur d'onde propre de l'antenne donna les meilleurs résultats. Les réglages sont restés stables pendant trois heures permettant une vitesse de transmission de messages jusqu'à 14 mots par minute.(zl2)


zl2 Antenne de réception à Calvi - 1901

Par contre les expériences de double communication simultanée avec deux longueurs d'onde différentes étaient brouillées.

Un autre récepteur installé à 50 km de Biot recevait sans accord particulier tous les messages émis par Biot.

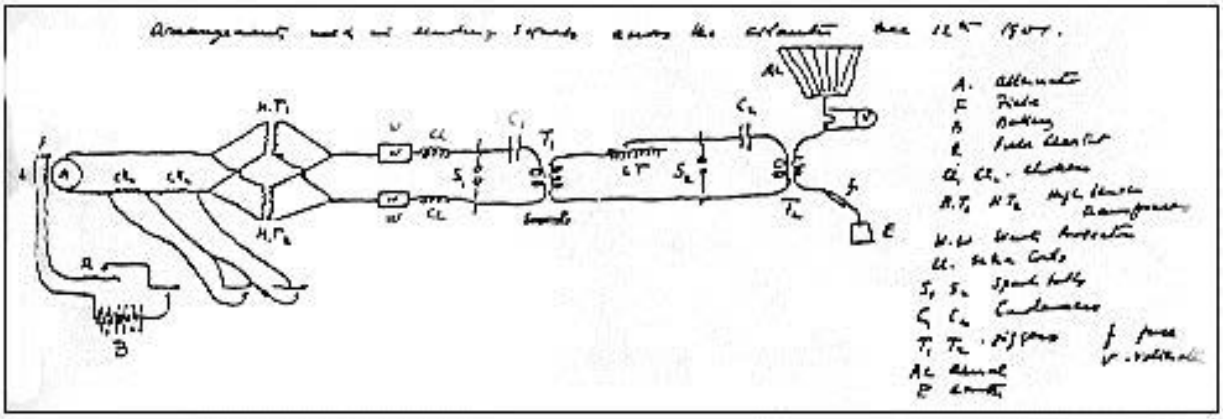
Trois navires français équipés de récepteurs recevaient toutes les communications. Marconi était très loin du secret des communications qu'il espérait et que la Royal Navy demandait. Il obtint cependant un gros contrat d'équipement des navires anglais, comme précédemment avec les Italiens.

Si ce n'était le quasi-échec de la syntonisation, les résultats étaient bons.

Première liaison transatlantique (9**)**

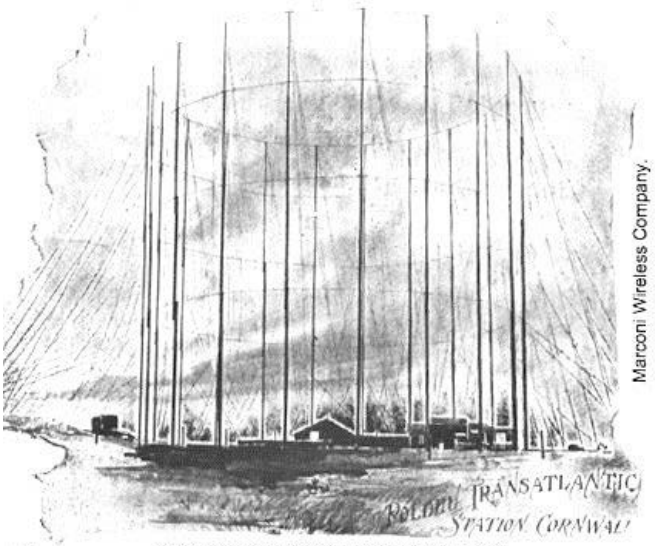
Les différents essais avaient démontré que les ondes de grande longueur se transmettaient à de grandes distances sur la mer, bien au-delà de l'horizon, alors qu'elles se propageaient normalement en ligne droite, comme la lumière.

Il était donc dans le tempérament de Marconi, celui d'un joueur de poker très réfléchi, de tester si elles pouvaient traverser l'Atlantique, malgré la rotondité de la terre, qui équivalait à passer au-dessus d'une montagne d'eau de 300 km de haut. Il y avait là un mystère qu'il fallait élucider. Si cela marchait ce serait une découverte aux grandioses conséquences.


zm schéma par Fleming du transmetteur de Poldhu

La station d'émission fut installée à Poldhu en Cornouailles, celle de réception à 3400 km sur le promontoire de Signal Hill à Terre-Neuve. Fleming assura la conception du transmetteur de Poldhu avec deux étages de circuits générateurs et un très gros condensateur (zm). L'alimentation était fournie par un alternateur de 20 kW sous 2000 V, portée à 20 kV dans le circuit oscillant.

L'antenne était en forme de cône inversé suspendu par un cercle de 20 mats de 60 m (zn). Détruite par une tempête, elle fut remplacée par un réseau de 54 conducteurs en éventail portés par 2 mats de 46 m.



zn Antenne conique inversée de Poldhu - 1901

À Signal Hill, pour l'antenne de réception ont été apporté plusieurs enveloppes de ballons avec leurs bouteilles d'hydrogène ainsi que des cerfs-volants avec 150 m de fil. Au cours des préparatifs un ballon fut arraché par le vent, puis un cerf-volant.

Le 12 décembre, ce fut un cerf-volant qui tirait le conducteur d'antenne. Deux récepteurs avaient été apportés, l'un du modèle le plus récent permettait la réception du signal sur un enregistreur Morse, mais pour des raisons indéterminées il ne fut pas utilisé. C'est un modèle avec un cohéreur plus ancien qui le remplaça, mais ne permettait que de recevoir un son avec un écouteur téléphonique.

La station de Poldhu émettait pendant trois heures chaque jour la lettre S traduite par trois points de Morse, sur une fréquence probablement de 850 kHz. Ce 12 décembre 1901 à 12h30 puis 1h10 et 2h20, Marconi nota dans son carnet la réception du signal, entendu enfin par lui et son assistant Kemp. Il fait aussitôt télégraphier par câble le succès. L'événement de grande importance fit le tour du monde, transmis encore pour quelques années par les câbles télégraphiques sous-marins. Il provoqua indirectement un petit événement logique, une chute des actions des compagnies de câbles.

Néanmoins, beaucoup doutaient et soulignaient que ces petits points de la lettre S sans inscription sur une bande télégraphique, seuls Marconi et son assistant les avaient entendus. Pour dissiper ces doutes, au début de l'année suivante, un navire américain, le SS Philadelphia fut équipé, pour une traversée d'Angleterre à New York, de trois mats de 45 m portant des antennes. À bord un récepteur Marconi devait capter 3 fois par jour messages et signaux parvenant de Poldhu. Les messages furent enregistrés jusqu'à 1550 miles, les simples signaux perçus jusqu'à 2100 miles.

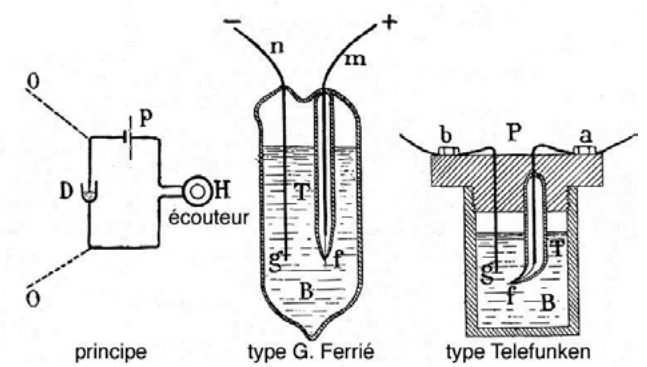
Il était bien démontré que les ondes pouvaient tourner autour de la terre et transmettre des messages à des milliers de km, bien que se propageant en ligne droite. Heaviside proposa une explication, elles se réfléchissent sur des couches conductrices de la haute atmosphère, l'ionosphère. (10). Un autre phénomène intéressant fut constaté, la réception avec les grandes longueurs d'ondes était meilleure la nuit que le jour.

Il faudra cependant 6 ans pour établir un système de communication fiable entre Clifden en Irlande et Glace Bay au Canada.

2ème étape - Nouveaux détecteurs 1900-1904

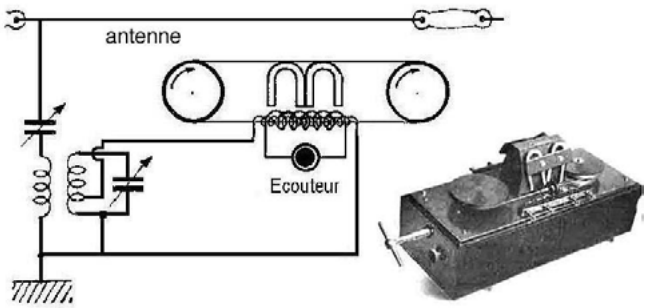
La première étape avait été la recherche du meilleur schéma pour l'amplification et la syntonisation, pour le transmetteur comme le récepteur. Ce fut l'échec presque complet pour la syntonisation.

Les chercheurs souhaitaient alors remplacer le détecteur d'ondes, constituant de base du récepteur, le cohéreur de Branly, qui avait déjà succédé à l'ancêtre, l'éclateur de Hertz. Il restait peu pratique, même un peu amélioré par chacun de ses utilisateurs.



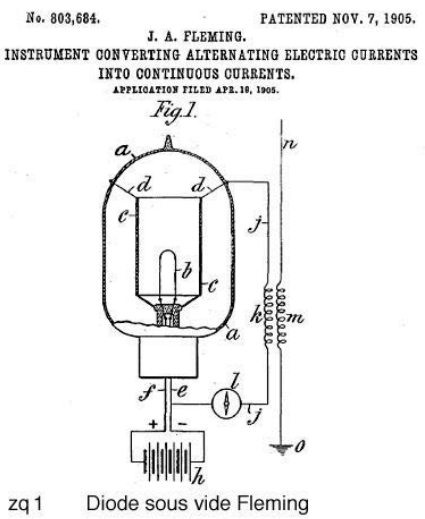
zo Détecteur électrolytique

– Au Congrès international des électriciens de 1900, Ferrié présenta un nouveau **détecteur électrolytique**. Basé sur la polarisation d'une très fine anode de platine dans une cuve d'acide, ce système simple et sensible se comporte comme une valve redresseuse ne laissant passer qu'une alternance. (zo) Le signal est alors capté, au son, dans des écouteurs téléphoniques montés sur une sorte de casque auditif. Il sera longtemps utilisé à partir de 1903 en raison de sa précision et sa sensibilité il ne sera remplacé qu'après 1907 par l'audion.



zp Détecteur magnétique Marconi - 1902

– Un autre système, le **détecteur magnétique,** un plus complexe mais d'efficacité comparable fut développé après 1902 par l'équipe de Marconi. Il exploitait les travaux de Rutherford en 1895 sur la modification des caractéristiques magnétiques de l'acier sous l'effet des champs à haute fréquence. Le phénomène ne fut compris qu'en 1931. Un fil d'acier tourne en permanence avec un mécanisme d'horlogerie. (zp)



zq 1 Diode sous vide Fleming

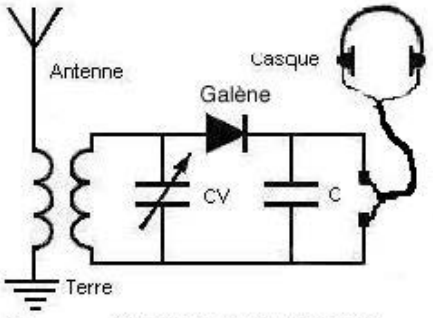
Il passe dans un tube en verre sur lequel il y a 2 enroulements concentriques, l'un gros fil en série avec le fil d'antenne, l'autre fil fin en série avec des écouteurs. Les deux aimants magnétisent le fil dans un certain état ; si une faible impulsion de courant, point ou trait, à haute fréquence traverse l'enroulement gros fil, il modifie l'état magnétique du fil, variation brusque que l'enroulement fin traduit par un top long ou court dans l'écouteur. Malgré son inconvénient d'avoir un mécanisme d'horlogerie à remonter périodiquement, ce fut l'appareil normal des récepteurs Marconi

– Fleming, le cerveau scientifique de l'équipe Marconi, cherchait un procédé plus simple. Se souvenant de l'effet Edison qu'il avait vu, des années auparavant, auquel Edison, ni personne, n'avait trouvé une explication ni une application de cette curiosité, il invente en 1904 la valve oscillation, dénommée ensuite **diode** (V-4) (zq1), dont l'effet redresseur en fait un bon détecteur d'ondes. Il transforme ainsi les oscillations à haute fréquence en un courant continu ondulé à plus basse fréquence (zq2).

Pour nous, c'est une invention capitale, la première lampe à vide, début d'une longue lignée. Son apparition sera en réalité peu remarquée, seulement utilisée pour quelques récepteurs, mais coûteuse à fabriquer, d'une durée de vie réduite et nécessitant une batterie pour chauffer le filament, Marconi lui préféra le détecteur magnétique.

– Le détecteur à cristaux qui remplacera tous les précédents à partir de 1906 était basé sur l'effet redresseur comme la diode précédente, obtenu par un contact entre une fine tige métallique et la surface d'un cristal. (zr) Une dizaine de sortes de cristaux furent essayés, le plus classique était un sulfure de plomb, **la galène.**

Ce phénomène avait été étudié en 1874 par Braun à ses débuts.

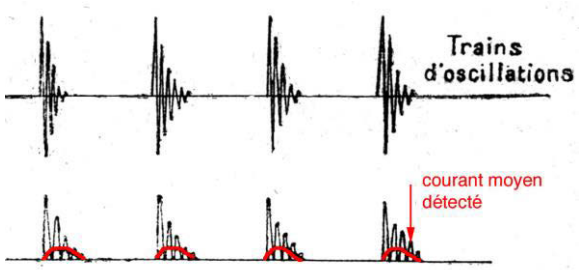


zs Schéma récepteur à galène

Il remarqua d'abord que ce sulfure de plomb ne suivait pas la loi d'ohm, sa résistance diminuait quand on augmentait la température.

Elle variait aussi beaucoup suivant la façon dont les contacts d'amenée du courant avec le cristal étaient réalisés. Il remarqua que le cristal devait être fortement serré avec un fil rigide d'amenée, l'autre contact étant établi par la pointe d'un fil, enroulé comme un ressort, d'où son surnom, moustaches de chat. Braun découvrit que la résistance dépend du sens du courant, et que cette conductivité unilatérale se manifeste au point de contact avec la pointe du fil ressort. Il avait réalisé un redresseur, ce qui n'avait aucun intérêt à l'époque du courant continu et découvert un semi-conducteur, ce qu'il ne pouvait pas comprendre. Sa publication de 1874 dans les Annalen der Physik und Chemie restera ignorée, de même que la suivante de 1877.

Ce n'est qu'en 1901, alors qu'il cherchait un nouveau détecteur, autre que le cohéreur, qu'il reprit ses expériences passées et constata que ce système pouvait transformer les oscillations à haute fréquence en courant continu ondulé, audible dans un écouteur téléphonique. Un brevet est pris en 1899. En 1903 l'américain Dunwoody brevette un détecteur à carborundum et W.Pickard un détecteur au silicium (15). Dès 1894, le professeur indien de Calcutta, Chandra Bose, avait pris aussi un brevet US, accordé en 1904, d'un détecteur à galène. Le détecteur à cristal a donc de nombreux pères.



zq2 courant redressé du détecteur

La galène avait beaucoup d'avantages :

– simple, économique et facile à construire ;

– permettant la détection au son et non plus l'inscription télégraphique :

– son principe inconnu qui incitait tous les bricoleurs à essayer de le perfectionner, d'ou des dizaines de brevets ;

– lorsque apparut la phonie, il avait une bonne musicalité ;

– son seul inconvénient était la difficulté de trouver la meilleure réception en déplaçant à peine le contact de la pointe avec le cristal ;

– il permit une large vulgarisation de la TSF pour les amateurs ; (zs) (zt)

zr Détecteur à galène

Son inconvénient de ne pouvoir alimenter que des écouteurs-casque à forte impédance, pas les haut-parleurs, était compensée par une autonomie complète, ni alimentation secteur, ni pile, d'où son rôle important dans les guerres du XX^{e} siècle.

La galène fit ainsi une longue carrière, depuis la TSF des années 1906 à la radiophonie débutante, poursuivie des années 1914 à 1950, en parallèle avec la triode, le septième et dernier détecteur d'ondes… avant le semi-conducteur actuel.

zt Récepteur à galène

1902

– La station Ouessant TSF établie par le lieutenant Camille Tissot communique quotidiennement jusqu'à 80 km, avec 14 navires équipés.

– L'éruption de la montagne Pelée en Guadeloupe détruit le câble télégraphique. Le service de Télégraphie Militaire de Ferrié le remplace par une liaison de 180 km pendant deux ans.

1903

– Sous la pression de l'Empereur, l'Allemagne veut s'opposer au monopole de Marconi en suscitant la création de Telefunken société regroupant les deux équipes de TSF concurrentes, Slaby et Arco pour AEG, Braun pour Siemens. Une importante station est établie près de Berlin, à Nauen. Elle sera trois ans plus tard la plus puissante du monde.

– Marconi établit un service quotidien entre Cap Cod et Pouldhu, soit 3840 km. Échange de messages entre le président Roosevelt et le roi Edouard VII.

– Première réunion internationale à Berlin pour définir des normes internationales d'utilisation de la TSF. Pas d'accord avec l'Angleterre ni l'Italie.

– Le Marconi System est adopté par les marines commerciales et de guerre d'Angleterre et Italie avec l'installation de 10 stations côtières anglaises. Marconi vend le matériel et la présence exclusive de ses techniciens pour le fonctionnement. Trente *liner* sont équipés dès cette année.

– Le Danois Waldemar Poulsen invente un dispositif capable de produire des ondes entretenues, l'arc dit chantant. Après quelques années de mise au point, il deviendra l'un des générateurs d'ondes de la téléphonie sans fil, de qualité cependant inférieure à l'alternateur.

1904

– En France, la station Ouessant TSF conçue par Tissot est en liaison permanente sur la longueur d'onde de 600 m avec 80 navires. La nuit avec le Maroc.

– La TSF est placée sous le contrôle de l'administration des Postes et Télégraphes.

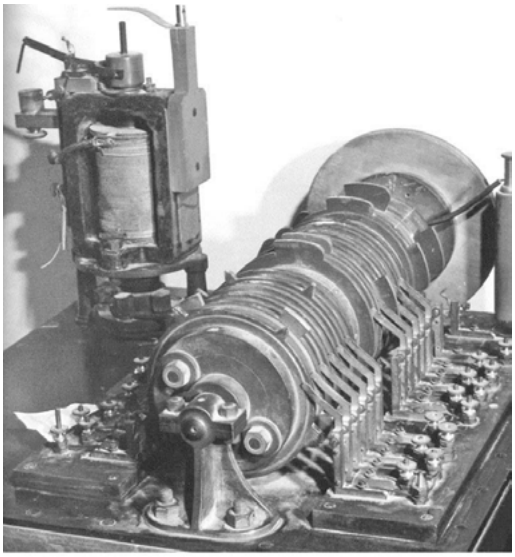
– La Tour, prêtée par Gustave Eiffel commence à être équipé par Ferrié, comme station expérimentale militaire avec une puissance de 10 kW. Son antenne d'une hauteur idéale lui permet de communiquer avec les places fortes de l'Est, car l'on pressent la probabilité d'un conflit avec l'Allemagne. Ce prêt de la Tour n'était pas désintéressé. Il la sauvera de la destruction programmée par l'intelligentzia artistique et littéraire : *cette horreur qui défigure Paris* .

La télémécanique - Branly- Tesla

N'oublions pas que la transmission de l'écrit par TSF, puis de la voix par radiophonie ne sont pas, aujourd'hui comme hier, les seules informations transmises au moyen des ondes hertziennes. Transmettre des signaux capables de faire fonctionner à distance divers mécanismes au moyen des ondes a été à l'époque un sujet de recherches.

Branly, dont le cohéreur fut un élément important au début de la TSF, laissa à d'autres les recherches dans ce domaine, pour se consacrer vers 1896 à ce qu'il dénomma la télémécanique. Émettre et recevoir un ordre paraît simple, mais faire fonctionner à distance, sans fil, un mécanisme nécessite plusieurs ordres et souvent un signal en retour, témoignant que l'ordre a bien été exécuté.

Il déposait à l'Académie, en 1905, deux notes sur le sujet : Distribution et contrôle d'actions produites à distance par les ondes électriques.



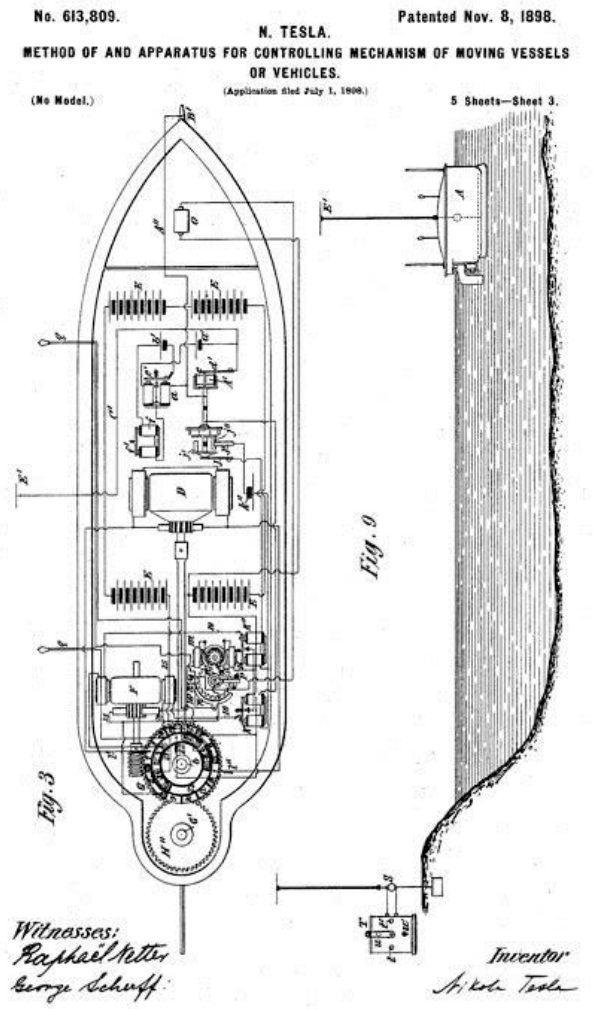
zu Distributeur télémécanique de Branly

En juin, suivait une conférence avec démonstration devant 5000 personnes au Trocadéro. La figure (zu) montre le distributeur dont chaque came commande une action. Cela consistait à allumer ou éteindre des lampes, à déclencher la gâchette d'un pistolet par électro-aimant, ou encore soulever un poids par électro-aimant ou le faire tomber, etc.

On apprit à cette occasion qu'un Américain, Nikola Tesla, avait lui aussi étudié le problème et conçu une maquette de bateau télécommandé, très élaborée comme le montrait son brevet de 1898 (zv), suivi de plusieurs autres. Il projetait d'appliquer ce principe à des torpilles ou petits bateaux télécommandés destiné à détruire des navires de guerre. Ses propositions à l'US Navy ne trouvèrent pas beaucoup d'écho.

Il fit néanmoins en 1898 une démonstration à Madison Square Garden devant un public très intrigué. Malheureusement, ce scientifique cherchant toujours à étonner le public par des expériences spectaculaires fut déçu par l'absence totale de journalistes, mobilisés ce jour-là par un événement politique. Aucun article n'a relaté ce fait, si ce n'est cette illustration 100 ans plus tard (zw).

zw bateau télécommandé



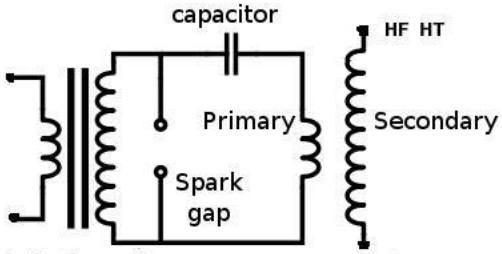
zv Navire télécommandé de Tesla

Les milliards de télécommandes qui manœuvrent à distance nos portes, comme celles qui commandent des centaines de satellites résultent de la voie tracée par Branly et Tesla.

Au cours de WW1, en 1915, l'équipe Télégraphie Militaire du général Ferrié réussit à télécommander jusqu'à 50 km un petit avion pour la reconnaissance photographique, l'ancêtre des drones actuels. En l'air cela marchait assez bien, mais l'atterrissage était très hasardeux.

Apports de Tesla à la TSF et à la radio

Une abondante littérature ou sur le web foisonne sur ses merveilleuses inventions, la plupart des idées, non concrétisées même plus tard. Ses thuriféraires le placent dans le peloton de tête des n pères de la radio. Pourtant, la seule application des ondes électromagnétiques réalisée, pas simplement imaginée, par Tesla, est la télécommande d'un engin flottant évoquée ci-dessus. Par contre, Tesla avait conçu un élément, le transformateur résonant, qu'il utilisa pour obtenir des hautes fréquences destinées à deux applications.



zx Transformateur résonant Tesla

Ce schéma d'assemblage de plusieurs composants (zx) est apparu dans un brevet « *System of Electric Lighting* » du 23/6/1891, dans le but d'obtenir de la haute fréquence pour un nouveau principe d'éclairage. Ensuite il fut repris dans ses brevets ultérieurs dont l'objectif était de transporter de l'énergie en très hautes tension et fréquence, au moyen d'un circuit constitué par la terre et la haute atmosphère conductrice, connectés par des grands fils soutenus par des ballons.

Dans ces projets comme les essais dans son laboratoire de Colorado Springs et le projet abandonné de la tour de Wardenclyff, Tesla espérait transporter de l'énergie avec des courants HF, (fin IV-3), mais dans aucun de ses brevets, on ne trouve l'utilisation d'ondes électromagnétiques, uniquement des courants à très haute fréquence et tension, sauf celui du bateau télécommandé.

D'ailleurs, dans son brevet US 649621 du 15/5/1900, il précise bien (lignes 73/82) : *Il est noté que le phénomène proposé de transmission d'énergie électrique est une véritable conduction et ne doit pas être confondu avec le phénomène de radiation électrique dont la vraie nature et le mode propagation le rend pratiquement impossible pour la transmission d'une énergie appréciable à des distances importantes.*

Dans un brevet suivant : *Dans mon système, il faut abandonner l'idée qu'il y a du rayonnement. L'énergie n'est pas rayonnée, elle est conduite.*

Le transformateur résonant de Tesla était un schéma intéressant, il était donc attendu qu'il soit utilisé ou retrouvé par d'autres chercheurs, pour générer des courants à haute fréquence à partir d'une bobine d'induction ou d'un transformateur. Mais ces courants HF étaient alors destinés à rayonner des ondes en circulant dans un circuit antenne-terre, alors que Tesla espérait transporter l'énergie directement par ces courants de conduction HF.

En Allemagne, Braun retrouva ce schéma en 1898. Oudin le retrouva aussi en France, mais un peu différent, avec un autotransformateur et ses courants HF étaient destinés à l'électrothérapie. En Angleterre, Marconi copia celui de Braun dans son brevet 7777, et gagna même en 1904 le procès que Tesla lui fit sur la version US de son brevet anglais.Tesla déclarait que la réussite de Marconi était normale, puisqu'en bon élève, il copiait 14 de ses brevets. C'était seulement exact pour ce transfo résonant, que les sans-filistes dénommaient parfois, le tesla.

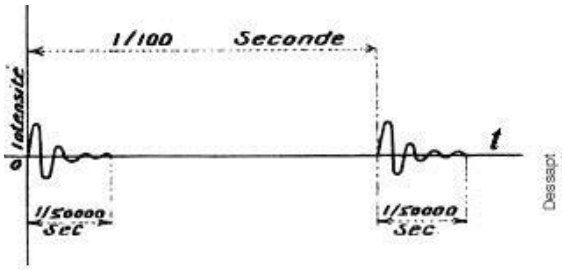
La légende de Tesla, inventeur de la TSF, a son origine dans l'histoire de la tour inachevée de Wardenclyffe en 1900, destinée à transmettre l'énergie par conduction HF (fin IV-3). Pour obtenir les fortes sommes indispensables, $ 50 000 de son banquier Morgan, Tesla vantait dans la presse un autre résultat attendu, la transmission de l'information comme avec le téléphone. Mais quand la nouvelle se répandit de la communication transatlantique de Marconi en 1901, au moyen d'un simple fil suspendu à un cerf volant, Morgan réalisa qu'il avait été dupé, il arrêta tout financement.

3ème étape - Les ondes entretenues

par arc,ou par alternateur HF 1900–1910

Depuis Hertz, les ondes de TSF étaient toujours générées par les étincelles de décharge d'un condensateur dans un éclateur, d'une durée très brève et se succédant à haute fréquence (a).

Compte tenu de ces trop longues périodes de repos, il était nécessaire de mettre en jeu de très fortes puissances instantanées, pour obtenir une puissance



I Courant de l'arc de décharge d'une bobine d'induction

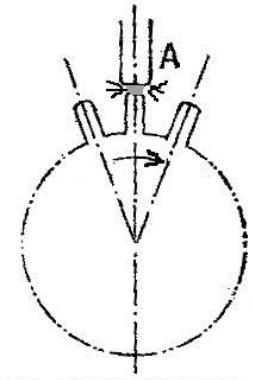
moyenne acceptable.

D'autre part la syntonisation médiocre, mais tant recherchée, en serait très améliorée. Le transmetteur devrait n'émettre qu'une seule longueur d'onde, non pas tout un bouquet de fréquences ; la multiplication des émetteurs dans quelques secteurs de l'Est américain saturait déjà l'éther, les récepteurs recevant simultanément plusieurs stations.

Il semblait important pour certains innovateurs de trouver des solutions pour remplacer ces trains d'ondes bien trop brefs, trop vite amortis et trop espacés, par des ondes régulières, si possible entretenues en permanence, des CW (constant waves).

Lorsque les expériences de Fessenden dans ce domaine commencèrent à être connues, un petit groupe se joignit à Fleming et Marconi, qui eux prônaient une théorie inverse : les trains d'ondes fragmentées issues des éclateurs à étincelles étaient comme des coups de cravache ou fouet (whiplash) répétés, indispensables pour propulser très loin les ondes. Les ondes entretenues seraient une erreur. L'expérience tranchera, l'erreur était dans l'autre sens.

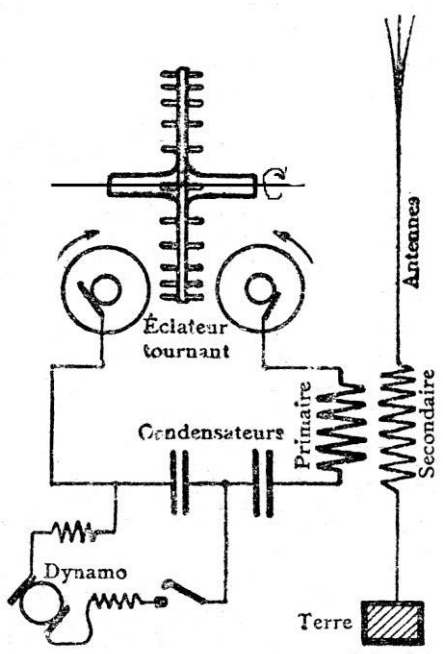
Éclateurs améliorés



zy Eclateur tournant

Les éclateurs à boules de Hertz puis de Righi étaient remplacés par d'autres formes pour éviter l'érosion de leur surface par l'arc, tels deux cylindres parallèles. Une solution plus élaborée fut trouvée, probablement par Fessenden, d'éclateurs tournants soit à rotation simple, soit double.

L'alternateur produisant le courant remplace la bobine d'induction et entraîne un disque denté. Dans le cas simple (zy) l'arc s'amorce à chaque passage de dent entre le disque et une électrode fixe ; dans le cas (zz) plus élaboré, deux arcs s'amorcent au passage d'une dent entre les deux plateaux tournant. Les arcs s'amorcent, en synchronisme avec la période du courant alternatif, en fonction de la vitesse de rotation et du nombre de dents.



zz Eclateur rotatif synchrone

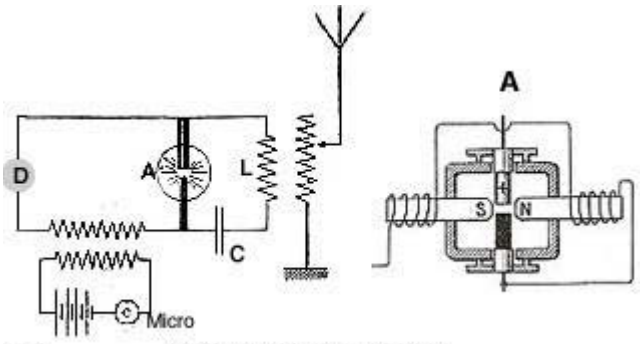
Tous ces systèmes à étincelles avaient l'inconvénient qu'ils généraient des trains d'ondes à trop basses fréquences. L'audition des sons reçus était difficile, car ils se confondaient avec les crachements des perturbations. André Blondel avait proposé d'y remédier, en augmentant la fréquence des étincelles à quelques centaines de Hz, fréquences acoustiques plus sensibles à l'oreille et se distinguant mieux des parasites. En 1910 Bethenod avait étudié pour le premier poste militaire de la Tour Eiffel un alternateur 22 kW à 800 Hz alimentant un éclateur rotatif pointe-plateau à étincelle soufflée.

Arc de Poulsen

Un ingénieur anglais, William Duddell, cherchait à réduire le bruit parasite des lampes à arc d'éclairage public. Il constata en 1900 qu'en faisant varier la tension, la fréquence audio du bruit changeait. Il conçoit un appareil permettant de modifier les oscillations électriques par un clavier, donc le son, et le présente à l'IEE. Il avait inventé un piano électrique rudimentaire utilisant le *singing arc*, l'arc chantant, mais ne trouve pas d'autre utilisation de ce convertisseur de courant continu en courant à haute fréquence.

Le Danois Waldemar Poulsen, réalise que cette fréquence pourrait être augmenté en modifiant la fréquence propre du circuit par les valeurs de sa capacité et de son inductance. Mais l'arc est un conducteur gazeux très particulier et instable. En effet il a une caractéristique tension/courant inverse, lorsque le courant croit, la tension décroît. Ce qui met le circuit en auto-oscillation à une fréquence déterminée.

Il trouve l'idée de le maintenir dans une vapeur d'alcool, générant de l'hydrogène, qui devait augmenter la tension de l'arc. La cathode en carbone tourne lentement à l'aide d'un petit moteur et l'anode en cuivre refroidie par une circulation d'eau. En plus il allonge l'arc en lui appliquant un champ magnétique transversal, procédé connu à l'époque.



xa Emetteur à arc de Poulsen

Avec ces améliorations, il arrive à des fréquences de 500 kHz et prend un brevet en 1903. Les théoriciens, Blondel en France, cherchent à expliquer le phénomène (xa). Les ondes émises avec l'arc de Poulsen ne sont cependant pas totalement entretenues, mais les intervalles entre chaque train d'onde est plus réduit qu'avec la bobine d'induction.

De plus, l'envoi de signaux Morse ne pouvait s'effectuer comme avec les éclateurs en allumant puis interrompant l'arc avec le manipulateur Morse. Il était trop long à se stabiliser, on se contentait de court-circuiter quelques spires de la bobine résonante, en envoyant pendant ce temps une autre fréquence gênante.

Après quelques années, l'arc chantant remplacera la bobine d'induction, d'abord en Amérique où les chercheurs vers la radiophonie étaient plus nombreux qu'en Europe. En effet, Marconi n'en faisait pas une priorité, estimant la télégraphie bien adaptée au marché qui l'intéressait, la marine.

Malgré ses défauts, l'arc chantant s'imposera partout en télégraphie, pour toutes les stations de TSF mobiles, les navires en particulier. Pour les stations fixes puissantes ce sera l'alternateur HF. Ces deux générateurs d'oscillations HF seront progressivement remplacés après 1913/14 par la triode.

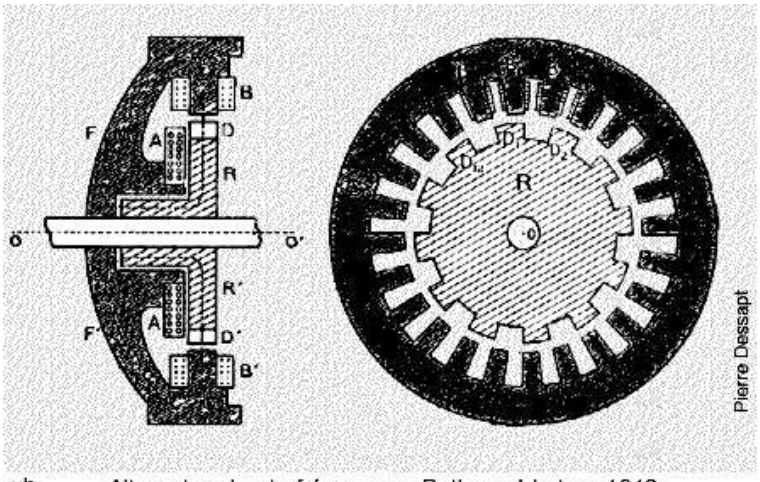
Alternateur à haute fréquence HF

Produire de très hautes fréquences avec un alternateur paraissait une gageure. Cela signifiait multiplier à la limite du possible dimensionnel le nombre de paires de pôles inducteurs et tourner à très grande vitesse ; sur ce dernier point, la limite était la vitesse périphérique mécaniquement admissible. Il s'avérait que l'alternateur classique ne pouvait pas atteindre ces fréquences. Pourtant, en 1893, Tesla avait réalisé un petit alternateur capable d'une fréquence de 10 kHz pour son système d'éclairage à haute fréquence (IV-2, zs), mais l'avait abandonné pour le transfo résonant.

Il fallait monter plus haut, surtout en puissance.

En Amérique, Fessenden demanda à General Electric d'étudier pour ses expériences un alternateur HF. Ses ingénieurs, dont Alexanderson, adoptèrent la solution d'un rotor en forme de disque avec des créneaux à la périphérie. Ceux-ci défilaient devant les bobinages inducteurs et induit montés sur le stator, provoquant devant chaque paire de pôles, une brusque variation de réluctance. Après un premier modèle donnant 1 kW à 10kHz en 1902, un modèle de 1906 étudié par Fessenden donnait du 80 kHz. Il fut ensuite monté en puissance par G.E..

En Allemagne, Goldschmidt de Telefunken étudia en 1911 un modèle basé sur un principe différent, la fréquence n'était pas très élevée, 10 kHz mais multipliée 2 à 4 fois par un système changeur de fréquence basé sur les harmoniques. Deux machines furent installées aux Etats-Unis, mais des difficultés firent abandonner le système.



xb Alternateur haute fréquence - Bethenod-Latour 1918

En France, un alternateur HF fut étudié par Bethenod et Latour en 1913 sur un principe proche de la machine Fessenden-Alexanderson (xb). Sur le croquis, on distingue le rotor massif R et ses créneaux périphériques D, le bobinage inducteur A et les bobines induites B. Construit par la *Société Alsacienne de Constructions Mécaniques*, pour la jeune *Société Française Radioélectrique*, *SFR*, il donnait du 20kHz à 3000 t/min et 125 kW, d'où une longueur d'onde de 15 000 m. Le modèle installé en 1919 à la station internationale de Lyon, La Doua, tourna jusqu'en 1944 ; il est conservé au musée Ampère. Ses performances et qualité le firent vendre à des dizaines de stations en France et en Europe.

Les ondes engendrées à partir d'un l'alternateur HF étaient pratiquement d'une fréquence unique, avantage majeur pour la syntonisation. Cela évitait le parasitage du bouquet de fréquences émises à partir des éclateurs à étincelles ou des arcs chantants. La très grande longueur d'onde avantageait leur propagation très loin, mais avec d'immenses antennes.

Néanmoins, le coût et le poids d'un alternateur et sa machine d'entraînement le limiteront aux stations intercontinentales à grande longueur d'ondes avec de très grandes antennes. Ces alternateurs puissants pour la radiophonie seront remplacés par les oscillateurs à triode après 1925.

1906

– Le congrès de Berlin de novembre établit la première convention radiotélégraphique internationale entre 29 pays. Elle ne concernait que le domaine maritime, les stations côtières et celles à bord des navires. Les stations côtières utilisent la longueur d'onde de 600 m, celles de bord 300 m. Mais il n'y a pas encore d'obligation de communication, en raison de l'opposition de l'Angleterre et de l'Italie, tous deux dépendants de Marconi ; on le regrettera après quelques années.

– La liaison transatlantique Cap Cod –Poldhu par Marconi devient régulière.

– Le détecteur à galène commence à se généraliser en parallèle avec le système électrolytique, sauf chez Marconi qui conserve son détecteur magnétique de préférence à la diode de Fleming.

– Lee de Forest invente un nouveau détecteur proche de la diode de Fleming, l'Audion, considéré sans grand intérêt pendant 5 à 6 ans.

– Fleming édite un livre sur le système TSF de Marconi en affirmant que seuls les systèmes à étincelles, générant des trains d'ondes amorties, peuvent communiquer une violente impulsion (whiplash), ou « coup de fouet », indispensable aux ondes pour aller très loin. Dommage qu'un scientifique se prête à ce mensonge pour des raisons commerciales.

– Fessenden réalise les premières transmissions phoniques et musicales, grâce aux ondes entretenues. Après la radio-télégraphie (par radiation), c'est la naissance de la radio-téléphonie, la radio-phonie devenue la radio :

4ème étape

Invention de la radio-phonie par Fessenden 1900-1907 (12)

Ce physicien canadien professait à l'université de Pittsburg, après plusieurs expériences industrielles dans l'électricité et la télégraphie. En 1899, il avait fait des communications à l'AIEE et dans l'Electrical Word sur la nécessité de passer des ondes amorties de TSF aux ondes entretenues pour arriver à transmettre la voix.

D'où nécessité de remplacer l'éclateur à étincelles et le cohéreur de réception par d'autres dispositifs.

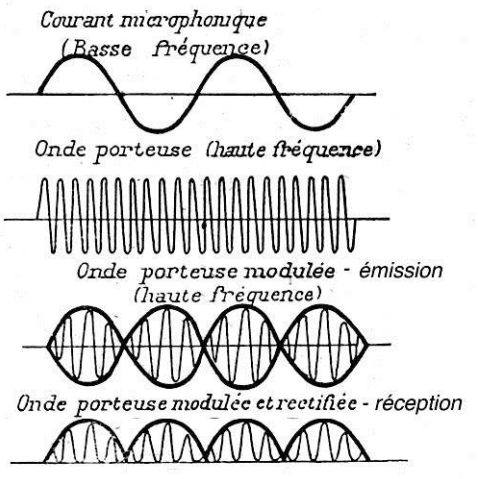
En 1900, le service Météo, dépendant du ministère de l'agriculture, lui confiait l'installation d'un réseau de 4 premières stations côtières de TSF, si possible en phonie, pour éviter la pose de câbles télégraphiques. Cela devait lui permettre de travailler à son projet de transmission de la parole, plutôt que des points et traits en Morse.

Les problèmes

Il se rendait bien compte que ce n'était pas une simple adaptation, mais une transformation presque complète des principes et matériels connus de la TSF. Il s'attela aux problèmes et arriva pas à pas, dans la discrétion, à les résoudre en six ans.

Dès le départ, il se trouvait devant le même type de question que Gray et Bell à l'origine du téléphone : comment traduire les sons dans l'air en courants électriques à haute fréquence pour ensuite les transformer en ondes ?

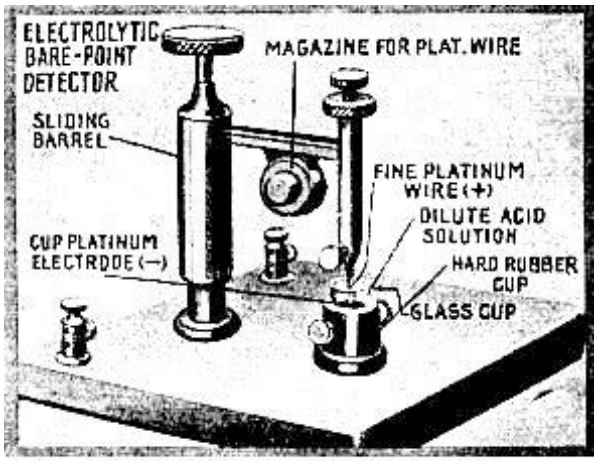
Rapidement il découvrait ce que nous appelons la modulation d'amplitude, c'est-à-dire, superposer le courant à basse fréquence audio issu d'un micro, au courant à haute fréquence, qualifiée de porteuse, générant par l'antenne les ondes à transmettre. (xc)



xc Modulation d'amplitude de la porteuse

Au début en raccordant simplement un micro en série dans le fil antenne-terre.

Mais cette porteuse, il était indispensable qu'elle soit continue, non pas des trains d'ondes hachés comme en TSF. Il fallait des ondes entretenues, ce fut le problème le plus difficile. Fessenden utilisa successivement divers procédés dont l'arc chantant de Poulsen, puis un éclateur rotatif synchrone dont il inventa deux modèles. Mais des bruits de fond parasites subsistaient. Il fallait que le courant HF soit une sinusoïde parfaite que seul pourrait fournir un alternateur spécifique à haute fréquence.



xd Détecteur électrolytique de Fessenden

Au niveau du récepteur, le cohéreur ne pouvait détecter un son sur cette porteuse. Il fallait la transformer en un simple courant continu modulé, audible dans des écouteurs téléphoniques. Cela revenait à éliminer les portions d'ondes négatives, pour nous, redresser le courant HF. Fessenden adopta un effet thermique découvert par Wollaston, l'échauffement d'une très fine pointe de platine enrobée d'argent, système qu'il dénomma baretter, (échangeur). Un jour, pour nettoyer la pointe, il la fit tremper dans une coupelle d'eau acidulée, cela fonctionnait mieux. Ainsi son *baretter* devint électrolytique (xd), il le breveta seulement en 1902. À la même époque,1900, Ferrié présentait le même procédé à Paris ; simultanéité probablement due au hasard.

Expériences et solutions

Fin 1900, installé à Coob Island, à 80 km de Washington, il essaie un premier système avec comme transmetteur un éclateur rotatif à haute fréquence, 10 000 étincelles par sec, et comme récepteur, son *baretter* électrolytique.

Aux deux stations éloignées de 1,6 km, l'antenne avait 50 pieds de hauteur. La courte phrase transmise était audible mais très brouillée. (12)

1901/1902, il essaie un éclateur dans l'azote comprimé, puis de l'arc chantant qui donne moins de bruits parasites. Cependant Fessenden comprend que pour transmettre des sons, il faut générer des ondes totalement entretenues, seules produites à partir du courant d'un alternateur à haute fréquence.

À la suite d'un désaccord avec le directeur du service météo sur la propriété de ses brevets, Fessenden le quitte et sollicite pour ses recherches l'appui du Canada, son pays natal. C'est un dur refus, le Canada ayant déjà offert à Marconi une subvention de $ 80 000 pour installer sa station intercontinentale à Glace Bay.

Il obtient l'aide financière de deux hommes d'affaires de Pittsburg, intéressés par un investissement dans ce projet d'avenir. Une société est créée, la *NESCO, National Electric Signaling Company,* dont le laboratoire est installé à Brant Rock dans le Massachusetts avec une antenne haute de 120 m. Prévoyant la réussite de ses projets, il fait construire en 1904 une station identique, de l'autre coté de l'Atlantique, à Machrihanish, en Ecosse.

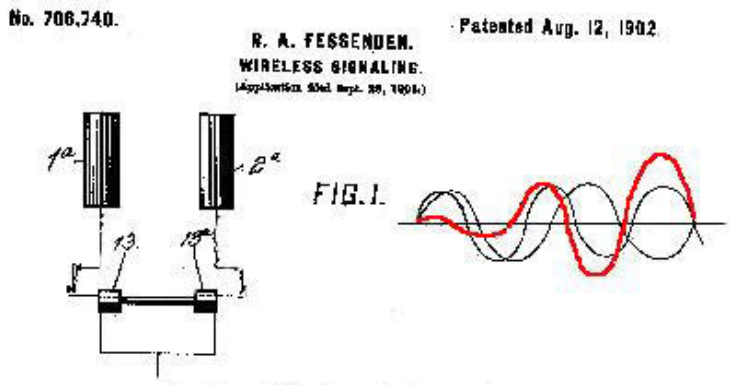
Il convainc Steinmetz de General Electric de lui fabriquer un petit alternateur produisant du 10 000 Hz, 1 kW sous 100 V. Comme cette fréquence est trop faible, il la double par un éclateur tournant à 20 000 cycles /s. Les essais de 1903 sont encourageants.

Il commande alors à G.E. un alternateur produisant du 100 kHz, 10 fois plus que le premier.

Fessenden consacrera encore deux années d'essais pour trouver les meilleurs schémas adaptés à la transmission phonique. Il travaille aussi sur le multiplex, la possibilité de transmettre deux messages télégraphiques simultanément. Pour amplifier la réception avec un écouteur téléphonique adapté, il conçoit un schéma innovant, l'**hétérodyne**, qui consiste à superposer à la fréquence modulée une autre fréquence un peu différente de la première, d'environ 5%.

La différence à chaque instant entre les deux est un signal modulé à une fréquence plus faible (xe). Des brevets ont été pris en 1902 et 1903, mais la nécessité de transmettre un autre signal, de fréquence proche du signal reçu, était une complication qui ne prit tout son intérêt qu'avec la triode,12 ans plus tard.

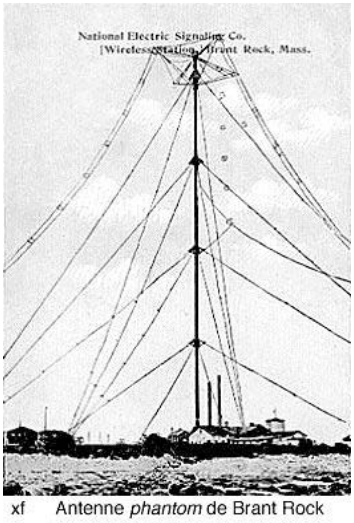
Toujours appliquée aujourd'hui, l'hétérodyne est à classer parmi les inventions les plus importantes de la radio.



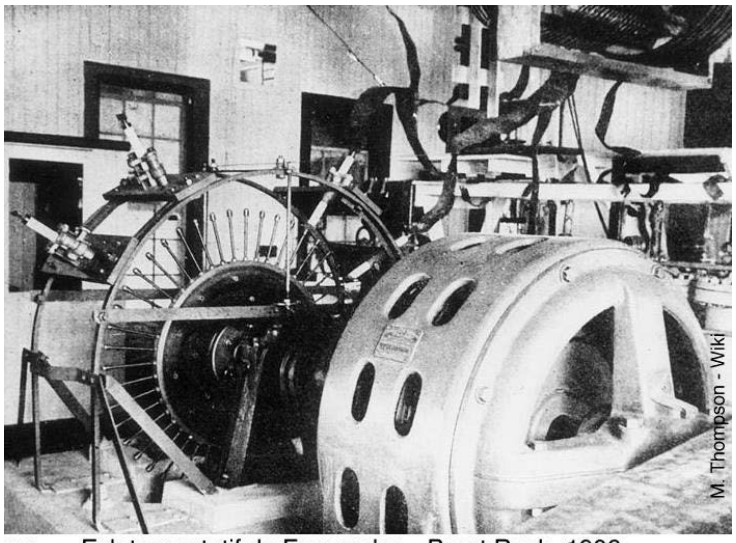
xe Système hétérodyne de Fessenden

L'alternateur promis par G. E. arrive fin 1905, mais déception, il est un peu plus puissant que le premier, mais sa fréquence ne dépasse pas 10 kHz. Impossibilité de transmettre des ondes longues de dizaines de km, il faudrait des antennes géantes. Fessenden récupère une partie de la machine et va travailler des mois pour la transformer.

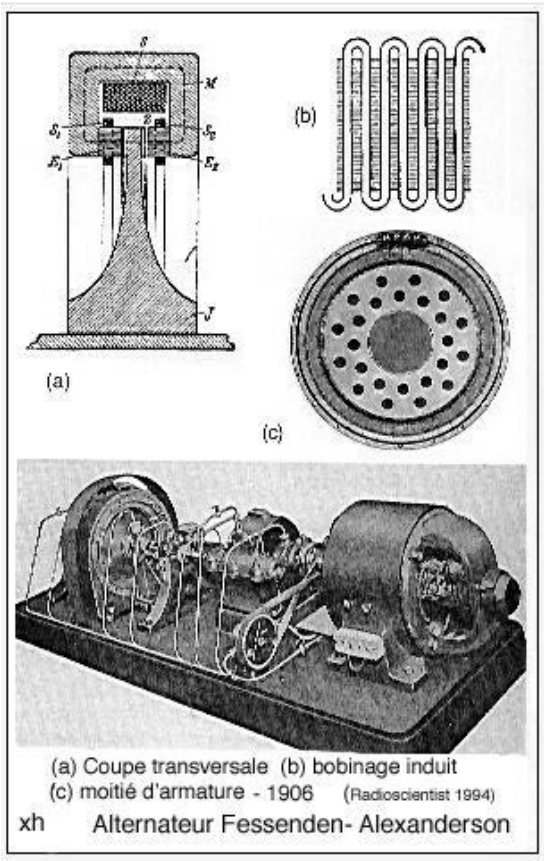
Cependant, la station réceptrice de l'autre coté de l'Atlantique, à Machrihanish en Écosse, est terminée avec son antenne de 120 m. Comme celle de Brant Rock, trône à son sommet un système particulier en forme de parapluie, le *phantom,* qui doit en accroître la performance (xf). Le 29 décembre 1905 Brant Rock émet, mais l'Ecosse ne reçoit pas. Ce n'était qu'une erreur de calcul de la longueur d'onde. L'essai est repris le 2 janvier avec succès, envoi de 40 mots chiffrés sans une seule erreur.



xf Antenne *phantom* de Brant Rock



xg Eclateur rotatif de Fessenden - Brant Rock -1906



(a) Coupe transversale (b) bobinage induit
(c) moitié d'armature - 1906 (Radioscientist 1994)

xh Alternateur Fessenden- Alexanderson

Ne pouvant encore disposer d'un alternateur à très haute fréquence pour la radiophonie, Fessenden fait le 3/1/1906 une démonstration d'une communication télégraphique multiplex à deux voies entre ses deux stations transatlantiques distantes de 4800 km. La réponse parvient peu après par télégraphe : « *Nous vous entendons Brant Rock haut et fort*. »

Le système était encore un émetteur à étincelles, mais très perfectionné (xg) : Un alternateur triphasé de 35 kW générait du triphasé à 125 Hz et entraînait en synchronisme un éclateur rotatif qui provoquait les étincelles 750 fois par seconde, aux instants précis où la valeur instantanée de la tension était optimale. On distingue sur la photo les 4 électrodes fixes et les 50 électrodes rotatives entre lesquelles s'amorçaient les étincelles. L'onde porteuse obtenue n'était pas encore continue, mais la fréquence des étincelles était déjà à une fréquence sonique.

Les transmissions se poursuivirent même l'été, elles étaient d'une qualité, sans parasites, bien supérieure à celles de Marconi, limitées encore à une seule dépêche et à moins longue distance.

L'alternateur que construisait Fessenden commença à fonctionner à l'automne 1906. Tournant à 3000 t/min, il générait une faible puissance, 300 W sous 65 V, mais à 50 kHz, avec possibilité ultérieure de monter à 90 kHz (xh) (13). Avec cette machine tant attendue et le système de réception hétérodyne, il pouvait démontrer la possibilité pratique d'effectuer des liaisons téléphoniques sans fil d'une très bonne qualité, à une distance encore réduite, vu la faible puissance de son alternateur.

La radio-phonie est opérationnelle

Le 21 décembre 1906, des personnalités importantes sont invitées à une première démonstration de téléphone sans fil, entre Brant Rock et Plymouth, soit 18 km. Étaient présents les experts de AT&T à qui Fessenden espérait vendre ses brevets, plusieurs scientifiques et techniciens, E. Thomson et G. Pickard, ainsi que le journal spécialisé American Telephone, dont le compte-rendu parut le mois suivant.

Deux types d'essais furent effectués :

– Transmission directe sans fil, depuis Brant Rock, de paroles, d'enregistrements musicaux sur phonographe et de musique.

– Transmission indirecte d'un programme semblable par le réseau filaire en amont de Brant Rock - conversion sur le transmetteur sans fil - réception à Plymouth avec renvoi sur réseau filaire - écoute finale sur ce réseau.

Ce dernier essai était le plus important, car Fessenden pensait que l'application principale du wireless était de relayer le réseau filaire, partout où il n'existait pas, ou n'était pas possible, comme sur les océans. Il fallait démontrer la compatibilité des deux systèmes.

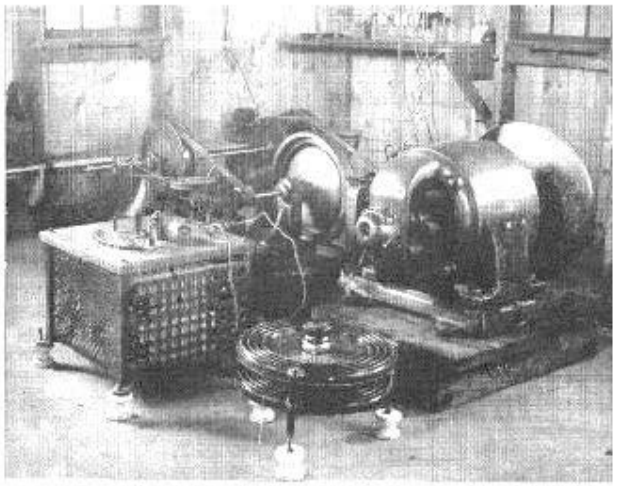
Ce fut une réussite complète, la qualité des sons était au moins égale à celle du téléphone par fil sur la même distance. L'alternateur fournissait du 70 kHz.

Malheureusement la déception fut forte pour l'inventeur canadien. AT&T déclara que le système Fessenden était admirablement adapté à la transmission de la musique et des nouvelles, simultanément à plusieurs endroits, mais inadapté pour un service commercial de téléphone. Le problème de confidentialité, avantage et inconvénient des ondes.

AT&T n'acheta pas les brevets. Elle attendit 1920 pour équiper en Californie une première transmission commerciale sans fil à Catalina Island, mais en remplaçant l'alternateur par un oscillateur avec tubes à vide plus pratique et performant.

Un petit événement technique, mais lourd de conséquences potentielles, compensait un peu cet échec commercial de Fessenden. Un soir de novembre, au cours des essais de préparation, un échange verbal entre les techniciens de Brant Rock et Plymouth fut entendu à la station de Machrihanish en Ecosse par l'ingénieur G. Armour, avec une telle clarté qu'il le note sur son livre de bord et transmet par lettre recommandée cette nouvelle à Fessenden : « *À environ 4 h du matin, j'écoutais les signaux télégraphiques de Brant Rock, quand à mon grand étonnement, j'ai entendu au lieu des points et tirets, la voix de M. Stein dire aux opérateurs de Plymouth comment faire fonctionner la dynamo. Au début je pensais perdre mes sens, mais je suis sûr que c'était la voix de Stein, très clairement, comme s'il était dans la pièce voisine* »

Une réception semblable se produisit une semaine plus tard. Fessenden décida alors de préparer un essai officiel d'une liaison radiophonique transatlantique, mais le 6 décembre 1906, l'antenne de Machrihanish s'effondrait suite à une erreur de fixation des haubans. Elle ne fut pas remontée.



corner in the Laboratory at Brant Rock, Showing New High Frequency Alternator, the Source of Energy for Wireless Telephone Experiments. *1907*

xj

Cinq ans après les trois points de la lettre S reçue par Marconi à Terre Neuve, une voix traversait l'Atlantique, encore plus loin, à 4800 km. C'était aussi la nuit en hiver, conditions favorables, avec un générateur de 0,3 kW, Marconi disposait de 20 kW. (xj).

On rapporte souvent que trois jour après la présentation à AT&T, le soir de Christmas Eve, Brant Rock aurait diffusé une véritable émission, reçue par des bateaux équipés de son récepteur à baretter, de l'United Fruit Co et de l'US Navy, prévenus trois jours auparavant. Le programme était une courte présentation, un chant de Noël, une citation de la bible, un largo de Handel joué au violon par Fessenden. Il aurait été renouvelé pour le NewYear's Eve.

Malheureusement, un historien de la radio, J.E. O'Neal, a longuement étudié cet épisode, dont l'unique source est une lettre de Fessenden, écrite en 1932, peu avant sa mort ; la conclusion en 2006, déjà établie en 1909, est qu'il n'y a aucune preuve écrite de cet événement. Pourquoi Fessenden a-t-il inventé cette histoire 25 ans plus tard, peu cohérente avec son comportement normal d'intégrité ? (14)

xk Fessenden avec son équpe de Brant Rock

Au cours cette année 1906, Fessenden avait constitué en juillet la société Fessenden wireless Télégraph Company of Canada, soutenue par des hommes influents. Peine perdue, le Canada avait cédé des droits exclusifs à Marconi. Il en fut amer, mais ce fut le début d'une méfiance de ses commanditaires à son égard.

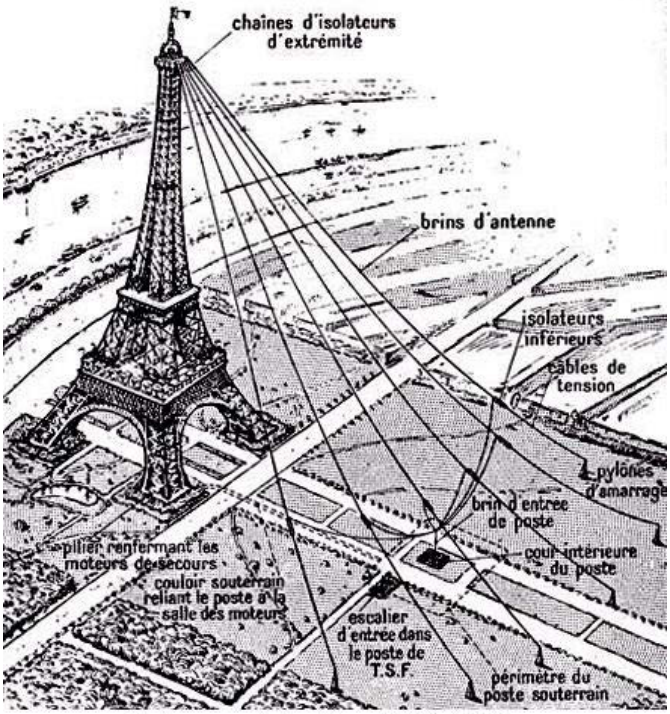
L'année suivante, il établit une liaison permanente entre Boston par Brant Rock et New York (Brooklyn), soit 320 km. Il équipe en radiophonie, avec portée minimale de 5 miles, les navires de l'US Navy partant en croisière dans le Pacifique. (xk)

En 1911, la NESCO le licenciait, il gagna le procès qui s'ensuivit pour rupture de contrat. Il s'installa à New London dans le Connecticut. Ce fut ensuite une complexe bataille juridique de 15 ans. La NESCO fut mise sous séquestre, puis vendue à Westinghouse, puis à RCA. Cela se termina en 1928 par le versement à Fessenden de $ 500 000, dont 200 000 revenaient à ses avocats. C'était une grosse somme, mais bien faible pour des centaines de brevets, dont beaucoup se sont traduit par des inventions marquantes.

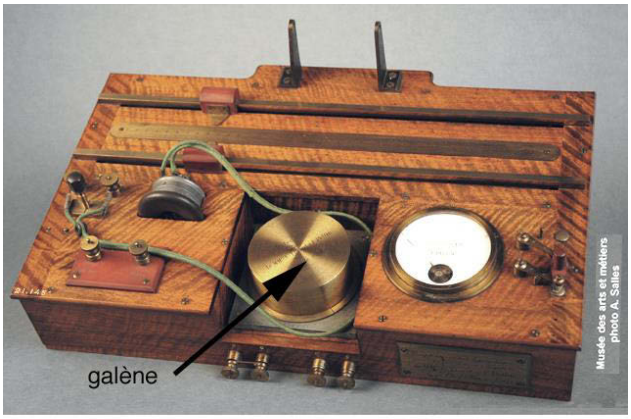
Dans les années qui suivirent, poursuivant toujours ses activités dans le domaine de la radio, il se diversifia dans d'autres domaines, en particulier la transmission sous-marine.

L'avenir lui donna raison, pour équiper les grandes stations radiophoniques, seront vendus une vingtaine d'alternateurs HF Alexanderson, et le même nombre de machines Bethenod-Latour en Europe. Puis ce fut la révolution électronique de la triode.

1907



xm Antennes de la Tour Eiffel 1908



xl récepteur marine à galène Tissot- Pellin 1907

– Le lieutenant Tissot conçoit avec Pellin un récepteur à galène simple, permettant aux navires de recevoir les premiers signaux horaires émis depuis la Tour Eiffel, indispensables pour calculer leur position. (xl)

– Tentatives de radiophonie.

Pendant plusieurs années, la transmission des sons fut un sujet de recherches pour quelques télégraphistes, surtout américains. Personne n'envisageait d'adopter l'alternateur de Fessenden, lourd et coûteux, pourtant seul capable de générer des ondes entretenues. Ils essayèrent d'y parvenir avec l'arc chantant.

Le système était meilleur que l'éclateur, mais les sons transmis étaient inextricablement mélangés avec des sifflements, clics et gargouillis que personne n'avait la patience d'écouter longtemps.

Parmi ces aventuriers figurent A.T. Collins, F. Mac Carty, C. Elwell, Slaby, Poulsen l'inventeur du Singing, Charles Herrold et surtout de Forest.

1908

– Lee de Forest fait des essais de phonie à Paris depuis la tour Eiffel, puis le Mont Valérien, avec un émetteur à arc chantant et un récepteur équipé avec son détecteur audion. Résultat médiocre.

– La Tour Eiffel est équipée avec une nouvelle antenne à 6 câbles (xm). La station d'émission est enterrée, mais fonctionne toujours avec des émetteurs à étincelles classiques bien adaptés à la télégraphie à plus de 1000 km, de jour, mais inutilisables en phonie. Il sera remplacé par un émetteur à arc chantant vers 1914, puis un alternateur permettant la radiophonie après la guerre. (16)

1909

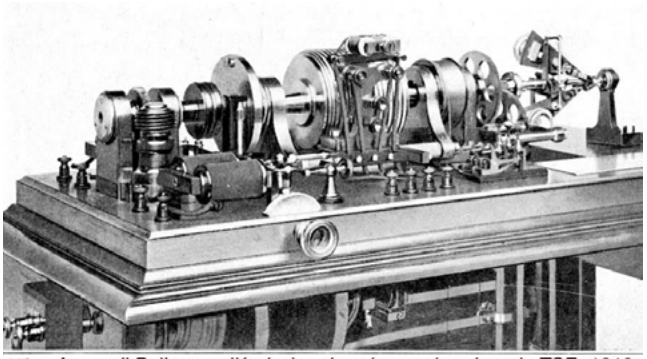
– Collision des deux paquebots Republic et Florida sur la côte Est des Etats-Unis, au large de Nantucket. Les 2000 passagers sont sauvés grâce à la TSF.

– Le prix Nobel de physique est décerné à Braun et Marconi : pour leur contribution au développement de la télégraphie sans fil. Le lecteur jugera si ce choix, discuté à l'époque, correspond à la réalité. La France avait suggéré Branly, Marconi, Poulsen. C'est près d'une dizaine de personnes qui ont fait la TSF, en particulier Lodge, l'oublié.

– Telefunken réalise une transmission phonique à 40 km, avec un émetteur à arc. Résultat médiocre.

1910

– À partir du 23 mai, des signaux horaires sont émis depuis la Tour Eiffel vers le monde entier, tous les jours à 0 h et 11 h, avec une précision de ¼ ou 1/10 de seconde. La longueur d'onde de 2600 m leur permet d'être capté à 4000 km, par 8 stations mondiales qui les rediffusent dans la zone de leur portée. Ceci grâce aux travaux de Tissot (xn).



xn Appareil Belin pour l'émission des signaux horaires de TSF- 1910

Paris étant sur le méridien d'origine, le marin recevant ces signaux sur son poste à galène, peut ainsi régler son chronomètre puis calculer sa longitude par comparaison entre l'heure locale et l'heure d'origine. La latitude étant obtenue plus classiquement par des mesures astronomiques. (17) Le méridien d'origine devient anglais en 1911, il passe à Greenwich.

Ce fut l'un des apports notables de la TSF à la sécurité maritime.

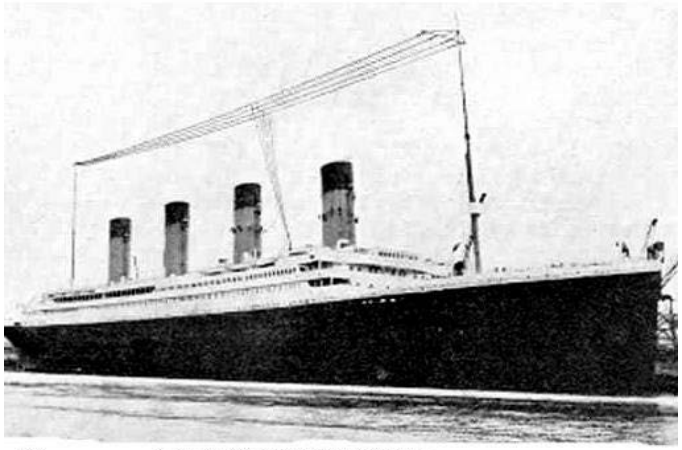
– Fondation de la Société Française Radioélectrique, SFR, à laquelle fut confié l'équipement des dizaines de stations fixes d'émission en France, dans les colonies et à l'étranger dans les années 1910 à 1914. L'organe essentiel était l'alternateur à résonance qui permettait d'alimenter un transfo industriel chargeant la capacité du circuit oscillant. Il était réalisé pour les fréquences de 600 et 1000 Hz sans nécessiter des vitesses exagérées du fait du maintien absolu des conditions de résonance et de la construction.

On pouvait faire varier la tonalité de la note musicale par la simple manœuvre du rhéostat d'excitation de l'alternateur, avantage appréciable permettant de distinguer des émissions voisines par leur tonalité différente. De même, on changeait la longueur d'onde par simple manœuvre d'un volant, et l'on commutait automatiquement d'émission à réception.

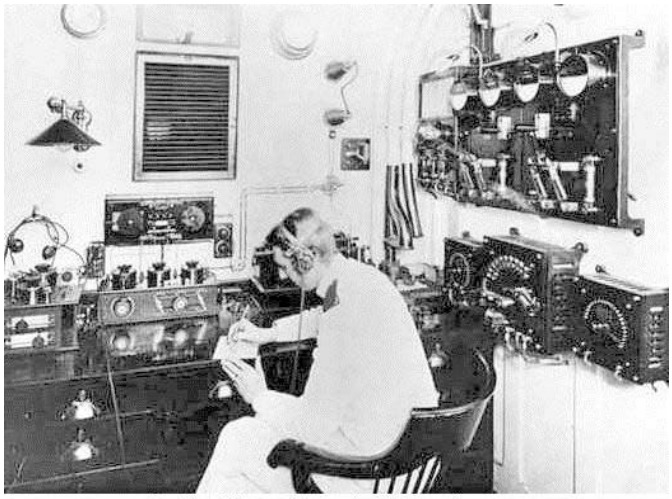
La SFR équipait des navires de guerre ou de commerce. Elle conçut plusieurs modèles de postes militaires hippomobiles ou automobiles utilisant une magnéto entraînée par moteur à essence. De même des postes allégés pour les premiers aéroplanes, dirigeables et hydravions.

1912

– Conférence de radiotélégraphie à Londres définissant le code Q à 3 lettres et le partage des ondes. Les amateurs, groupe en voie de croissance, ont droit à celles inférieures à 200 m, jugées peu intéressantes.



xo Les 4 antennes du Titanic



xp Radiotélégraphiste de Marconi

– Naufrage du Titanic. Un tiers des 2300 personnes a été sauvé par la TSF, conjugué à une mer plate, rare à cette époque. Il était équipé d'un émetteur à étincelles rotatif Marconi, pour les longueurs d'ondes 300 et 600 m de portée 600 km de jour, 3000 km de nuit. (xo) Les deux télégraphistes Phillips et Bride, qui survivra seul, ont fait le maximum, mais fatigués par des longues heures de transmission et réception de télégrammes privés. Le sauvetage par le Carpathia s'est joué à quelques minutes près. L'opérateur Cottam s'apprêtait à se coucher, enlevait ses chaussures, mais n'avait pas encore enlevé son casque lorsqu'il a capté le CQD du Titanic. La TSF a joué un rôle essentiel dans ce troisième naufrage spectaculaire, mais il aurait pu être bien plus efficace pour plusieurs raisons révélées par l'enquête, et auxquelles la conférence exceptionnelle de 1913 à Londres apportera des solutions.

– En particulier, ce fut la fin du marconisme, presque un monopole. Le principal rôle des télégraphistes, obligatoirement employés de la Marconi Co. était d'émettre et recevoir des marco-grammes pour les passagers, à prix élevé bien sûr. Les messages concernant la navigation elle-même étaient seulement transmis en échange de l'hébergement et la nourriture des télégraphistes (xp). Ceux-ci ne devaient communiquer qu'avec des navires ou stations côtières équipées par du matériel et du personnel Marconi.

La nouvelle convention Safety of Sea définit une série de règles dont : obligation d'une station de bord pour tout navire - intercommunication obligatoire entre navires quel que soit le type de matériel - veille 24 h- code SOS, etc.

– Une conséquence indirecte de ce naufrage spectaculaire fut l'étude par Fessenden d'un oscillateur électrique mesurant la distance d'un iceberg à 4 km. L'appareil, un radar sonore mesurait l'écho, l'aller et retour d'ondes sonores de 600 Hz qui parcourent 1400 m/s dans l'eau. L'US Navy l'étudia pour détecter les sous-marins en 1914. Il étendit le procédé à la mesure de la profondeur par son Fathometer, premier sondeur à ultrasons.

– Eccles propose les noms de diode et triode pour les tubes à deux et trois électrodes

Cinquième étape

L'audion, invention capitale de Lee de Forest 1907-1913

L'Amérique a eu parfois du retard dans certains domaines, mais quand elle se met en route, c'était déjà à l'époque, avec puissance. En 1902, il y avait à peine 10 sociétés dans cette nouvelle activité de la TSF ; en 1906, elles seront 200. Lee de Forest, jeune ingénieur diplômé de l'université, s'associait en 1902 avec Abraham White dans l'American de Forest Wireless Telegraph Company pour fabriquer et vendre du matériel télégraphique sans fil, un nouveau marché prometteur, mais très concurrentiel, où la publicité comptait plus que la qualité des matériels. Il réussit à équiper 5 stations pour l'US Navy, le plus gros client de l'époque dans ce domaine.

xq A DE FOREST WIRELESS TELEGRAPH AUTOMOBILE

À la recherche de nouveaux besoins, il inaugura des postes ambulants montés sur un véhicule électrique, permettant de transmettre des aérogrammes urgents, comme les cours de la bourse. L'opérateur travaillait dans une petite cabine vitrée (xq).

De Forest adopta comme transmetteur l'arc de Poulsen plus performant que les systèmes à étincelles. Pour la réception, le détecteur électrolytique, mais il eut des problèmes de brevet avec Fessenden.

Il se lança alors dans la recherche d'un nouveau type de détecteur, poussé par la nécessité, car la Forest Company disparut en 1906, suite au départ de son associé White. Sans travail ni argent, il avait du temps pour expérimenter dans le laboratoire constitué par son petit logement. D'autant plus qu'il avait divorcé de sa première femme.

C'est ainsi qu'il fit cette invention capitale, que l'on résume trop souvent d'une façon par trop simpliste :

« Il eut l'idée (comment ?) d'ajouter une troisième électrode (pourquoi ?) a un tube de Geissler, prédécesseur de la diode de Fleming et d'inventer l'audion, le détecteur qu'il cherchait, meilleur que les précédents. Il l'installa pendant 5 ans dans ses récepteurs de TSF. Et soudainement lui-même et d'autres découvrent que cette lampe peut aussi assurer deux fonctions inespérées, l'amplification, puis la génération d'oscillations pour les émetteurs. »

Invention majeure qui va complètement bouleverser l'histoire de la TSF, de la radiophonie et de tout ce qui suivra. Cela justifie qu'on s'y attarde pour rechercher le pourquoi et le comment de cette surprenante idée, qui n'était ni dans l'air du temps, ni un hasard, ni le perfectionnement d'un appareil existant, la diode de Fleming, dérivée du tube de Geissler et de l'effet Edison.

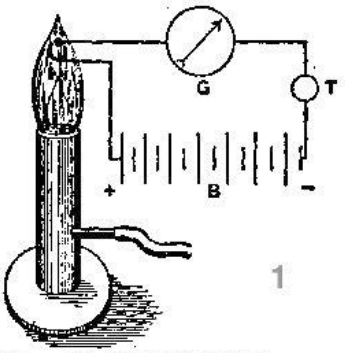
Ce n'était au départ que l'observation sagace d'une flamme de bec de gaz, sans rapport avec les ondes électriques.

Surtout, on ne s'explique pas cette invention en deux temps : d'abord l'invention de l'appareil répondant à l'objectif du chercheur, la détection ; suivirent des années d'utilisation par nombre de techniciens, et brusquement la découverte presque simultanée par 6 chercheurs, de deux autres très importantes applications ignorées.

Notre investigation est facilitée par des documents fiables, en particulier c'est une rare invention dont l'auteur a détaillé son long processus de mûrissement, en ayant de plus l'honnêteté d'avouer qu'il ne comprenait pas bien pourquoi cela marchait. Il ne pouvait pas, ignorant à cette époque la structure de l'atome. Encore une fois dans l'histoire de l'électricité, l'application réussie mais incomprise précède la théorie explicative.

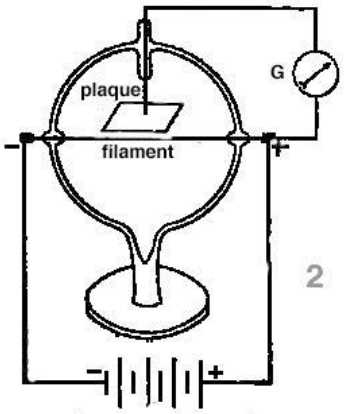
Première phase, l'invention (1905/07)

Résumons la communication à l'AIEE de l'inventeur sur son audion et publiée par le Scientific american de 1907 (18). Les étapes de sa recherche sont schématisées par les figures 1 à 5.



xr détection par la flamme

De Forest travaillait sur le détecteur électrolytique pour en créer une nouvelle version. Un soir de 1905, il remarque avec surprise que la flamme du bec de gaz éclairant sa chambre réagit bizarrement lorsqu'il fait fonctionner, à l'autre extrémité, la bobine d'induction, productrice d'ondes hertziennes pour ses essais. Elle paraît sensible aux ondes et pourrait peut-être les détecter. De Forest s'engage sur cette piste de recherche et constate avec un montage simple que la résistance d'un petit espace au milieu de la flamme varie brusquement lorsque l'éclateur de la bobine d'induction émet des ondes (xr1). Le galvanomètre dévie et l'écouteur téléphonique grésille. Il analyse alors le phénomène de la conductibilité des flammes, sujet déjà étudié par d'autres et cherche à reproduire les gaz ionisés d'une flamme dans une enceinte fermée, comme dans l'expérience d'Elster et Geitel en 1882 (22). Dans celle-ci, le gaz à très faible pression était ionisé par chauffage du filament suivant un processus que les deux chercheurs ne pouvaient connaître (xs2).

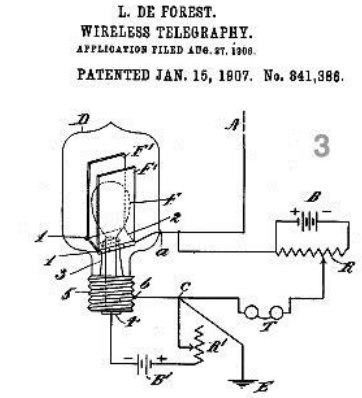


xs Expériences Elster-Geitel

Ions négatifs ou électrons Il est à remarquer que cet appareil de recherche des deux allemands, avec une plaque anodique, précède la lampe d'essai d'Edison en 1883, comme la diode de Fleming (V-4). La différence, notable, est que cette ampoule contient du gaz à faible pression, ionisé par les électrons émis par le filament très chaud, alors que l'ampoule Edison-Fleming est pratiquement vide et les électrons émis par le filament s'y propagent librement ; l'audion était ainsi plus proche d'un tube de Geissler (III-3) que de la diode. Tout le problème de l'audion est que de Forest raisonnait dans un gaz ionisé qu'il pensait, avec les connaissances de l'époque, être composé d'ions négatifs et d'ions positifs (d'où l'appellation audion) comme un liquide électrolytique depuis Faraday. Il ignorait comme ses contemporains la structure de l'atome et le rôle qu'y jouait l'électron, charge unitaire découverte récemment. En fait, ce qu'il dénommait des ions négatifs étaient des électrons ; il constate d'ailleurs cette différence sans l'expliquer quand il calcule leur vitesse. À 1000°, celle des ions négatifs par rapport aux positifs serait dans le rapport 26 /7. À 2000°C, il serait quarante fois plus fort, et leur vitesse atteindrait 1000 cm/s quand le gradient de potentiel est de 1 volt par cm. Il ignore que les ions positifs sont bien moins rapides parce que beaucoup plus lourds que les électrons, plus d'un millier de fois.

Après sa découverte de l'électron en 1897 (V-4), J.Thomson imaginait en 1904 un premier modèle atomique, le plum-pudding, dans lequel les électrons étaient dispersés dans une masse constituant l'atome. Plus tard, Rutherford proposera en 1911 un modèle de structure atomique avec les électrons dispersés, mais autour d'un noyau, ensuite Bohr en 1913 avec les électrons sur des orbites d'énergies quantifiées.

Ensuite de Forest examinera le comportement d'une ampoule avec une anode en forme de U, au milieu duquel se développe un filament en boucle, apparemment semblable à la diode, si ce n'est qu'elle contient du gaz à très faible pression.(xt-3) Le circuit antenne-terre où se développe le courant HF induit par les ondes à détecter, passe par l'anode, donnant une détection semblable à celle de la diode.



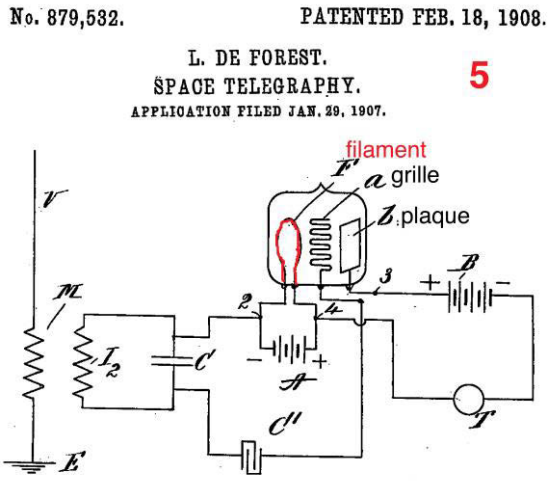
xt Essais Audion 1906

Alors, pensant renforcer l'effet des courants HF à détecter, il va séparer complètement le circuit d'antenne en le bobinant avec quelques tours de fil autour de l'ampoule. (xt-4) Le résultat est meilleur.

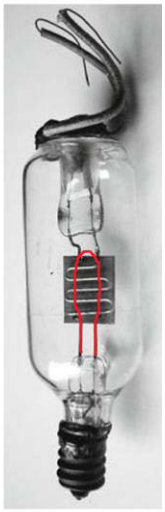
Après encore des mois d'essais, il a l'intuition que la détection serait plus efficace et pratique en remplaçant le bobinage extérieur à la lampe par un mini-bobinage à l'intérieur, placé au cœur de la lampe au milieu du gaz ionisé, entre le filament et l'anode, une simple plaque ou wind (aile) (xu-5). C'est au début un petit serpentin pour ne pas gêner le déplacement des ions négatifs (électrons) qui véhiculent le courant redressé entre le filament et la plaque anodique uniquement les demi-ondes négatives, entre filament et anode. Par la suite ce sera une grille.

Ces deux graphiques 4 et 5 résument le cœur de l'invention.

Il faut reconnaître que le raisonnement de Forest est expérimentalement très logique, il cherche à reproduire l'action des ondes sur un gaz ionisé, reproduisant ce qu'il avait constaté dans une flamme de gaz. Personne ne réalise alors que cette troisième électrode, issue d'un raisonnement justifié par une démarche scientifique a été une idée vraiment géniale, sauf quand on découvrira cinq ans plus tard ses autres potentialités exceptionnelles.

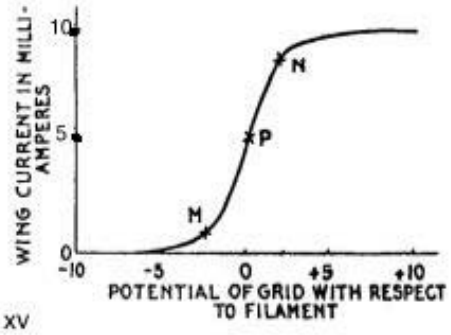


xu Brevet Audion 1907



Insatisfait, il reconnaît modestement: « *Je ne suis pas encore arrivé à une théorie complètement satisfaisante quant aux raisons exactes pour lesquelles les oscillations HF affectent si fortement le comportement d'un gaz ionisé.* »

Les connaissances théoriques de 1906 ne lui permettaient pas de comprendre le comportement des électrons dans sa lampe. Encore une fois en ce siècle, les praticiens inventaient des applications que théorie tardait à expliquer.



XV

L'audion remplissait déjà mieux sa fonction de détecteur que ses prédécesseurs, car il permet d'amplifier le courant anodique (wiring current), en ajustant la tension de l'anode et celle de la grille. Il se comporte comme un détecteur, par redressement du courant, mais en plus comme un relais amplificateur (xv), fonction qui deviendra la base de toute l'électronique future.

Apparemment, cet audion ressemble à une diode à laquelle on aurait ajouté une électrode magique, la grille. Ce qui permit aux juristes de Marconi de l'accuser de contrefaire la diode de Fleming dont il détenait le brevet, mais ne l'utilisait même pas, vu son faible intérêt.

On reste stupéfait que la triode, qui va résulter de ces modestes recherches issues de l'observation d'une flamme de bec de gaz, aura un impact imprévisible sur l'évolution de la radio, et fera rentrer l'électricité dans l'ère de l'électronique, par la circulation de l'électron dans le vide.

Intermède

Pendant cinq années, la nouvelle De Forest Radio Telephone Co. va fabriquer et vendre des équipements TSF et même plus de téléphone sans fil, avec l'arc chantant dans l'émetteur et son audion comme récepteur. En effet, en plus des usages professionnels, la TSF a fait naître une catégorie particulière d'utilisateurs, les amateurs, les *hams* (jambons). Ils bricolent eux-mêmes leurs récepteurs et les plus avertis des émetteurs. Les congrès de normalisation leur avait réservé les ondes courtes de fréquence supérieure à 200 kHz, considérées à cette époque sans grand intérêt.

L'audion avait souvent des défauts de fabrication, certains marchaient bien, d'autres manifestaient après un certain temps des lueurs rouges ou bleues et un fonctionnement aléatoire. Il semble que cela provenait d'une pression de gaz raréfié trop variable ou d'absorption du gaz par les pièces métalliques. Le filament fondait après quelques dizaines d'heures.

De Forest n'était pas seul sur ce domaine de la radiophonie, si son audion était plus sensible que les autres détecteurs pour le récepteur, tout le monde n'avait comme émetteur que l'arc chantant avec diverses améliorations. On essayait en vain de se passer de l'alternateur, au moins pour de petites distances.

xw Station à arc de Forest pour la marine

Avec son assistant Frank Butler, Il réussit cependant à vendre à l'US Navy en 1908, l'équipement de 26 navires partant en croisière autour du monde avec un émetteur - récepteur de phonie sans fil portant à 5 miles. (xw) Le fonctionnement fut plutôt hasardeux et les appareils démontés au retour.

Parmi d'autres tentatives, l'une est restée célèbre, la retransmission en 1910 de Cavalleria Rusticana et de la voix du célèbre Caruso depuis le grand Opéra de New York (15). Ce fut un échec à la première séance. Ce n'était pas avec l'arc, même chantant, que l'on pourrait émettre correctement les ondes entretenues nécessaires à la phonie, paroles et musique. Fessenden l'avait bien démontré, seuls les alternateurs HF résolvaient le problème, … à moins qu'un hasard improbable surgisse.

En 1911 la société de Forest Co. entrait en liquidation judiciaire, il échappe de peu à la prison ; le procureur établissait que « les seuls actifs sont les brevets déposés par de Forest sur un étrange appareil ressemblant à une lampe à incandescence dénommée audion, qui n'était même pas une bonne lampe ». Il lui reproche de tromper le public en affirmant qu'il serait possible de transmettre la voix humaine à travers l'Atlantique avec ses inventions. La cour lui demande de renoncer au titre d'inventeur.

Assez désespéré il part en Californie où il va travailler dans un autre domaine, la sonorisation du film de cinéma.

Deuxième phase –Potentialités inconnues de l'audion

Ces cinq années s'étaient écoulées sans que personne n'ait tenté de copier ou perfectionner l'audion, ce qui était rare dans un domaine en évolution rapide.

Et subitement, en moins de deux ans, 1912/13, six scientifiques et ingénieurs, dont de Forest, découvrent presque simultanément que cet audion peut faire beaucoup plus que de la détection, mais une forte amplification des signaux captés, innovation fondamentale. Cette application allait induire par surcroît la possibilité de générer des oscillations à haute fréquence, capables d'émettre ces ondes entretenues, indispensables pour l'émission de la radiophonie.

Autant l'invention de l'audion en 1907 n'avait été qu'un petit événement sans grande conséquence, autant la découverte de ses propriétés inattendues allait bouleverser la radio. Les électriciens, déjà passés difficilement du courant continu au courant alternatif BF pour transporter

l'énergie, découvraient avec étonnement le comportement de ces courants à haute fréquence, capables de générer des ondes pour transporter l'information, sans fil.

Comme souvent, un précurseur découvre un effet inattendu, sans se rendre compte de l'importance de sa découverte. Fin 1911, l'Américain Fritz Lowenstein travaillait sur un système de radioguidage pour un laboratoire du Massachusetts ; il utilisait un audion et s'aperçoit que cette lampe à gaz ionisé pouvait aussi amplifier et même entrer par hasard en oscillation à haute fréquence. Il n'en voit pas l'intérêt pour son application, ni ne prend de brevet. Alexanderson, l'homme de l'alternateur HF, en informe son collègue Irving Langmuir de Général Electric, lequel redécouvrira deux ans plus tard ces nouvelles propriétés.

B. Thompson, président de Federal Telegraph Co, venait d'embaucher de Forest et apprend peu après les essais sans suite de Lowenstein. Il donne à de Forest deux assistants pour approfondir ce problème.

On retrouve dans son Note Book :

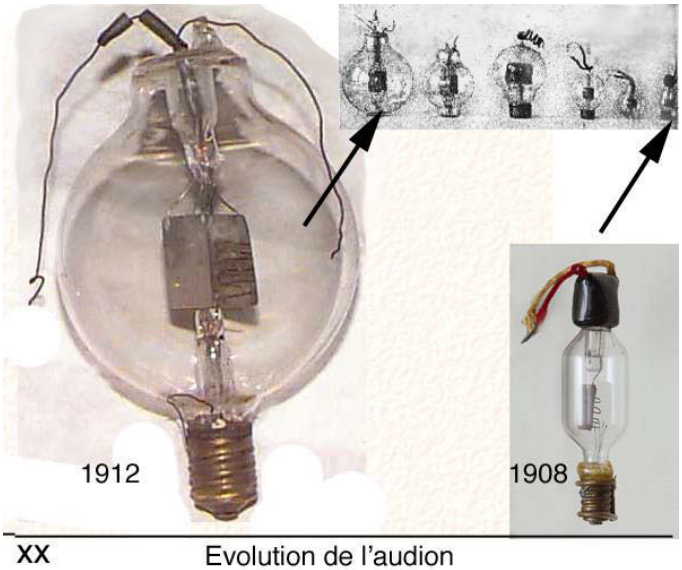
- 22 juillet - Il dispose en cascade, en série, deux audions et il obtient une très bonne amplification en connectant la sortie du premier à l'entrée du second dont la sortie est ainsi amplifiée. Cet amplificateur à 3 étages, testé par la Marine, donne un gain de 120.

- 6 août - Essai de connecter la sortie d'un seul audion sur sa propre entrée donnant la même amplification. Il vient de découvrir une nouvelle propriété importante de son audion, la régénération par rétroaction ou **amplification feed-back**. Mais il ne déposera un nouveau brevet qu'en 10/1914, considérant à tort qu'une autre propriété de son audion déjà breveté ne le nécessitait pas. Armstrong déposera avant lui un brevet sur cette propriété.

Mais en augmentant l'amplification, de Forest provoquait des hurlements sonores (howling), phénomène déjà connu des ingénieurs du téléphone, caractéristique de la production d'oscillations entretenues, aujourd'hui familières aux ingénieurs du son, l'effet Larsen quand elles sont à fréquence sonore.

Il est peu probable qu'il ait compris que ces oscillations à basse fréquence audible provenaient d'auto-oscillations HF qui se déclenchaient dans l'audion à réaction dans certaines conditions. En effet il cherchait plutôt à les supprimer comme un inconvénient, alors que d'autres réaliseront que ces oscillations HF spontanées pourraient peut-être concurrencer celles obtenues avec les lourds alternateurs HF. Ils découvriront alors que cette troisième propriété imprévisible de l'audion allait révolutionner la génération des ondes radio.

En octobre 1912, il emmène son appareil à New York pour le montrer à son ami John Stone Stone, ingénieur indépendant, mais qui avait des liaisons avec la puissante compagnie AT&T, American Telegraph & Telephone, (xx). Celui-ci est étonné de l'amplification, mais aussi du fort bruit indésirable. Il présente l'audion aux ingénieurs de AT&T qui, impressionnés après des essais à Palo Alto, en font part aux gestionnaires.



XX Evolution de l'audion

Ceux-ci achètent en 1913 pour $100 000 les droits d'utilisation pour le télégraphe et le téléphone transcontinental, à fil ; on avait en effet grand besoin d'un amplificateur pour le téléphone à longue distance. L'audion sera

amélioré, en particulier Harold Arnold y fera un vide complet, ce qui permettra à AT &T d'inaugurer la première ligne téléphonique directe de New York à la Californie en 1915 grâce à l'audion amplificateur.

En 1917, elle achètera € 250 000 tous les autres droits pour le sans-fil.

De Forest gardait cependant la possibilité de vendre l'audion intégré dans des ensembles émetteurs et récepteurs fabriqués par sa petite société. Il reprend le système hétérodyne inventé par Fessenden et l'adapte à l'audion, ce sera l'ultra-audion pour les émetteurs.

En septembre 1912, un autre chercheur découvre lui aussi les propriétés inconnues de l'audion et arrive à les comprendre. Résumons le parcours qui a conduit Edwin Howard Armstrong à cette découverte, d'après la récente étude du professeur coréen Sungook Hong (18).

Armstrong était étudiant à l'Université de Columbia et comme d'autres bricolait des récepteurs utilisant les cristaux comme détecteurs, bien moins chers que l'audion. L'habitude était de placer un condensateur en série dans le circuit de l'écouteur téléphonique. Un jour, il essaie de l'installer aussi dans le circuit d'un audion et là il obtient une forte augmentation du signal dans l'écouteur.

Ce n'était pas possible qu'un condensateur aussi faible puisse accroître à ce point une fréquence audible de l'ordre de quelques kHz. Il pense qu'une oscillation à haute fréquence doit être induite dans le circuit plaque de l'audion en raison de la capacité plaque/grille.

Pour modifier une éventuelle résonance il introduit une inductance dans le circuit plaque et en la rapprochant plus ou moins d'une autre dans le circuit grille constate en la déplaçant l'annulation du signal ou bien un sifflement, semblable à celui perçu par de Forest.

Il pense qu'une oscillation HF se crée et réussit à le vérifier grâce à l'oscilloscope de l'université, appareil encore très rare à l'époque utilisant le tube cathodique de Braun.

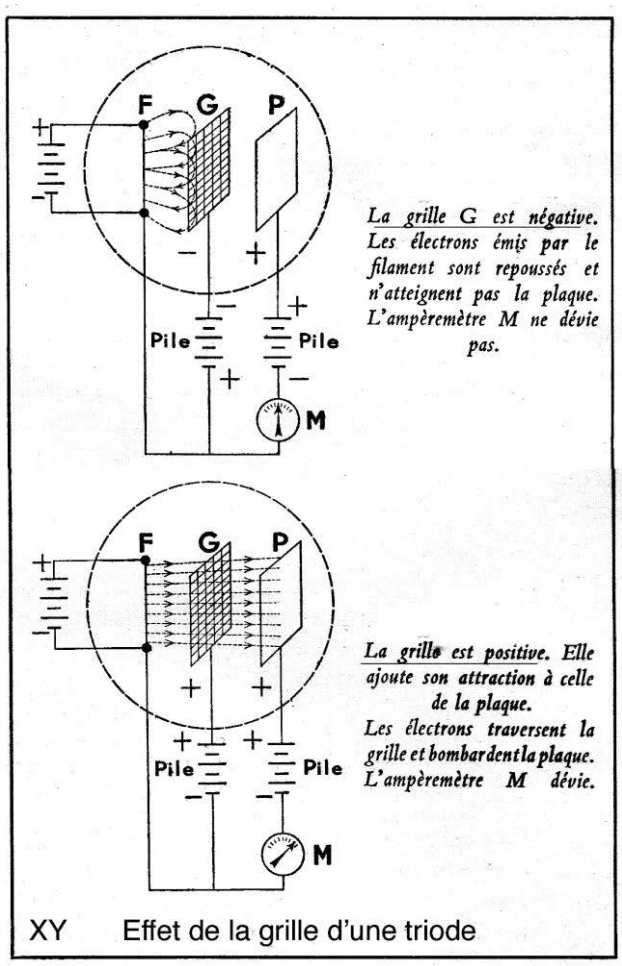
Finalement, avec la nouvelle théorie de l'atome de Bohr en 1913, qui explique le phénomène d'ionisation, et avec l'oscilloscope, Armstrong peut comprendre le fonctionnement de l'audion resté mystérieux pour de Forest. Il prendra un brevet sur l'audion-triode en octobre 1913, uniquement comme amplificateur par régénération, pas comme générateur d'oscillation, propriété qui se révèlera la plus importante.

Avec un récepteur amplificateur, Armstrong réussit à capter à New York un message échangé entre San Francisco et Honolulu ; de même un message d'Irlande qui imposait à Marconi d'imposantes antennes. Début 1913, il fait une démonstration grand public à l'Université Columbia à laquelle assistaient en particulier des responsables de la Compagnie Marconi et d'AT&T. Cette puissante société ne sollicita même pas l'achat du brevet d'Armstrong, qui l'aurait cédé à un prix modique, peut être $10 000.

Après l'accord de son brevet US 1113149 le 6/10/14 il publie dans l'Electrical World de 12/1914, un article détaillant le fonctionnement de l'audion, détecteur et amplificateur par régénération, avec l'aide d'oscillographes. Il ne décrit pas la fonction générateur d'oscillations HF, la considérant comme indépendante de la régénération, alors que c'est une conséquence physique. Ce sera l'un des points de controverse dans la bataille de brevets qui suivra. L'année suivante, Armstrong fait une conférence appréciée à l'Institute of radio Engineers, IRE. (18)

Au cours de cette année 1913, d'autres chercheurs s'ajoutent sur la liste des découvreurs de la possibilité de l'audion d'amplifier par rétroaction, ou régénération, et surtout cette propriété pouvant provoquer l'amorçage en auto-oscillation, et générer ainsi ces oscillations HF entretenues, indispensables pour la phonie.

L'un d'eux n'était pas américain mais autrichien. Alexander Meissner de Telefunken prit aussi un brevet US et aurait effectué avec un audion une transmission phonique à 32 km en mars 1913.



XY Effet de la grille d'une triode

S'y ajoutait Irving Langmuir de Général Electric, physicien spécialiste de l'ionisation des gaz raréfiés depuis la nouvelle théorie atomique de Bohr en 1913. Il expliquera pourquoi l'audion marchait mieux si l'on y fait le vide, mais différemment, car il n'y a plus le gaz ionisé avec des ions positifs et des ions négatifs, base du raisonnement de Forest, uniquement des électrons.

La triode sous vide avait des avantages sur l'audion, elle pouvait faire de l'amplification linéaire avec la polarisation de grille, ainsi que fonctionner à des fréquences plus élevées ; sa fiabilité était bien supérieure. Langmuir la breveta sous le nom de pliotron

De Forest n'était pas le premier à avoir fait l'invention majeure d'un appareil qui fonctionnait pour une utilisation précise, en s'appuyant sur des résultats expérimentaux exacts, mais sur une théorie inexacte à son époque. Un siècle auparavant Volta n'avait-il pas découvert le premier courant électrique permanent débité par sa pile, fonctionnant avec un principe très différent de celui qu'il croyait appliquer ? (I-2)

L'audion ne fonctionnant plus avec les ions, que de Forest avait intégré même dans son nom, il devint un tube à vide à trois électrodes, la triode, munie néanmoins de quatre contacts de sortie puisque le filament en nécessite deux. Seul de Forest conserva un temps le terme audion qu'il modernisa en oscillion pour le modèle générateur d'oscillations HF des émetteurs.

Son fonctionnement, simple en statique, est expliqué par le schéma (xy). Mais en dynamique, à très haute fréquence, c'est plus compliqué. Armstrong l'avait probablement compris, cependant il revient au physicien néerlandais, Balthasar Van der Pol d'avoir défini en 1928 l'équation de l'oscillateur pour modéliser la génération des oscillations HF entretenues.

On rapporte aussi qu'un Anglais, J. Round de l'équipe Marconi, fit fonctionner aussi en 1913 l'audion en amplificateur et en générateur d'oscillation, mais ne prit pas de brevet US.

Comme c'était à prévoir, une longue bataille juridique sur les brevets se déclenchera, après WW1 de 1920 à 1934, compliquée par les brevets que prendra Armstrong sur de nouveaux perfectionnements.

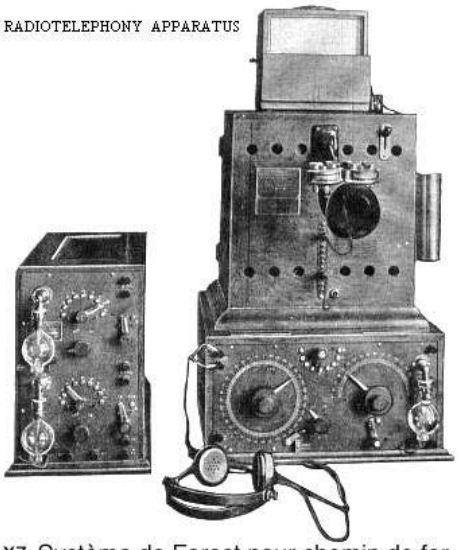
Premières applications de l'audion devenu triode.

En 1913, la TSF qui allait se muter progressivement en radiophonie, une autre technique pour un autre usage, était en service dans 330 stations en Europe, dont 35 en France, et 178 en Amérique. Beaucoup de monde s'intéressait donc à la fabrication de l'audion, breveté uniquement aux USA.

Déclencheur de cette révolution l'audion avait encore bien des défauts, limitant sa durée de vie. La principale amélioration fut le vide complet dans l'ampoule, suggérée par Langmuir et constatée aussi par d'autres. Les filaments furent modifiés pour augmenter la génération d'électrons, tout en diminuant la température et la consommation excessive. De Forest améliora rapidement son audion qui devint oscillion, alors que le terme triode se généralisait. Il vendait alors les premiers postes à lampe de téléphonie sans fil (radio) soit émetteur-récepteur, soit récepteurs seuls

Aux Etats-unis, pas encore en guerre, les années 1914 à 1917 furent grâce à la triode le décollage technique, social et commercial de la radio, embryon de celle que nous connaissons.

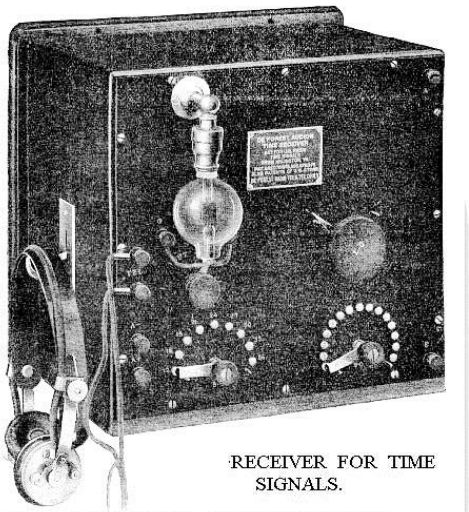
Radiotéléphonie à moyenne distance



xz Système de Forest pour chemin de fer

Naturellement dans ce mouvement, l'une des premières réalisations de la De Forest Radio & Telegraph Co en 1914 concernait la sécurité des chemins de fer, l'établissement d'une communication phonique, sans fil, d'un train avec les gares proches. Grave problème pour les compagnies.

L'Electrical World du 30/5/1914 rapporte que dans le Delaware, suite à la paralysie pendant 9 jours du trafic en raison du blizzard sur les fils télégraphiques, une station radio fut installée à la gare de Scranton et l'autre sur le train rapide roulant à 60 miles/h. À Scranton, l'antenne haute de 150 pieds avait 300 pieds de longueur, l'appareil était alimenté avec 1 kW en 125 V cc. Sur le train, elle s'étendait sur la longueur de 4 voitures. Une petite turbine à vapeur entraînait le générateur dans le wagon des bagages. En raison du bruit, un amplificateur à 2 étages d'audion facilitait l'écoute avec un gain de 50, car l'émetteur était aussi mis à disposition des voyageurs (xz). La communication était claire de Scranton à Binghamton, distants de 67 miles, dans cette région de forêt et de montagnes. La compagnie Lackawanna généralisa le procédé sur ses rapides.



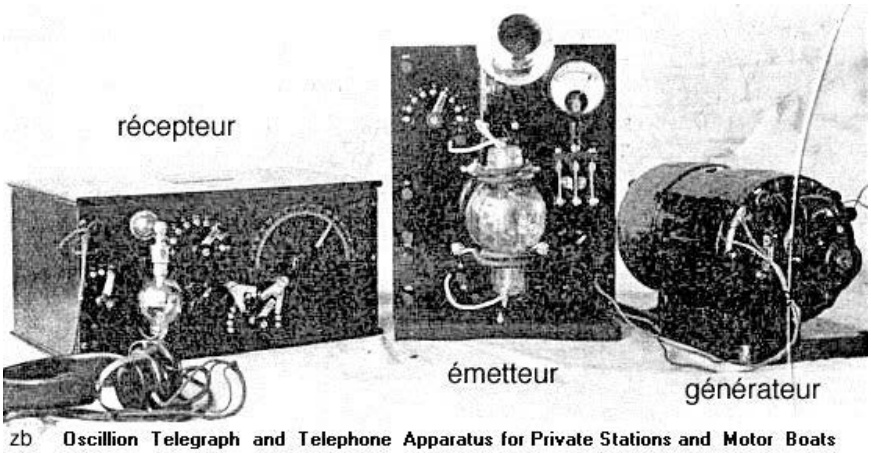
za Recepteurs signaux horaires

La station navale d'Arlington diffusait des signaux horaires pour les navires. La Cie De Forest créa un petit récepteur préréglé pour les recevoir à bord des navires (za).

De même en 1916 de Forest mettait sur le marché un émetteur - récepteur, l'Oscillion à la fois télégraphique et phonique pour les petites stations, par exemple les bateaux à moteur (zb). On remarque que la lampe d'émission est plus grosse que celle de réception. Sa portée était de 20 miles

Avec ces nouveaux matériels de radiophonie apparurent les nouvelles applications de la radio qui nous sont familières, dépassant l'objectif initial des pionniers, remplacer le téléphone par fil par le wireless. Si le fil permettait des échanges entre deux personnes avec toute la confidentialité souhaitable, par contre avec le sans fil, c'était le *broadcast,* la diffusion simultanée à des milliers de personnes équipées seulemen d'un récepteur, qu'il suffisait de régler sur la longueur d'onde souhaitée.

De Forest avait installé une première station expérimentale dans le quartier de Highbridge, avec l'indicatif 2XG, qui diffusa en association avec la Cie britannique Graphophone une première séance de concert le soir du 26/10/1916 à l'hôtel Astoria.



zb Oscillion Telegraph and Telephone Apparatus for Private Stations and Motor Boats

De nombreux invités de marque écoutèrent dans les salons ou sur des écouteurs

individuels 33 disques de Columbia. Tous les amateurs jusqu'à 150 miles profitèrent de ce premier concert radiodiffusé, qui effaça l'échec de la retransmission de Caruso à l'Opéra en 1910.

Ces amateurs avaient des récepteurs à galène ou équipé d'un audion T économique à $ 5,50, fabriqué à leur intention (zc). Pour l'émission, il fallait un oscillion.

Announcing the DeForest Tubular Audion Bulb

"There is only one Audion the De Forest"

The New Type T Tubular Audion Bulb gives very loud signals from powerful stations. It has a flat cylindrical plate, a spiral grid and only one filament of tungsten. As this is a long straight-line filament, it has a long life. Microphonic effects are completely eliminated. The plate is in contact with the heavy glass tube, preventing overheating.

Sold Separately, $5.50 each

The special adapter for this type to the screw base receptacles of De Forest apparatus, and is furnished at 10 centavos.

Send stamp for Bulletins D16 and B16

The Wireless Mfg. Co.
Canton, Ohio

Always Mention "Q S T" When Writing to Advertisers

zc QST magazine october 1916

La semaine suivante le New York Sun annonçait une série de concerts diffusés par la station 2XG sur la longueur d'onde de 800 m, audibles à 200 miles.

Puis ce fut un service des nouvelles, nos informations, tous les soirs de 7h30 à 8 h.

Le 7 novembre, jour de l'élection présidentielle de Wilson contre Hugues, 7000 amateurs envoyèrent les résultats partiels, depuis tout le pays, à une salle de rédaction retransmise par 2XG jusqu'au soir.

Début 1917 le magazine de radio TVQ donnait le programme des émissions nocturnes. Mais elles étaient perturbées par des farceurs qui s'introduisaient dans l'émission, émettant sur la même longueur d'onde.

La station 2XG avait quelques concurrents, mais de moindre importance. Quant à Marconi, leader pendant une décennie pour la TSF, ce ne fut qu'un suiveur peu actif pour la radiophonie.

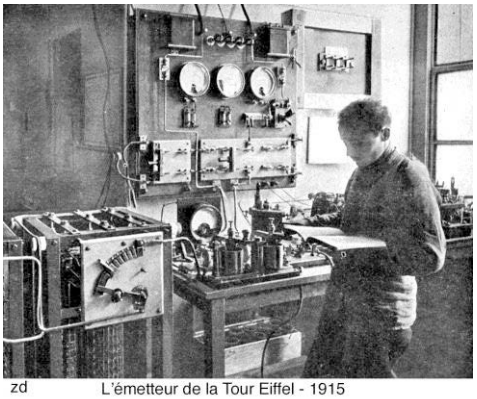
Téléphonie intercontinentale

La puissante AT &T Co.avait considéré en 1906 que le système bien au point que lui présentait Fessenden à Plymouth ne correspondait pas à ses besoins de téléphonie commerciale, principalement pour des raisons de discrétion. On ne communiquait pas d'une personne avec une autre, mais avec des dizaines ou plus d'indiscrets qui pouvaient s'accorder sur la longueur d'onde. L'éther était à tout le monde, pas comme un câble strictement privé.

Elle a cependant acheté les brevets de l'audion à de Forest, mais au début comme amplificateur pour établir une liaison filaire transcontinentale de New York à San Francisco. Harold Arnold, manager scientifique, l'avait fait perfectionné et, réalisant les autres performances de la triode, l'ingénieur en chef J.J. Carty organisa une démonstration pour l'inauguration.

L'*Electrical Experimenter* de novembre 1915 relate comment sa filiale Western Electric équipa d'un émetteur à triodes très puissant la station ANA de l'US Navy à Arlington en Virginie. Le chiffre étonnant de 550 tubes à vide est cité, mais la technique de cet émetteur était gardée secrète pour raison de brevets. Le 29 septembre, une première liaison est établie entre la base maritime d'Arlington, dirigée par le Capitaine Bullard et celle de Mare Island à San Francisco, à 2500 miles

Quelques heures après, la liaison est établie avec la base d'Honolulu à Hawaii, à 4600 miles. À Arlington, le récepteur était directement connecté au réseau filaire, ainsi la communication était établie depuis le bureau du président M. Vail d'AT&T à New York.


zd L'émetteur de la Tour Eiffel - 1915

Seul Arlington était équipé de l'émetteur très puissant, les deux autres stations simplement d'un récepteur. Elles répondaient en utilisant les liaisons par câble.

L'exploit fut renouvelé un mois plus tard avec Paris, à 4020 miles, mais c'était la guerre et l'installation vitale de la tour Eiffel ne fut prêtée qu'un quart d'heure pour cette

expérience magistrale, par la Télégraphie Militaire dirigée par le colonel Ferrié. (zd)

Bilan partiel avant WW1

On peut imaginer la satisfaction des deux hommes à la base de ce nouveau vecteur d'information, la radiophonie, transmettre le son au loin, sans fil :

– **Reginald Fessenden**, qui avait ouvert la voie avec un moyen lourd et coûteux réservé aux stations puissantes, l'alternateur HF.

– **Lee de Forest,** dont l'audion assez banal, imaginé en observant la flamme d'une lampe à gaz, évoluera vers la triode, l'outil de base de tous les développements à venir, radio, télévision, électronique, au cours de la première moitié du XX$_{e}$ siècle.

Pendant 10 ans, l'alternateur HF restera néanmoins le générateur des stations d'émission à grande distance, progressivement remplacé après 1925 par la montée en puissance de la triode et de ses descendants, pentodes etc.

Les Européens, Angleterre, France, Allemagne avaient « marqué l'essai » avec l'invention de la TSF, l'Amérique a été au but avec celle de la radiophonie.

Ne participant pas aux premières années de guerre, 1914 à 1917, l'Amérique engagea seule les premiers développements de ce nouveau vecteur d'information.

La vedette du début de la TSF, Marconi, engrangeait des revenus avec la Marine, peut être ralentis après le Titanic et la fin du monopole, mais ne suivit que lentement l'évolution vers la radiophonie et se fit volontiers absorber par RCA en 1919.

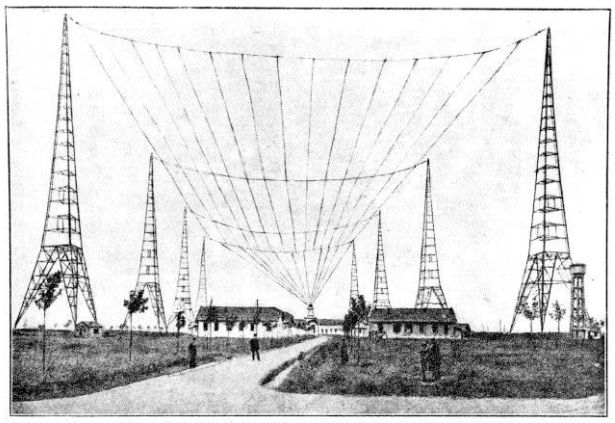
Le 6 avril 1917, l'Amérique rentre dans la guerre ; tout le charivari des centaines de stations émettant en désordre cessa net. Il était interdit à quiconque d'émettre à titre privé de peur d'espionnage. Seuls occupaient l'éther la Navy, l'armée et le gouvernement.

TSF et Radio pendant WW1, 1914-1918 (19)

Dans toute guerres la circulation de l'information aussi rapide et secrète que possible a été une arme essentielle. En plus d'une artillerie devenue très efficace, cette première guerre moderne avait une nouvelle arme de destruction redoutable, la mitrailleuse, qui contraignit les troupes à une guerre relativement statique, en s'enterrant dans des tranchées et à adopter des moyens de communication appropriés. Décrivons l'histoire de la radio du côté français qui nous est mieux connu, mais elle fut semblable du côté allemand.

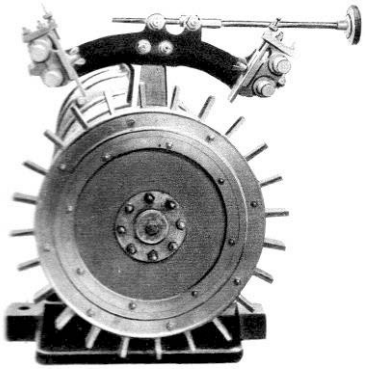
La radio ne fut pas très utilisée, trop indiscrète, surtout le télégraphe facile à crypter et le téléphone à fil, bien au point, qui n'existait pas à la précédente guerre de 1870. Le Service Télégraphique des Armées était bien équipé avec ce moyen, assurant une confidentialité pratiquement parfaite.

Dès les premiers mois fut décidée la création à Lyon, à l'arrière du front, d'une grande station identique à celle de la Tour Eiffel. Le souvenir de l'encerclement de Paris à la guerre de 1870 était ancré dans les mémoires. L'ingénieur Paul Pichon dirigea la construction de Lyon-La Doua en 3 mois. On détourna tout le matériel qui allait partir pour la station prévue l'année précédente à Saïgon comprenant un gros alternateur HF de 300 kW à étincelles en fréquences musicales et les huit pylônes d'antennes de 120 m pour grande longueur d'ondes. Une nappe identique était enterrée dessous. (ze)



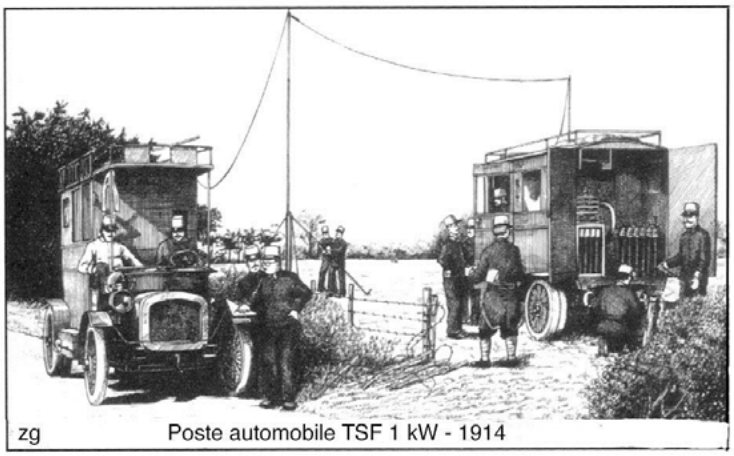
ze Antennes de Lyon - La Doua - 1914

Durant la guerre, une cinquantaine de stations fixes de moyenne puissance furent commandées par la Télégraphie Militaire à la SFR. Elles étaient équipées avec un alternateur de 5 à 10 kW donnant du 1000 Hz et portant en bout d'arbre un éclateur tournant, avec les circuits oscillants correspondants (zf) En 1917/18 ces émetteurs furent remplacés par des alternateurs HF de 10 kW à 32 kHz pour les ondes entretenues de la radiophonie. Ils complétaient les émetteurs de petite puissance, réalisables avec la triode TM à oscillations.



zf Alternateur 5 kW à éclateur tournant

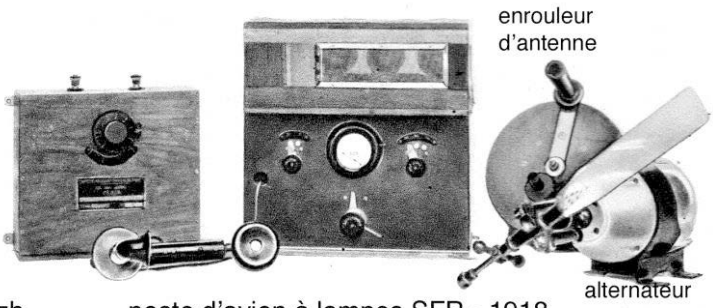
L'armée, déjà équipée d'une dizaine de postes hippo ou automobiles terrestres, commanda environ 150 postes équipés de matériels marine de 0,5 à 2 kW avec chacun son groupe électrogène (zg).



zg Poste automobile TSF 1 kW - 1914

L'aéronautique naissante commençait à disposer d'aéroplanes, de dirigeables et ballons captifs pour des opérations d'observation, en particulier aider aux réglages des tirs d'artillerie. SFR livra en 1914/15 1200 postes émetteurs alimentés par des vibrateurs à fréquence musicale PP4. L'alimentation en continu des accus était ainsi transformée en alternatif à MF pour l'émission en signaux Morse codés, reçu par le poste d'artillerie avec un récepteur à galène. L'antenne était un fil de 100 m qui traînait à l'arrière de l'avion et que l'on enroulait sur une bobine à l'arrêt. L'observateur en avion n'avait pas de poste récepteur, inaudible avec le bruit. Il recevait des informations du sol où l'on étendait seulement des draps blancs d'une certaine façon.

Après 1916, L'émetteur-récepteur de bord avec lampes TM était alimenté par un petit alternateur léger de 150 à 500 W, entraîné en vol par une petite hélice. (zh)



zh poste d'avion à lampes SFR - 1918

L'Allemagne construisait depuis le siècle précédent des dirigeables à armature rigide gonflés à l'hydrogène, les zeppelins, du nom de leur constructeur. Capables de transporter des charges lourdes, un modèle spécifique fut créé, le premier bombardier.

Les télégraphistes alliés avaient repéré leur fréquence de communication et trouvé leur code de cryptage. Aussi, le jour de 1917 où une escadre de 7 appareils sont partis pour bombarder Londres, ils leur lancèrent un faux message de rassemblement à un certain point où ils furent détruits. (zj)

zj Zeppelin allemand abattu - 1917

ZK Appareils TSF et TPS des troupes allemandes

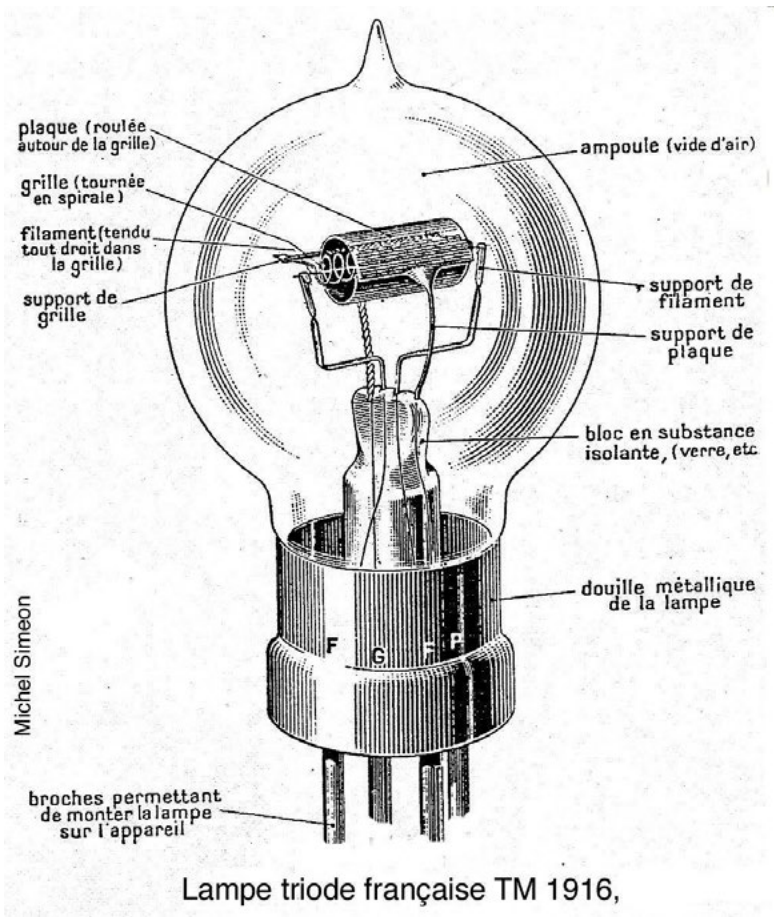
Les communications sans fil locales, quelques km, étaient assurées généralement par des récepteurs de petite puissance, portables à galène. Pratiques et autonomes, ils avaient une grande sensibilité, mais une mauvaise sélectivité et faible puissance d'écoute qu'il fallait amplifier.

Un autre système, la télégraphie par le sol, TPS, fut développé car dans cette guerre, les liaisons téléphoniques filaires entre les tranchées et quelques km à l'arrière étaient souvent coupées par les bombardements d'artillerie. Le TPS utilisait le sol comme conducteur, mais avec divers inconvénients, dont l'écoute de l'ennemi proche qui le limitait à un système de secours aléatoire. Il nécessitait aussi une amplification (zk) (20) mais aucun système d'amplification n'existait encore. Seul l'audion Américain devenu la triode dans sa récente version, était la première lampe amplificatrice.

La lampe TM

En 1913, le dynamique colonel Ferrié qui dirigeait le service TM de Télégraphie militaire s'était rendu en Amérique, avait rencontré de Forest et découvert l'audion. En août 14, il rassembla alors son équipe d'une trentaine d'ingénieurs et scientifiques sur un projet : fabriquer une lampe triode qui paraissait être l'avenir de la radio. Pichon procura à Ferrié des audions qu'il avait pu rapporter d'Amérique en 1913, alors qu'il travaillait pour Telefunken. Ils furent soigneusement analysés pour remédier à leurs défauts de conception et de fabrication, dont la fragilité aux chocs.

Parmi les participants de l'équipe, il y avait le professeur Henri Abraham, haute compétence en physique, le capitaine François Péri, actif mais dont le caractère peu conciliant provoqua des problèmes et François Grammont directeur de la société éponyme qui assura les premières fabrications. Sa filiale Fotos fabriquait déjà des lampes d'éclairage. Dès le départ, ce n'était plus une audion à gaz raréfié, mais sous vide. Les électrodes n'étaient plus planes mais cylindriques, concentriques avec le filament. Après plusieurs prototypes, un premier modèle d'Abraham fut fabriqué en février 1915, et en novembre un modèle de Piéri (zl). Il y eut conflit sur les brevets.



Lampe triode française TM 1916,

Les fabrications furent réparties entre Fotos et la Cie générale des lampes filiale de la Cie générale d'Électricité ; 100 000 lampes sont produites en 1916, 4 fois plus en 1918.

Caractéristiques de la TM :
Filament : 0,7 A sous 4 V cc
Amplification : coef 10 - pente 0,4 ma/V
Tension grille 40 V
Durée de vie : 100 h environ

ZM Amplificateur 3 ter -1916

Elles furent l'élément de base la fabrication de 14 000 amplificateurs BF, basse fréquence (zm), puis HF. À partir de 1917, un modèle un peu différent, la TMB était construit comme générateur d'oscillation pour les ondes entretenues, pour la phonie. Plusieurs modèles d'émetteurs seront construits avec cette TMB (zn)

À la fin de la guerre, l'équipement radiotélégraphique français avait rattrapé, grâce à la TM, son retard sur les américains, qui l'ont d'ailleurs utilisé lorsqu'ils sont arrivé en 1917. Les Allemands avaient un niveau presque équivalent, leur triode fabriquée par AEG était moins fiable (zo).

Développement de la radio après WW1

Les années 1920 apportèrent la mise en place du système radio, dont le rythme de croisière s'amplifia encore après 1930, malgré la crise.

Sur le plan **technique**, presque tout était découvert et inventé, restaient de multiples perfectionnements technologiques et d'évolutions, comme après chaque grande invention.

Sur le plan **industriel** et commercial ce fut le démarrage d'une nouvelle industrie et d'un nouveau métier, après celui de télégraphiste des années 1860 il y eut celui d'électricien en 1880, et là s'ouvrait celui d'électronicien après 1925.

Sur le plan **social** c'était un vrai bouleversement que ce nouveau vecteur d'information collective apportait. Par comparaison, à leur apparition :

zo triode AEG K10 - 1918

- Le télégraphe avec ou sans fil n'était qu'un moyen plus rapide d'échanges écrits que la poste entre deux correspondants.

- Le téléphone à fil y ajoutait l'avantage d'une presque présence par la voix.

- Le téléphone sans fil apportait au précédent un grand avantage pratique, si l'on pouvait garantir la confidentialité.

- La radio permettait, elle, à une seule personne de s'adresser à une infinité de correspondants lointains. De plus, elle concrétisait le rêve esquissé avec le théatrophone de 1881 (III-4), assister chez soi à un opéra ou concert. Elle ne se substituait pas à ces médias, ni à la presse écrite.

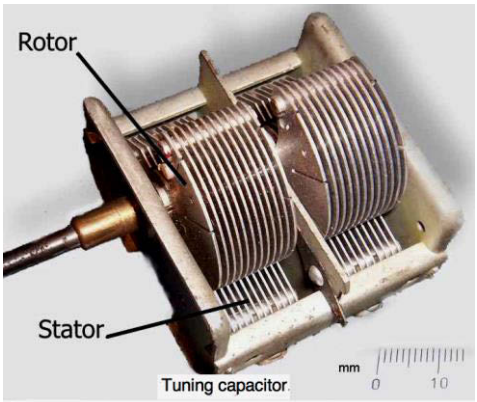
Sur le plan technique

La triode s'affirmait l'élément clé d'une mutation profonde, une rupture technologique inaugurant l'ère de l'électronique.

D'une part, la maîtrise industrielle de la fabrication de différents types de tubes a pris du temps. Les lampes à faible consommation apparurent en 1924, ensuite des variantes, tétrodes, pentodes, magnétrons.

D'autre part, de nombreux travaux théoriques ont été menés pour obtenir des amplificateurs stables, élargir leur bande passante, optimiser la réception de type hétérodyne, maîtriser le démarrage des oscillateurs et leur passage en régime permanent, mettre au point la modulation de fréquence…

zp1 Poste à galène de marque «Oudin»



zr Condensateur variable

zq Récepteur hétérodyne SFR 1917

zp2 Récepteur Omnium à 1 lampe - 1922

Pour la réception, la triode se substitua d'abord à la galène (zp1) pour la fonction détectrice des petits postes où l'accord se faisait en changeant des bobines de self fichées sur les cotés (zp2).

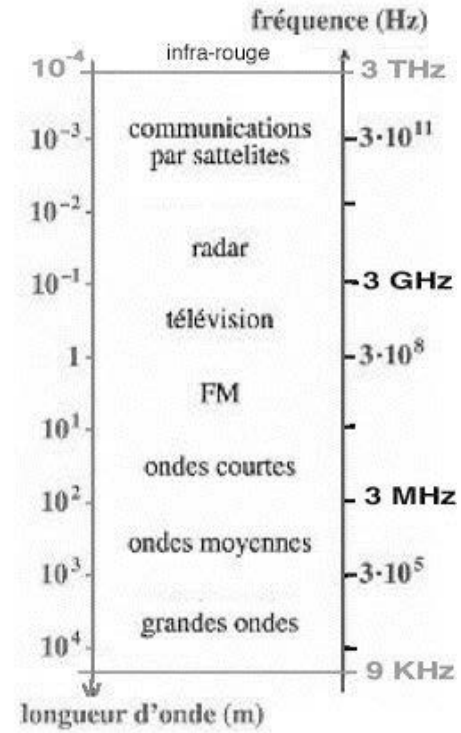
Cependant les hautes fréquences présentaient des difficultés pour la triode. Le Français Lucien Lévy, chef de la station de la Tour Eiffel travaillait sur la mise au point de la TM et trouva la solution en 1917, le superhétérodyne, en reprenant le montage hétérodyne inventé par Fessenden (zq). Le procédé consiste à transformer une haute fréquence en moyenne fréquence, plus facile à traiter (26). Il améliore la sélectivité et atténue les parasites atmosphériques.

À cette occasion, se généralisa un composant universel en radio, le condensateur variable à air (zr).

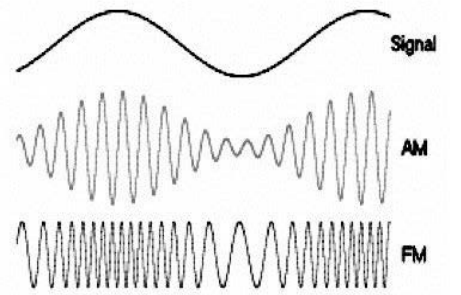
En 1918 Armstrong, redécouvrit le système superhétérodyne (zs), toujours utilisé sur nos appareils modernes.

zs Armstrong règle son superhétérodyne portable

L'amplification augmentant, les écouteurs portés à l'oreille n'étaient plus nécessaires. Ils furent remplacés par le haut-parleur, basé sur le même principe électromagnétique, mais plus puissant.



zv Ondes radio réglementées par UIT



zw Modulation en Amplitude - en Fréquence

En se perfectionnant celui-ci s'est appelé ensuite enceinte, puis baffle.

Pour l'émission, la génération en puissance des ondes entretenues, il y avait le choix entre le moyen électrotechnique relativement classique, l'alternateur HF, et la triode dont la montée en puissance fut lente.

L'alternateur HF français de la SFR s'avérait être le plus performant. L'onde était très pure, sans harmoniques, et très stable grâce à un régulateur étudié par Thury. Les puissances s'échelonnaient de 25 à 500 kW pour des longueurs d'ondes de 8 000 à 20 000 m adaptées à la transmission à grande distance. Sur un total de 45 machines, 10 furent installées en France, dont 2 de 500 kW sur les 5 livrées. Pour les moyennes distances, ont été étudiés des multiplicateurs harmoniques statiques, de 2 ou 3 fois, basés sur des circuits magnétiques en alliages spéciaux. La longueur d'onde était alors réduite d'autant.

L'alternateur de Lyon installé à La Doua en 1918 a fonctionné jusqu'en 1935. Le remplacement par des oscillateurs à triode se fit progressivement à partir de 1925.

La puissance des émetteurs à lampes ne dépassait pas 0,5 kW en 1919, on pouvait monter à 2,5 kW par mise en parallèle, mais il fallut 10 ans de perfectionnements pour remplacer les alternateurs. En 1922, Langmuir de Général Electric présentait la première lampe 20 kW.

Les ondes courtes inférieures à 200 m, considérées au début comme sans intérêt, avaient été laissées aux amateurs. Ils se sont accommodés de leurs défauts et révélé leurs avantages avec la triode. Mais le spectre de fréquences radio que l'on pensait étendu se révélait limité, aussi malgré la propagation aléatoire des ondes courtes dépendant de nombreux paramètres, des travaux dans tous les pays ont fait progresser leur utilisation. (zv)

La modulation de fréquence a été le dernier perfectionnement important, avant le transistor bien sûr. La modulation d'amplitude, inventée dès les premiers essais de phonie par Fessenden, a régné des décennies. Armstrong, chercheur fécond, qui a participé à la révélation des potentialités de la triode et au super hétérodyne, trouvait en 1933, après 10 ans de recherches, cet autre procédé très intéressant pour moduler une onde porteuse avec le signal à fréquence musicale provenant d'un micro (zw). Ses avantages étaient une meilleure utilisation des bandes de fréquence en ondes très courtes, et surtout l'élimination de tous les parasites donnant une excellente pureté de son, surtout pour la stéréophonie. Il fit une émission remarquée à New York en 1934.

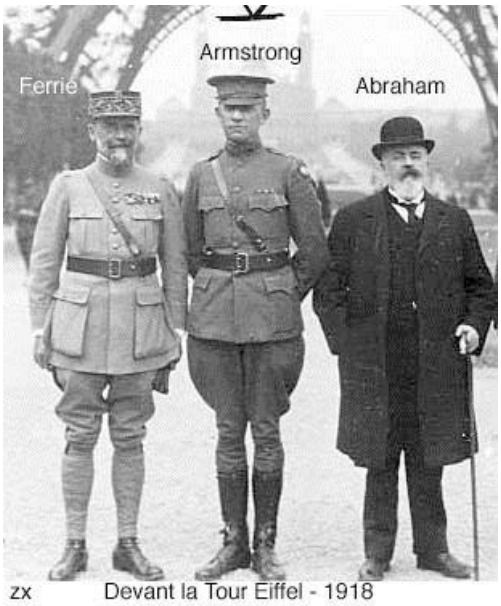
Il vendit son brevet à son employeur RCA, mais ce géant qui avait le quasi-monopole de la radio aux USA le mit au placard. RCA ne voulait pas l'exploiter immédiatement pour deux raisons : d'abord, il aurait fallu réinvestir des sommes importantes dans ce procédé, alors que toutes les coûteuses installations d'émission fonctionnaient avec la modulation d'amplitude ; d'autre part RCA se préparait à investir dans un nouveau marché très prometteur, la télévision.

Armstrong repartit dans un long conflit avec RCA, alors qu'il avait déjà perdu les batailles juridiques avec Westinghouse et AT &T pour leurs brevets de l'audion-triode, acheté à de Forest.

Après WW2, l'Union Internationale des Télécommunications, UIT, réservait en 1945 deux bandes de fréquence - pour la TV, 42 à 50 MHz - pour la FM, 88 à 108 MHz.

Mais très perturbé et désespéré par ses procès, Armstrong se jetait par la fenêtre en 1954 (21). La même année démarrait la première émission française en MF.

Merci Edwin Howard Armstrong, inventeur, victime de la puissance financière.(zx)

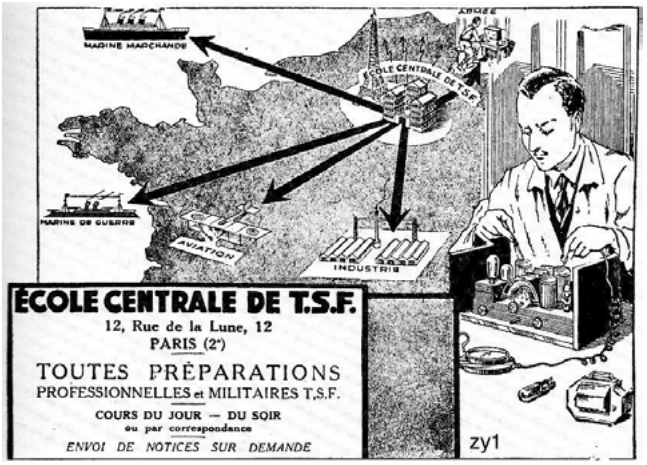


zx Devant la Tour Eiffel - 1918

Sur le plan industriel et commercial

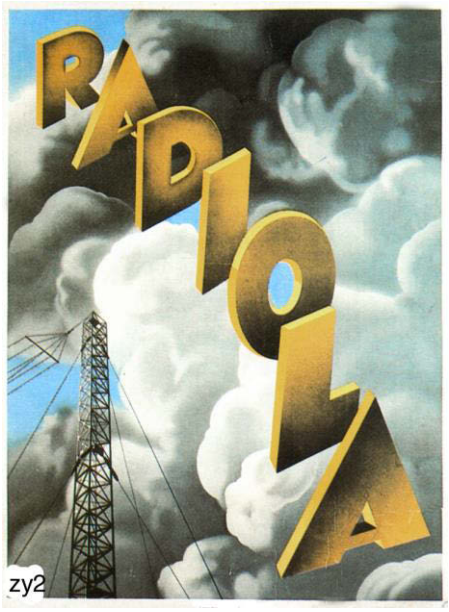
Dans tous les pays se sont rapidement structurés les laboratoires et usines de fabrication pour les matériels d'émission professionnels ainsi que de réception pour le public. En France ce fut la SFR, Société Française de Radiotechnique et plusieurs entreprises moyennes, Lemouzy, LMT et d'autres. En Amérique RCA, Radio Corporation of America fut constituée à partir de Marconi US, racheta tous les brevets de Westinghouse, dont ceux d'Armstrong, tous ceux qu'avait acquis AT&T et d'autres, constituant un presque monopole très puissant.

En Allemagne ce fut Telefunken et Blaupunkt.



zy1

Pour faire tourner ces entreprises, il fallait du personnel compétent. En France, les Ecoles d'ingénieurs, telle l'Ecole supérieure d'Électricité ajoutèrent des sections radio. Une nouvelle structure célèbre avant WW2 fut créée pour la formation des techniciens, l'École centrale de TSF (zy1)



zy2

La principale application, la Radiodiffusion d'émissions à l'intention d'un vaste public cherchait ses marques : informations, culture, musique, puis publicité démarrée aussitôt en Amérique. Là-bas le «*Broadcasting boom* » entraîna l'ouverture de 500 stations d'émission. Suivant les pays, on hésitait à confier à l'Etat un monopole comme pour le téléphone, ou tout laisser au privé comme aux Etats-Unis. En France, le choix fut mixte ; la première station privée a été Radiola, filiale de la SFR.(zy2)

Sur le plan social

L'irruption de ce puissant vecteur d'information, accessible à presque tous, allait bouleverser le monde comme l'on sait, bien plus que l'imprimerie qui, nécessitant de savoir lire, fut réservée pendant des siècles à une petite élite. Avec la radio, il suffisait de connaître la langue de l'émetteur.

Épilogue

En France, le 26 novembre 1921, des scientifiques, industriels, ingénieurs de plusieurs pays étaient conviés à un banquet, à l'occasion du centenaire de la découverte de l'électromagnétisme par Ampère. À l'heure des discours, le ministre des PTT, rappela toutes les merveilles que l'électricité avait déjà créées et déclara : « *La parole est à la fée Électricité* ».

Le silence étonné qui suivit fut soudain rompu par les chants d'une voix très pure, suivi de la Marseillaise, venus de l'au-delà. C'était la voix d'Yvonne Brothier, artiste de l'Opéra, retransmise depuis la nouvelle station de radiodiffusion de Sainte Assise, près de Melun

Le puissant développement industriel et commercial de la radio à partir de 1920, est largement développé dans de multiples documents et sites web (22).

Le best-seller, bible des radioamateurs, a été, *La Radio ?…Mais c'est très simple,* par E. Aisberg, diffusé à des millions d'exemplaires en cinq langues.

Compléments

Bibliographie, webographie générale

– (J. BOULANGER) ET G.FERRIÉ, *La télégraphie sans fil et les ondes électriques*, Berger-Levrault, Paris - 7 éditions 1899 (130 p.) à 1909 (471 p.)

- bibliographie de 300 titres sur : en.wikipedia.org/wiki/Invention_of_radio

- USA - THOMAS H. WHITE, *US Early Radio History* - articles et extraits 1897/1927 - 24 sections - URL : earlyradiohistory.us/

- ROBERT CHAMPEIX, *Radio, TSF, Television, simple histoire* - ed.l'indispensable - Paris 1968

1 – La découverte du tube de Branly est décrite d'après le document édité en1997 par le Musée Branly, détaillant l'histoire des pièces exposées et le contenu de la bibliothèque. Le musée est dans le laboratoire de l'Institut catholique de Paris. La personnalité de Branly a été relativement amplifiée en France pour probablement deux raisons :

- La fierté nationale française qui souffrait un peu d'être absente de cette découverte capitale des ondes. Maxwell était écossais, ses accompagnateurs et suiveurs, les maxwelliens, étaient anglais, et le découvreur Hertz était allemand.

- L'irruption des sciences et techniques au XIX$_e$ avait relancé le débat récurrent depuis l'Inquisition, Dieu, la religion et la science sont-ils compatibles ? Le protestantisme l'admettait, mais le catholicisme papal hésitait surtout depuis Darwin. Les progressistes voulaient montrer qu'il y avait des savants faisant des découvertes, même dans un Institut catholique.

Ce tube, dit de Branly, a bien été pendant quelques années l'élément clé de réception des ondes, après l'oscillateur à étincelles de Hertz et avant les récepteurs qui lui ont succédé. L'élément le plus important a été l'éclateur à étincelles de la bobine d'induction dite de Ruhmkorff (Masson et Page), premier « radiator », rayonnant des ondes, qui a permis la découverte de Hertz jusqu'à son remplacement successif par trois autres transmetteurs.

2 – La controverse de Preece avec Heaviside reposait sur la révélation mathématique de ce dernier, que l'introduction d'inductances en série dans les liaisons téléphoniques améliorait leur qualité et leur portée à distance. Preece, en se basant sur des essais, niait ce fait, mais il se trompait. Des années plus tard, Pupin redécouvrait l'intérêt de ces bobines, le brevetait et gagnait beaucoup d'argent. Heaviside était un scientifique autodidacte original et Preece un ingénieur persuadé de sa compétence de praticien, qui lança la controverse sur un autre terrain, celui des théoriciens versus les praticiens ; d'autant plus que Lodge approuvait Heaviside.

D'autre part, Preece avait constaté en 1892 des transmissions à distance, sans fil, de signaux téléphoniques que les maxwelliens considéraient comme un phénomène d'induction magnétique et non par des ondes. Il soutint Marconi pour prendre en 1896 le premier brevet d'invention de la TSF, alors que la première transmission télégraphique reconnue était celle de Lodge à Oxford en 1894. Le lecteur intéressé par ce conflit Lodge- Marconi se référera à un document bien documenté, accessible sur le web : - Sungook Hong, *From Marconi's Black-Box to the Audion,* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London 2001.

3- Preece a fait largement diffuser sa conférence de juin 1897 par les revues techniques de tous pays ; en Angleterre The Electrician, en France L'électricien, L'industrie électrique, La Nature.

Il annonçait ainsi au monde l'apparition de la télégraphie sans fil en y attachant indirectement son nom, oublié aujourd'hui.

4 - *Guglielmo Marconi, inventeur ?* J.Cl. Montagné développe cette question dans Les cahiers de la FNARH n°113, 2009.

« …Marconi a donné un sens pratique d'utilisation aux inventions des scientifiques, qui, dans le premier âge du développement hertzien, ne cherchaient pas à tirer parti de l'application pratique des nouveautés. Marconi est un technicien, ce n'est pas un savant. Il sait bricoler , essayer sans état d'âme des combinaisons d'éléments pour trouver ce qui marche le mieux, il avait la TSF dans la peau . Ajoutons à cela qu'il n'est pas désintéressé, c'est une motivation normale, et qu'il a des actionnaires irlandais, aux dents longues, ce qui est le moindre défaut des pourvoyeurs d'argent, qui se chargent de pousser la compagnie même dans des procès à l'issue incertaine pendant la durée desquels on déstabilise les concurrents… »

5- ANDREAS KLEINERT- *Ferdinand Braun et les débuts de la TSF en Allemagne,* Revue d'histoire des sciences - 1993, vol 46 - www.persee.fr/web/revues

Sur Braun : www.cathodique.net/siecle.html

6- Batailles juridiques de Marconi

La Marconi Wireless engagea de nombreux procès contre la plupart des pionniers et constructeurs considérés comme des contrefacteurs. Généralement gagnés, elle fut cependant déboutée dans deux cas importants.

– En 1911, Marconi demandait la saisie sur les navires de la CGR de tous les matériels installés par les constructeurs français, en particulier ceux de la SFR, Société Française de Radiotechnique. Le procès fut gagné par Marconi en première instance en 1912. C'était une perte grave pour une industrie naissante en plein développement. Il y eut une mobilisation nationale pour la défendre et deux spécialistes militaires de TSF, Camille Tissot et G.Ferrié conseillèrent l'avocat français normalement incompétent dans une nouvelle technique complexe et déposèrent au procès en appel de 1914. Le brevet français n°305060, réplique du 7777 fut déclaré sans valeur.

– voir : camille-tissot.fr/36_proces_marconi/page_1

– La même année 1911 Marconi gagne en Angleterre son procès contre la *British Radiotélégraph and Telephon Co.*

– En 1919, la Marconi Wireless Telegraph Co of America, absorbée par RCA, Radio Corporation of America, réclama au gouvernement des Etats-Unis une indemnité pour préjudice de l'utilisation par son armée de matériels radio fabriqués par d'autres sociétés, sans licence, pendant WW1. L'affaire fut suspendue pendant 20 ans jusqu'en 1943, à l'entrée en guerre des E.U. Pour d'obscures raisons économiques ou militaires, la Cour suprême américaine avait engagé une procédure contre la Marconi Co pour ne pas avoir à payer cette indemnité de $ 42 984,93, intérêts compris, probablement pas pour son montant, mais son paiement aurait peut-être créé un précédent juridique fâcheux à l'entrée dans un nouveau conflit, grand utilisateur potentiel de matériels radio.

Il fallait démontrer qu'à l'époque le brevet de Marconi était invalidé pour une raison de priorité d'un autre brevet. Toutes les antériorités furent recherchées, de Lodge, Braun, Fleming, Stone et Tesla. Pour ce dernier, la Cour ignora l'ancienne invalidation de son brevet 685,012 par l'Office US en 1904, lorsque Tesla tentait de l'opposer comme priorité à celui de Marconi ; à l'inverse, elle trouva une preuve de priorité pour annuler ce brevet Marconi US, qui avait été validé en Angleterre, mais invalidé en France. Celle-ci se trouvait dans le brevet 645,576 déposé par Tesla le 2/9/97 et homologué le 20/3/1900 avant celui de Marconi. Cette pirouette, pour ne pas payer à Marconi l'indemnité réclamée depuis vingt ans. Une fois de plus, les décisions judiciaires nationales s'avéraient fort éloignées des réalités techniques. C'était la guerre, personne ne souleva le problème du prix Nobel, accordé en 1909 à Marconi et Braun pour le développement de la radio, que la Cour suprême US semblait contredire.

L'invalidation du brevet Marconi US fut prononcée discrètement en octobre 1943, quelques mois après la mort de Tesla (coïncidence ?), pour avoir utilisé son transfo résonant accordé. Le brevet anglais de Marconi restait valide, même après son échéance. Tesla n'avait pas d'héritier à qui verser de l'argent, par contre il existait deux sociétés Marconi : l'une en Angleterre sous le nom EMI, L'autre en Amérique, la puissante RCA qui avait racheté la société Marconi américaine.

Quelques thuriféraires de Tesla en ont déduit qu'il était alors reconnu comme l'inventeur de la TSF, bien que le principe de ce transformateur résonant, n'a été utilisé que plusieurs années après le début de la TSF, sans pour autant avoir favorisé son démarrage. Tesla l'avait développé d'abord pour l'éclairage en haute fréquence, puis la transmission d'énergie à très hautes fréquence et tension, sans utiliser des ondes électromagnétiques. Et puis l'Amérique n'avait pas besoin de déclarer Tesla inventeur de la TSF, alors que le monde doit la radiophonie au Canadien Fessenden et à l'Américain Lee de Forest pour la triode.

Pour cet étrange procès, se reporter à : http://laws.findlaw.com/us/320/1.html

7 - Tour Eiffel (ze). Le lecteur perspicace aura remarqué que l'enregistreur Morse sur la photo appartenait à un récepteur, lequel ne fonctionnait pas bien à cause de la masse métallique environnante. La photo a été peut-être prise avant que cet inconvénient fut détecté.

8 - Ce premier message vocal au monde, transmis par ondes hertziennes, le 23 décembre 1900, était : « *Un, deux, trois, quatre, est-ce qu'il neige où vous êtes M. Thiessen. Si c'est le cas, télégraphiez- moi en retour pour me le faire savoir* »

La voix brouillée de Fessenden fut entendue et la réponse arriva…par télégraphe !

9- 1e liaison transatlantique, voir : carnetdevol.org/TSF/marconi-transatlantique

10 - Ionosphère - Les essais de transmission à des distances de plus de 40 km avaient déjà démontré que les ondes se propageant obligatoirement en ligne droite devaient cependant bénéficier de réflexion ou diffraction leur permettant d'aller plus loin. La liaison transatlantique le confirmait à grande échelle. La seule explication proposée par Heaviside en Angleterre et Kennelly en Amérique était que les ondes de grande longueur se réfléchissaient en très haute altitude, 60 à 100km, sur des couches de gaz ionisés, des miroirs à ondes. Des essais en 1925 d'envoi d'ondes à la verticale et réception de ces ondes après réflexion l'ont confirmé. Cette zone a été dénommée Ionosphère. Elle se crée sous l'action des rayons solaires ultraviolets. Plus récemment les études ont montré qu'il s'agissait de plusieurs couches aux effets variables en fonction de la longueur d'onde et des phénomènes solaires, en particulier entre jour et nuit.

11 - Les détecteurs à cristaux sont souvent dénommés *cat's whisker*, moustache de chat, en raison de la forme en ressort du fin conducteur d'appui sur le cristal.

11b – La France était déjà le seul pays industriel où la culture noble était littéraire et artistique ; la culture scientifique et technique, juste intéressante pour la production industrielle. La destruction de la **Tour Eiffel** posait d'ailleurs un problème technologique insurmontable. Par quel moyen la scier ? L'électricité venait juste de synthétiser le carbure de calcium pas encore le chalumeau oxy-acétylènique , seul moyen actuel pour démolir une structure en acier.

12 - **Fessenden** - HELEN FESSENDEN, *Fessenden Builder of Tomorrows,* 1940- Arno Press NY 1974 -*Inventing the Wireless Telephone and the Future*

http://ewh.ieee.org/reg/7/millennium/radio/radio_wireless.html

- Journal American Telephone 1907 - earlyradiohistory.us/1907fes.htm
- Reginald Fessenden - en.wikipedia.org/wiki/Reginald_Fessenden
- Fessenden and the Early History of Radio Science John S.Belrose, Radiosientist 3/9/1994 - URL : ieee.ca/millennium/radio/radio_radioscientist.html
- *Inventing the Wireless Telephone* - ieee.ca/millennium/radio/radio_wireless
- Brevets Fessenden : en.wikipedia.org/wiki/List_of_Reginald_Fessenden_patents

13 - Alternateur de Fessenden - Sur la base de ce prototype de petite puissance, G. E. monta ensuite la puissance à 50 kW, mais à plus faible fréquence ; le modèle fut porté plus tard par Alexanderson à 200 kW et 30 kHz pour être produit à plus d'une dizaine d'exemplaires. Un dernier modèle est conservé à la station de Grimeton en Suède.

14- Emission inventée de Fessenden pour Noël 1906

Pour expliquer cette invention d'un homme intègre, 25 ans après, peu avant sa mort, on peut avancer quelques hypothèses :

- Fessenden l'avait peut-être envisagé à l'époque, car elle était possible et les matériels installés. Les navires United Fruit Co avaient bien été équipés par lui de récepteurs pour leur usage commercial, ainsi que quelques navires de l'US Navy ; mais l'important était de trouver un acheteur pour exploiter ses brevets, pas de faire de l'émission broadcasting gratuite. Il craignait peut-être que cela influence négativement la décision d'AT&T.

- Constatant en 1931 cet essor de la radio qu'il avait enfanté, mais n'avait pas prévu comme la plupart, il essayait par cet artifice de rester dans la mémoire du monde.

- Peut-être aussi, par amertume, se moquer d'un monde à qui il avait fait un beau cadeau, mais l'avait méprisé, comme l'exprimait une autre lettre de 1931 :

« Mais malgré tout mon travail dur, j'ai vécu presque toute ma vie près de la pauvreté. Je me suis battu des années en batailles judiciaires avant de voir même un sou de mes plus grandes inventions. Et le pire de tout, j'ai été ridiculisé par les journalistes, hommes d'affaires, et même d'autres scientifiques, de croire que la voix ne pourrait jamais être transmise sans utiliser un câble. Mais au moment de ma mort, non seulement j'étais riche de mes brevets, tous ces gens qui avaient ri de mes idées tournaient les boutons de leurs radios nouvellement achetées, pour entendre les dernières conditions météo et les nouvelles. »

15 - Caruso - émission de L. de Forest- Telephony, march 5, 1910

earlyradiohistory.us/1910df1.htm

16 - **Tour Eiffel -** *Raconte moi la radio* : dspt.perso.sfr.fr/tour_eiffel.htm

17 - Signaux horaires - Tissot - camille-tissot.fr/38_signaux_horaires/sh_Histoire_tot.php

18- Lee de Forest, Armstrong

- *The Audion A new Receiver for Wireless Telegraphy* - Scientific American Supplement No 1665 nov. 30,1907 -URL : earlyradiohistory.us/audi1907.htm

- Prof SUNGOOK HONG, *A History of the Regeneration Circuit : From Invention to Patent Litigation*- Université de Séoul - URL : ieeghn.org/wiki/images/0/08/Hong.pdf

- ELSTER UND GEITEL, Wied. Ann. Xvi 1882

- E. H. ARMSTRONG, *Operating Features of the Audion* - Electrical World 12/12/1914
URL : users.erols.com/oldradio/eha1a.htm

- E.H. ARMSTRONG, *Some recent developpements in the Audion Receveir* - Proceedings of the IRE vol.3 n°9 sept 1915 - Proceedings of the IEEE vol 85 n°4/1997
URL : ieee.org/documents/00573757.pdf

- MIKE ADAMS, *King of Radio, Television and Film*, Springer, N.York, 2011

19 - TSF guerre de 14 - Sur le site du Petit conservatoire de la TSF de Louis Sirvent, photos de matériels militaires intéressants: http://tsfls.pagesperso-orange.fr/guerre14.htm

20 - Télégraphie par le sol : http://tsfls.pagesperso-orange.fr/tps.htm

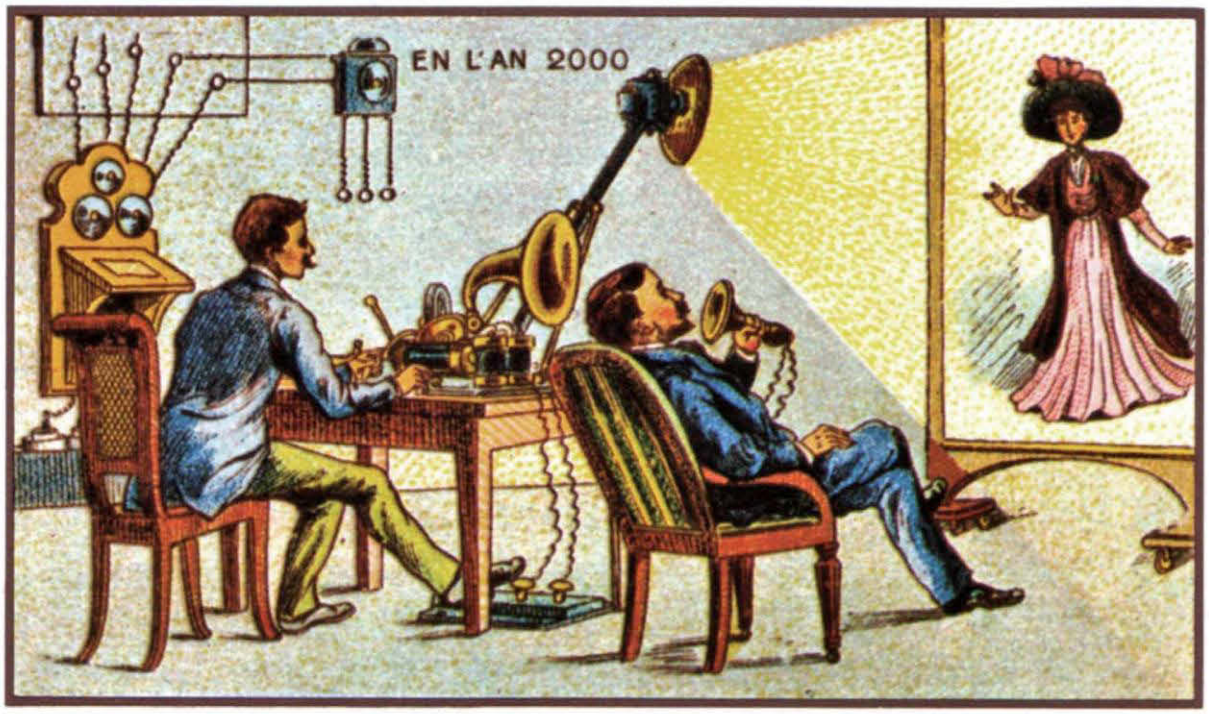
21 - Le suicide d'Armstrong n'est que l'un des dégâts humains collatéraux, provoqués par l'impitoyable système américain de juridiction en matière de brevets. La série TV Dallas des années 1980/90 sur l'empire du pétrole pourrait être reprise sur le thème des longues batailles juridiques de brevets, juste évoqué dans ce livre.

22 - Développement de la radio après 1920 : De très nombreux sites web et livres traitent de la question.

- Au-delà des ondes perdues, ed. Chiron, Paris, 1965
- Vingt-cinq années de TSF, Société Française Radioélectrique -1935
- Pierre Dessapt : Raconte-moi la Radio : dspt.perso.sfr.fr/
- E. Aisberg, La Radio ?…Mais c'est très simple - 1948

23 - Superhétérodyne : fr.wikipedia.org/wiki/Récepteur_superhétérodyne

snr-excelsior-55-04-b.jpg 982 × 652 pixels



Correspondance Cinéma-Phono-Télégraphique. 1890

Toutes les lois naturelles semblent renversées,
on peut entendre l'imperceptible, toucher l'intangible, voir l'invisible
Ce sont pour ainsi dire les nouveaux sens d'une délicatesse inouie
que l'électricité a donné à l'homme et devant la puissance desquels
les obstacles matériels, les distances, tout disparait et s'efface.

Louis Figuier

Récepteur LMT 1947

6 - Télévision

La transmission avec fil des signaux par la télégraphie, puis de l'image fixe par le pantélégraphe, ensuite des sons par la téléphonie, avaient constitué le processus logique suivi par l'évolution du transport de l'information. Il se renouvela avec le sans fil : d'abord la TSF, télégraphie sans fil, puis la radiophonie et finalement l'image animée par la télévision.

Aujourd'hui, la télévision, apparaît beaucoup plus importante et complexe que la radio. Pourtant l'invention de la télévision a mobilisé moins de chercheurs pendant moins longtemps (1923-1939), que celle de la TSF et de la radiophonie, dont c'était une évolution prévisible, dans l'air du temps. En effet, le difficile problème, la maîtrise des ondes hertzienne, génération, transport de l'information, réception, était pratiquement résolue.

L'outil essentiel apparu en dernier, la triode, avait fait pénétrer les électriciens dans un tout nouveau domaine, la circulation et le comportement de l'électron dans les tubes à vide, l'électronique. Ce domaine était encore mal connu et difficilement maîtrisé. Cela explique pourquoi ils ont d'abord attaqué le problème de la télévision avec des solutions électromécaniques qui leur étaient plus familières. Seuls quelques jeunes aventuriers ont eu l'intuition que l'extrême rapidité et mobilité, requise pour l'électron, ne pourrait être atteinte dans la matière des fils, mais uniquement dans le vide, terra incognita, ou presque.

Des recherches ponctuelles sur la transmission des images avaient débuté dès les années 1880, mais après Hertz, les efforts se sont dirigés sur la télégraphie puis la phonie sans fil. Ce n'est qu'après 1920, lorsque la radiophonie devenait une réalité industrielle, que s'accentuèrent les recherches sur la télévision, encouragées par les progrès incessants des tubes à vide. Après le creux de la crise 1929/31, on pouvait considérer la télévision comme inventée en 1939. Ses développements attendirent l'après-guerre.

Les problèmes

Pour reproduire l'image en mouvement, comme le cinéma à la fin du XIX^{e} siècle, la télévision allait exploiter cette merveilleuse propriété de la rétine, la brève persistance des impressions lumineuses. Le mouvement continu serait la succession rapide de brèves images fixes.

Les problèmes à résoudre pour la télévision étaient :

– à l'émission, transformer en signaux électriques une succession d'images fixes, très brèves, à la cadence de 15 à 25 par seconde ;

– leur transport par ondes hertziennes, déjà bien maîtrisé avec la radio ;

– à la réception, retransformer ces signaux en une image animée sur un écran.

La liaison par ondes hertziennes ne devait pas présenter de difficultés, il suffirait d'adopter des fréquences plus élevées, les ondes ultra-courtes comme pour la FM. Seul inconvénient, elles ne font pas le tour de la terre, ne se propageant qu'en ligne droite, sans obstacles.

Pour les transformations à l'émission, deux pistes de recherche très différentes étaient envisageables : des procédés électromécaniques connus et un procédé électronique uniquement espéré, à partir des tubes à vide.

Dans le second cas plus difficile, l'électronique, un début de piste était validé pour le récepteur, le tube cathodique de Braun. Par contre pour le transmetteur, l'émetteur, c'était l'inconnu. Donc le grand problème était l'analyseur d'images à l'émission

Des dizaines de chercheurs de cinq pays s'attelèrent à ces problèmes. Comme les deux pistes furent étudiées presque en parallèle, choisissons d'analyser d'abord la plus traditionnelle, l'électromécanique. Elle a occupé la majorité des chercheurs, mais arrivant près du but, elle fut surclassée par la piste électronique, sur laquelle trois chercheurs s'engagèrent utilisant deux procédés proches.

Les précurseurs

La télévision, ce nom fut prononcé pour la première fois par C. Perskyi dans son discours, *Télévision au moyen de l'électricité,* au Congrès international d'électricité, pendant la grande exposition universelle de 1900 à Paris.

En anglais c'était, *Television*, en allemand, *Fernseher*

Au cours des années 1880, plusieurs chercheurs avaient proposé des systèmes variés de transmission d'image fixes, le téléphote, le télectroscope de Senlecq et autres. L'astucieux photophone de Bell transmettait le son par la lumière en utilisant la propriété rare du sélénium de transformer cette lumière en courant électrique (II-2). Ce matériau appartenait à une espèce inconnue, les semi-conducteurs.

La télévision a suivi le processus de la plupart des inventions en électricité. Elles se construisent à partir de briques disparates, des petites inventions et découvertes n'ayant pas à elles seules bouleversé le paysage électrique ; mais ces éléments améliorés et rassemblés deviennent des points de départ vers une autre grande invention.

Pantélégraphe de Caselli

Alors que le télégraphe était en plein développement pour transmettre les courtes impulsions électriques du morse, ce professeur à l'Université de Florence inventa en 1856 un appareil capable de transmettre des images de dessins au trait ou écriture en noir et blanc (V-1). Il balayait horizontalement en lignes continues très rapprochées une reproduction de l'image sur un support conducteur où les noirs étaient les points recouverts d'encre isolante. A l'autre extrémité de la ligne, un système inverse, bien synchronisé, traduisait les impulsions de courant en réactions électrochimiques sur un papier spécifique. L'atelier parisien de Froment réalisa l'appareil, adopté ensuite par l'Administration sur la ligne Paris- Lyon. Il fonctionna deux ou trois ans à l'étonnement des usagers, mais coûtait cher, la transmission d'une feuille occupant 15 minutes de ligne.

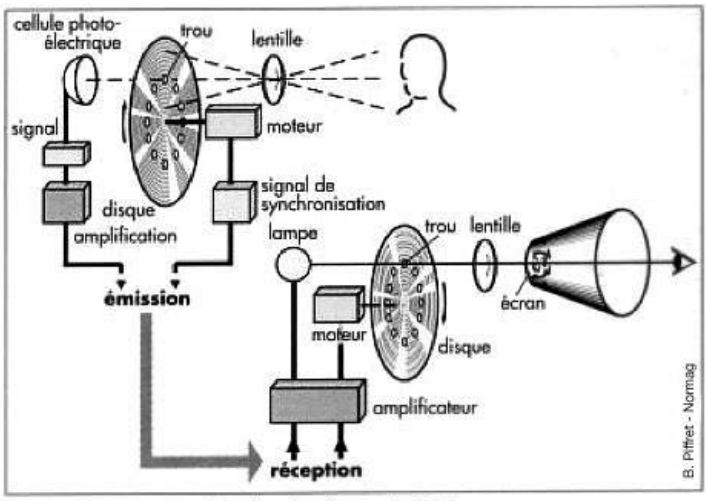
Le principe était acquis de l'analyse puis reconstitution électrique d'une image par les points d'une ligne, nos pixels, chaque ligne étant décalée d'un petit espace de la précédente. Il y aurait néanmoins un long chemin à faire pour raccourcir la durée de 15 min à 1/20 s et transmettre des nuances de gris au lieu du noir et blanc, en attendant la couleur.

Disque de Nipkow

Un jeune étudiant allemand Paul Nipkow transforme l'appareil de Caselli pour augmenter sa vitesse d'analyse d'une façon considérable.

Il remplace le va et vient du stylet ligne après ligne par la rotation d'un disque percé d'une série de trous disposés le long d'une spirale faisant un tour par image.

Le nombre de lignes égale celui de trous, de 30 à plus de 100. Le disque tourne à 20 ou 25 tours/s. Le schéma (ya) illustre le croquis du brevet « *Elektrisches Teleskop* », déposé en 1884 par Nipkow



ya Principe du disque de Nipkow

À l'émission, une cellule au sélénium traduit en courant la lumière d'une fraction de l'image traversant chaque trou successivement.

À la réception, ce courant alimente une lampe spéciale dont la quantité de lumière est instantanément proportionnelle à l'intensité du courant, lampe à décharge au néon par exemple. L'image transmise est reçue sur un écran. Il est probable que Nipkow a réalisé l'appareil décrit dans l'ETZ 10/1885, un *Elektrisches Teleskop* observant à distance, sujet qui avait aussi intéressé d'autres chercheurs. Il ne transmettait qu'une image fixe.

Roue de Weiller

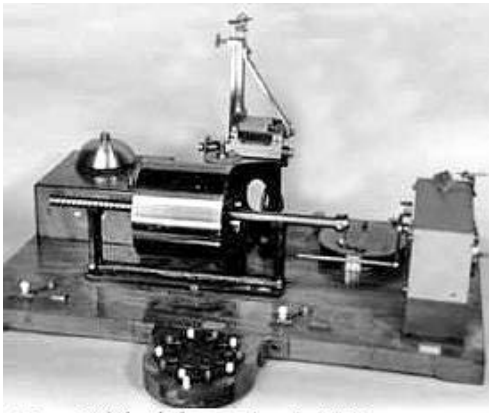
En 1889, Lazare **Weille**r substitue au disque une roue ou tambour muni à sa périphérie une série de petits miroirs à inclinaison progressive qui renvoient l'image rapidement mobile d'une forte lampe fixe.

D'autres systèmes à optique tournante ont été aussi envisagés.

Brillouin. Ce physicien français améliore le disque de Nipkow en plaçant sur chaque trou une lentille convergente, mais cela entraînait des difficultés mécaniques.

Téléstéréographe - Belinographe

Au début du XX^{e} siècle, Edouard Belin réalisa plusieurs modèles d'appareils pour transmettre des images fixes, ils étaient perfectionnés afin de transmettre des photos par fil. Le principe était différent de l'analyse par lignes de Caselli, la photo était enroulée sur un cylindre rotatif qui se déplaçait axialement, pendant qu'un capteur optique fixe analysait l'image suivant une spirale. Le récepteur réalisait l'opération inverse et restituait l'image sur papier photographique (yc). Le bélinographe de 1907 eut un long succès auprès des agences de presse jusque dans les années 1960, quand il fut remplacé par le fax. Cependant il n'a pas apporté un progrès transposable à la télévision, sinon un espoir.



yc Téléstéréographe de Belin

Cellule photoélectrique

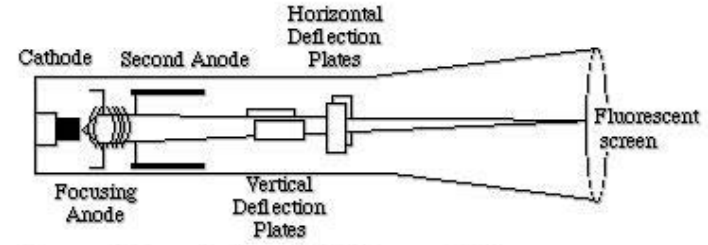
Plusieurs chercheurs avaient réalisé un bon transducteur de lumière en électricité avec un fragment de sélénium (II-2). Le comportement semi-conducteur de ce matériau n'était naturellement pas compris. Il avait un défaut pour son emploi en télévision, le courant produit ne cessait qu'un instant après la suppression de la lumière. Au fond, la cellule copiait la rétine, constituée de minuscules capteurs de lumière envoyant des signaux électriques au cerveau, ne cessant qu'avec un léger retard, sinon nous serions incapables de regarder les images saccadées du cinéma et de la télévision.

Circuits d'Arthur Korn

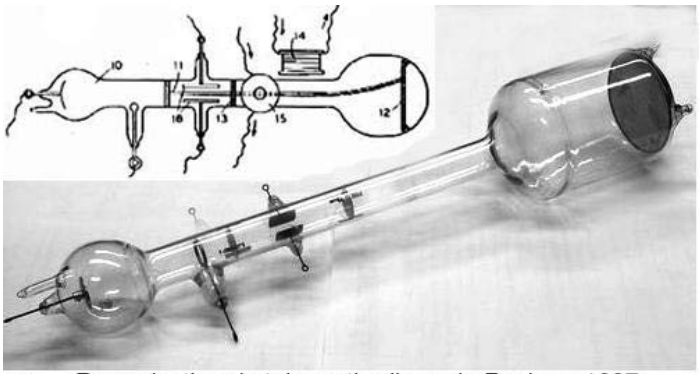
Cherchant à transmettre au loin des images fixes, non pas en noir et blanc, mais avec des nuances de gris, cet électronicien allemand réussit à éviter le retard à l'extinction de la cellule au sélénium. Il y parvint vers 1907 en concevant de nouveaux circuits, appliquant ce que nous désignons comme le traitement du signal. Il réussit alors à transmettre très loin par téléphone des images fixes en teintes de gris, même sans amplification.

Tube cathodique de Braun

Depuis son invention en 1897 (V-4), ce tube n'avait guère trouvé d'application. Max **Dieckmann,** élève de Braun, construit en 1906 un premier tube où les rayons cathodiques, les électrons, sont déviés verticalement et horizontalement par des plaques électrostatiques (yd) ; il est utilisé par Rudolf Hell pour un système téléscripteur. En 1907 le professeur Boris **Rosing** de St Petersbourg comprit qu'il pouvait tracer des signaux électriques très rapides sur son écran ; pourquoi pas aussi des images? Il ajoute alors une déviation des électrons par champ magnétique (ye).



yd Tube cathodique de Dieckmann - 1906



ye Reproduction du tube cathodique de Rosing - 1907

La fabrique d'ampoules électriques Cossor commençait en 1912 à construire des oscilloscopes pour laboratoires. Plusieurs chercheurs envisageaient de l'utiliser comme récepteur d'images télé, Nicolson, Valensi, Dauvillier.

Le tube électronique, récepteur d'images, était presque inventé. Serait-il possible de le rendre réversible, comme transformateur d'images optiques en signaux électriques ?

Campbell Swinton propose un système tout électronique

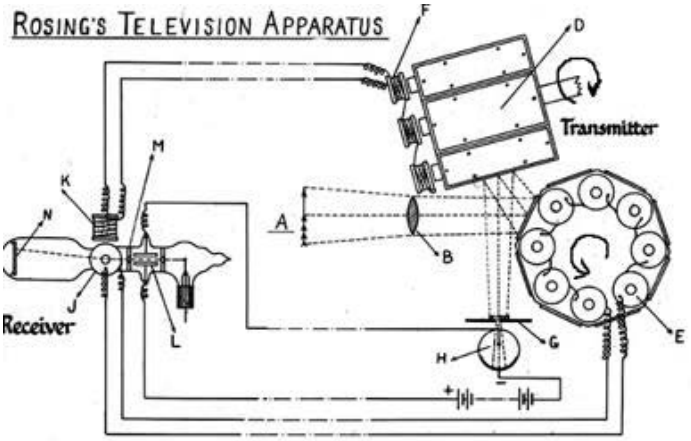
Avant chaque invention, il s'est toujours trouvé quelqu'un pour la prédire. Dans l'objectif d'une télévision tout électronique, l'ingénieur écossais A. A. Campbell Swinton ne s'est pas contenté d'une simple prédiction facile, mais a donné une piste, début de solution, qui suivie plus tard par d'autres se révéla très féconde.

Sa proposition était : Je pense que la vision électrique à distance sera un jour dans le domaine du possible, elle accompagnait des explications dans une lettre à Nature en 1908, un article du Times en 1911 et en 1915 dans Expérimentateur électrique.

Dans un tube à vide, on dispose une plaque comprenant trois éléments en sandwich, une plaque conductrice, un isolant, un matériau photoélectrique divisé en grains. L'image à transmettre est projetée sur ce matériau, qui va se charger positif à une valeur, fonction de la quantité de lumière reçue, en émettant des électrons. On le balaye ensuite ligne par ligne par un faisceau d'électrons issus d'une cathode, chaque élément se décharge et l'on utilise cette décharge comme un signal transmissible au récepteur. Ce dernier étant un tube cathodique de Braun dont le faisceau cathodique balaye en synchronisme de la matière fluorescente, restituant une image.

Comment Swinton est-il arrivé par simple réflexion, sans essais, à cette idée qui, reprise par deux chercheurs, Tihanyi, puis Zworykin, s'avéra être l'une des deux solutions au difficile problème de l'analyseur d'images, la caméra de télévision ? Peut-être parce qu'il était spécialiste des tubes à rayons X.

Il n'a pas même pas cherché à réaliser cet appareil, estimant que cela coûterait bien trop cher pour un intérêt très réduit.



Systèmes électromécaniques

Cette piste de recherches fut exploitée dès le début, surtout le disque de Nipkow, parfois la roue de Weiller ou des variantes.

Rosing en Russie

Boris Rosing, qui avait déjà envisagé d'utiliser le tube cathodique de Braun pour visualiser des images électroniques, réalise en 1911 un système d'analyse d'une image fixe avec deux tambours de Weiller orthogonaux, l'un horizontal à grande vitesse pour les lignes, l'autre plus lent pour le nombre d'images par seconde (yf). Cet ensemble, transmetteur électromécanique - récepteur électronique, représentait un premier système mixte.

Baird en Angleterre

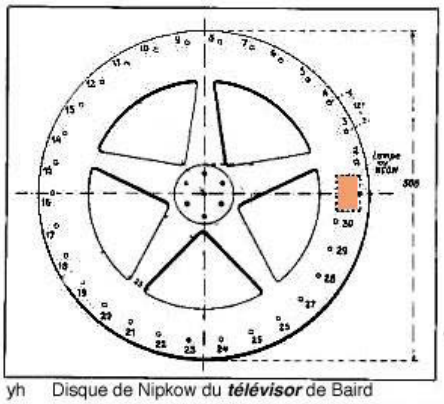
L'Écossais John Logie Baird fut le leader qui réussit en une douzaine d'années à atteindre presque le but avec le disque de Nipkow, à l'émission comme à la réception.

Il réalise son premier appareil en 1923/24, équipé d'un disque avec 2 spirales de 8 lentilles Brillouin, entraîné par un moteur synchrone tournant à 5 tours/s. L'image est constituée de 8 lignes divisées en 50 points par une roue perforée en spirale. Pour compenser l'inertie des cellules, la lumière est coupée par un obturateur tournant à 6 tours/s. Cela donne une petite et mauvaise image de seulement 400 points, reproduisant au mieux une croix de malte. Il organise des démonstrations du procédé dans un magasin de Londres.

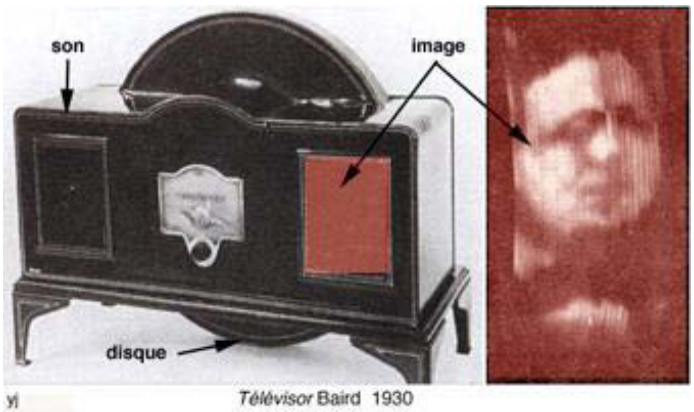
yg émetteur (camera)TV de Baird - 1926

Baird perfectionne son système en 1925, avec en particulier le traitement du signal mis au point par Korn. L'émetteur est un gros appareil encombrant et lourd installé dans son laboratoire (yg), mais le récepteur plus simple, baptisé Télévisor, peut être transporté aux environs. La reproduction de niveaux de gris est possible avec 30 lignes à balayage vertical, obtenues par un disque à 30 trous (yh), donnant une image en hauteur cadencée à 5 images/s.

Les membres de la Royal Society ont pu apprécier le système en janvier 1926 avec un balayage de 12,5 images/s, permettant de visionner un visage, le premier au monde (yj). Elle était orangée, couleur de la lampe d'éclairage au néon.



yh Disque de Nipkow du ***télévisor*** de Baird



yi *Télévisor* Baird 1930

L'année suivante, il démontre que l'image télévisée peut se transmettre très loin (430 miles) de Londres à Glasgow. C'était une réponse à la transmission faite peu avant par les Bell Labs de New York à Washington sur 225 miles. Mais pour aller plus loin, traverser l'océan il faudrait des fréquences plus élevées, donc des ondes plus courtes et il fait alors un essai concluant en 1928 entre Londres et New York sur 45 mètres de longueur d'ondes.

La société *Baird Television Development Company* est créée en 1929 ; elle s'associe à la BBC pour ouvrir un premier studio à Daventry, qui émettra jusqu'en 1932 avec le système à 30 lignes, ensuite dans son propre studio. Des essais non-concluants sont effectués avec le système du tambour de Weiller, le *flying spot*.

L'américain Farnsworth, inventeur du dissector, système électronique, vient proposer à Londres en 1932 une licence à Baird pour $ 50 000 dont il avait grand besoin pour poursuivre les améliorations de son procédé. L'affaire est conclue, mais Baird n'arrive pas à maîtriser cette nouvelle technologie et conserve le disque Nipkow. De plus elle fonctionne bien à l'extérieur, mais nécessite en studio des éclairages très puissants.

En 1936 la BBC émet à partir d'un nouveau studio à Alexandra Palace sur les hauteurs de Londres. Elle alterne un programme avec le tout nouveau système électronique à 405 lignes de EMI et le système concurrent de Baird, porté à 240 lignes (yk). Marconi-EMI avait des accords d'échanges avec RCA, majoritaire dans son capital, et développé sous le nom d'Emitron un clone de l'iconoscope, venant d'Amérique.

yk

Comment le système Baird à 30 lignes a-t-il pu les multiplier par huit ? Les prises de vues en direct étaient filmées, et ce film transcrit par la caméra à disques. Le procédé avait été aussi développé par d'autres. Cela ne dura pas longtemps, début 1937 le studio de Baird prenait feu, détruisant tout.

L'accident n'a fait que raccourcir la fin prévisible du système Baird, trop imparfait, sans progrès potentiels, avec une caméra lourde suivie de multiples câbles la rendant quasi intransportable.

Dans cette course d'obstacles, Baird s'était bien battu, mais avec un mauvais cheval. Inventeur passionné et compétent, il changea de monture, et fit des perfectionnements dans le système électronique et autres domaines.

En France (1)

On y découvre le système Baird avec un peu de retard en 1927. Trois équipes vont se trouver en concurrence. Une filiale française de Baird est créée, s'y ajoute un inventeur Henri de France, fondateur de la Compagnie Générale de Télévision au Havre. La plus dynamique étant celle de la CdC, la Compagnie des Compteurs, s'établit à Montrouge, animée par René Barthélémy. Elle va explorer d'abord le système à disque de Baird pour arriver comme lui à 30 lignes, en 1929.

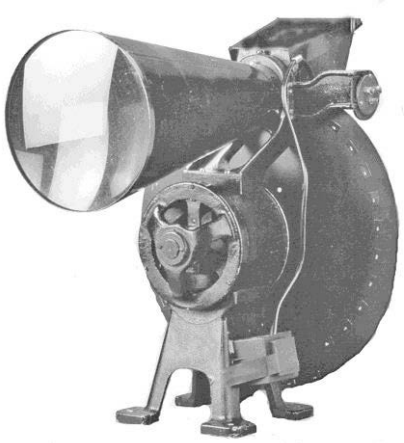
Ensuite, la roue ou tambour de Weiller dont les miroirs réfléchissent le faisceau d'une lampe puissante sur la tête du sujet. Celui-ci est alors éclairé par un point lumineux se déplaçant sur des lignes horizontales successives en fonction de l'inclinaison des 30 miroirs. Quatre cellules photoélectriques face au sujet captent ces lignes (yl).

yl Tambour à 30 miroirs CdC 1930

C'est un peu meilleur que le système à disque, mais ne permet de visualiser qu'un objet de dimensions limitées, comme un visage, avec des inconvénients pratiques.

Barthélémy revient au disque de Nipkov amélioré pour l'émission comme la réception, mais adopte le procédé du télécinéma. La caméra reproduit bien plus facilement une bande plate de film qu'une scène réelle (ym).

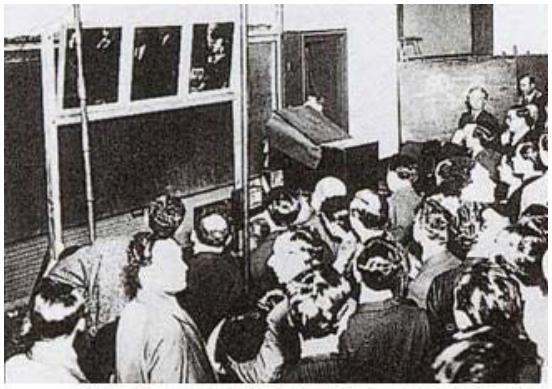
Une démonstration est organisée en 1931, à l'École Supérieure d'Électricité devant mille personnes. C'est l'enthousiasme pour une qualité d'image pourtant très inférieure au cinéma, projetée sur 3 miroirs 40 x 30, à partir d'une petite image du récepteur sur verre dépoli (yn).



ym Récepteur television Barthélémy - 1931

En 1933, RCA met au point en Amérique l'iconoscope de Zworykin, base du système électronique. La CdC abandonne le disque électromécanique, au moins pour le récepteur, et adopte le tube cathodique de Braun.

Le ministre des PTT, G.Mandel, donne les moyens à la CdC de démarrer en 1935 des émissions télécinéma en 180 lignes et 25 images/s, avec un studio rue de Grenelle et l'émetteur de la tour Eiffel (yo).



yn Projection télévision Barhélémy à Supélec 1931

La réunion de l'UIR en 1936 (Union internationale de Radiodiffusion) est l'occasion de prendre un peu tardivement le virage qui s'impose vers la solution électronique. CdC se regroupe avec SFR-CSF qui a un accord d'échange de brevets avec RCA, et passe aussi un accord avec Telefunken, plus avancé sur l'iconoscope.

CdC équipe un grand centre de recherches avec studio à Montrouge avec un émetteur à 450 lignes. Simultanément, Thomson acquiert auprès d'EMI anglaise la licence de l'émitron à 455 lignes, clone anglais de l'iconoscope.

Finalement, après des tests, le ministère des PTT fixe en 1938 les normes pour le réseau d'émetteurs à installer dans les grandes villes de France. Mais la situation est bloquée en France. L'état hésite à investir, les programmes proposés sont peu attractifs, les récepteurs sont chers, équivalents à 6000 €, les fabricants hésitent à baisser les prix, sans espérer un accroissement des ventes.

yo récepteur et caméra CdC 1935

Le nombre de téléviseurs vendus en 1939 atteignait environ 300 en France, alors que l'Allemagne possédait 1600 Téléfunken, l'Angleterre 19 000 Televisor et quelques Emitron, l'Amérique plusieurs milliers de Jenkins.

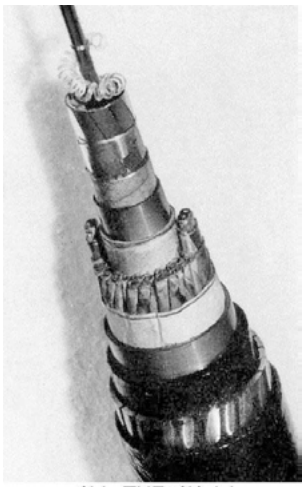
En Allemagne

Dans un pays désemparé après une guerre perdue, les recherches après 1920 ne furent pas à la hauteur des fortes expériences en radio des sociétés Telefunken puis Blaupunkt.

yp2 camera Telefunken - 1936

yp1 Récepteur Telefunken 1935

Elles suivirent sensiblement la même voie qu'en France et en Angleterre, le système électromécanique, mais avec un virage plus précoce vers l'électronique. Les premiers tubes cathodiques pour récepteurs furent commercialisés dès 1934 (yp1). Un fort stimulant pour les recherches en télévision furent les jeux Olympiques de Berlin de 1936, occasion pour le pouvoir politique d'étonner le monde (yp2). Les images de l'iconoscope comme du dissector furent retransmises dans six grandes villes par la nouvelle technique du câble coaxial pour la transmission des très hautes fréquences. Ce câble inventé par les Bell Labs avait été utilisé peu auparavant entre New York et Philadelphie pour transmettre une émission de télévision, ou bien 480 communications téléphoniques (



yq câble THF télévision

Jenkins

En Amérique, la piste électromécanique fut aussi empruntée par Charles Jenkins. L'analyseur d'images comportait des lentilles tournantes, genre roue de Weiller ; il avait 48 lignes à 16 images/s. En 1928, il commença à diffuser à Washington des radiofilms. Les 24 images fixes par seconde d'un film plat de cinéma étaient plus faciles à analyser avec un système Weiller qu'une image réelle. Beaucoup de récepteurs équipaient des particuliers.

Télévision grand écran

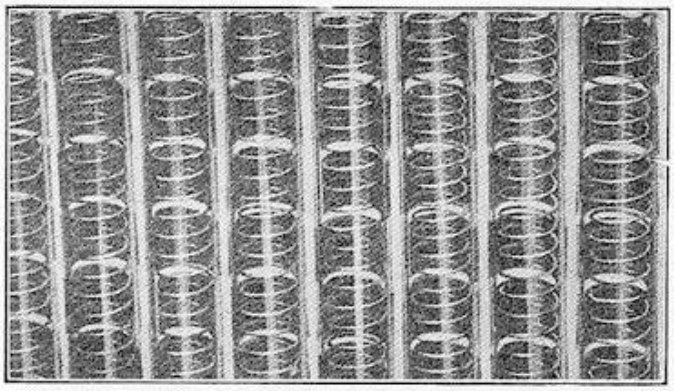
Le laboratoire Bell Labs déjà célèbre à l'époque, faisait en 1927 une démonstration assez spectaculaire d'un système où l'image analysée par un disque de Nipkow est balayée à 16 images /s par le faisceau de lumière, le Flying spot.

Le récepteur original était un grand écran de 24x30 inches, constitué de 50 tubes néon, avec chacun 50 anodes, soit 2500 pixels et une définition de 50 lignes (yq2).

En effet, certains estimaient que la télévision devait être un perfectionnement du cinéma. C'est-à-dire que le récepteur devait être comparable à un projecteur de cinéma sur grand écran, recevant ses images par transmission hertzienne, comme le son par la radio. On irait assister à la télévision collectivement comme on va au cinéma ou au théâtre.

Cela leur paraissait irréaliste que chacun puisse se payer, même en miniature, un récepteur d'ondes complexe.

yq2



Method of construction of parallel sections of neon-filled tube

Cette voie fut suivie entre 1930 et 1935 par Baird et EMI en Angleterre, Fernseh AG et Karolus-Telefunken en Allemagne, de Forest et RCA aux USA. Le système n'était concevable qu'en électromécanique et l'écran était tapissé de 2100 petites lampes.

La réussite du système électronique mit fin à ce rêve, d'ailleurs le tube cathodique ne s'y prêtait vraiment pas. Il faudra attendre 70 ans l'écran plat LCD ou plasma.

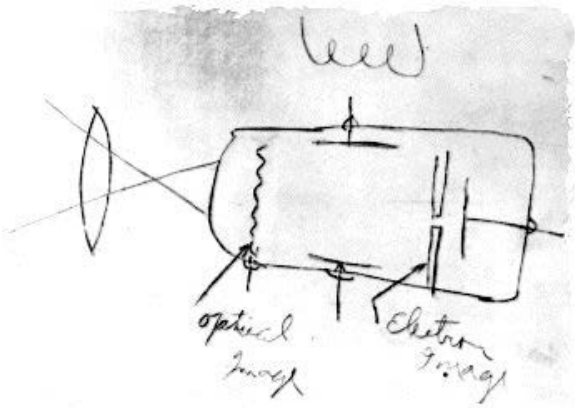
Télévision électronique

Le grand problème était l'émetteur ou transmetteur ou encore analyseur d'images capable de transformer l'image animée en signaux électriques à haute fréquence, puis en ondes, aujourd'hui la caméra. À la réception, l'écran cathodique était l'adaptation du tube de Braun, déjà proposée par plusieurs.

Trois chercheurs au moins se sont trouvés presque simultanément sur cette même piste, l'Américain Farnsworth réussit le premier avec la solution du dissector, le Hongrois Tihanyi proposa la solution originale du stockage de charges qui fut ensuite développée par Zworykin, émigré russe en Amérique, avec l'iconoscope.

Farnsworth (yr) (2)

Un jeune garçon de ferme, mormon, de l'Idaho, Philo Farnsworth, manifestait des aptitudes précoces pour comprendre l'électricité, acquise par la lecture de revues technologiques découvertes dans un grenier, dont *Popular Science.* Entre autres, il bricola une machine à laver électrique pour sa mère et réparait le générateur électrique en panne de la ferme.



ys Reproduction du dessin de Farnsworth en 1922, par Tolman

Au lycée de Rigby, il discutait souvent après la classe avec son professeur de sciences J.Tolman des possibilités de transformer les images en faisceaux d'électrons pour les transporter au loin et réunir les deux récentes inventions, radio et cinéma. Ce détail a été révélé lorsque ce professeur a témoigné des années plus tard devant le tribunal, au sujet des brevets. Il a reproduit sur papier l'un des dessins que son élève avait fait au tableau noir pour expliquer ses idées à 16 ans (ys). Ce dessin est bien la première esquisse d'une caméra électronique de télévision. Bien qu'il ne constitue pas une preuve juridique, il a donné une crédibilité décisive à Farnsworth devant les juges.

Pour Tolman, Philo était l'étudiant le plus intelligent et précoce qu'il ait rencontré dans sa vie. Là où les scientifiques tentaient de traduire la lumière en électricité avec des disques et des miroirs tourbillonnants, il avait réalisé que cela ne serait jamais assez rapide, il fallait quelque chose de beaucoup plus rapide, l'électron dans le vide, qu'on pouvait diriger avec des forces électriques ou magnétiques.

Quand Farnsworth quitta son guide, Philo lui demanda ses derniers conseils. Tolman répondit : *Suit la voie tracée par Hell et gardes le silence.* L'allemand Hell avait développé un téléscripteur basé sur le tube de Braun.

Il entre à la Brigham Young high School en 1924, où il rencontre Elma Pem Gardner, qui deviendra sa femme et restera toute sa vie son alter ego technique.

En 1926, continuant à réfléchir à son projet, il gagne sa vie comme électricien et dépanneur de radios à Salt Lake City. Il rencontre George Everson et Leslie Gorrell qui mettent $ 6000 pour installer la *Television Laboratories Inc.* à Los Angeles, afin de construire l'émetteur et le récepteur de télévision suivant ses idées ; mais il fallait plus et Everson obtint aussi $ 25 000 de la banque Crocker, plus un ancien grenier comme laboratoire.

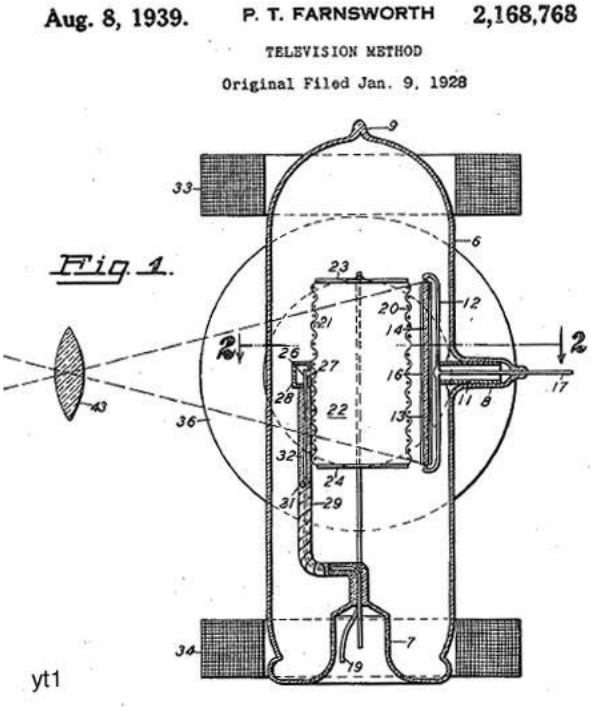
Farnsworth réunit une équipe de gens compétents et motivés : W.Cummings de l'Université de Californie, H.Metcalf ingénieur radio qui avait une expérience en tube cathodique par l'Université de l'Illinois, deux techniciens radio maitrisant bien les circuits électroniques, Pem et son frère Clifford Garner, connaissant le soufflage des verres de laboratoire. Les débuts furent financièrement difficiles, ainsi comme matière photoélectrique il lui fallait de l'oxyde de césium, qu'il trouvait en achetant des lampes radio et les cassait pour récupérer cette matière rare.

Invention du dissector

Le 7 janvier 1927, il prenait ses premiers brevets n° 1773980 sur un analyseur et le n° 177398081 sur un récepteur, *Television receiving system*, accordés le 26/4/1930.

Sa démarche inventive était au début de reproduire avec des électrons le système optique de Nipkow ; il ne connaissait probablement pas en Amérique la proposition de l'Anglais Campbell Swinton. Avec le disque, les photons de lumière étaient sélectionnés séquentiellement par la position du trou mobile dans le disque rotatif, puis transformés en signal électrique par la cellule photoélectrique qui les recevait. Il adapta le processus avec les électrons libres dans le vide.

Principe du dissector, l'image optique est projetée sur une plaque revêtue d'oxyde de césium photoélectrique, à l'intérieur d'une ampoule de verre vidée d'air. Cette plaque constituait une sorte de miroir transformant l'image optique en image électronique. Les électrons émis par la surface, proportionnellement à la lumière reçue, sont accélérés par une anode constituée par une grille, qu'ils traversent pour arriver dans un espace équipotentiel. Les électrons émis sont canalisés par deux paires de plaques électrostatiques qui forcent l'image électronique à passer systématiquement devant une petite ouverture dans une structure, cible ou l'image peut être disséquée en éléments. En effet, l'ouverture balaye l'image électronique. Dans la structure, une anode collecte les électrons associés à un élément d'image et transmet le signal électrique à un amplificateur vers la sortie. (3)

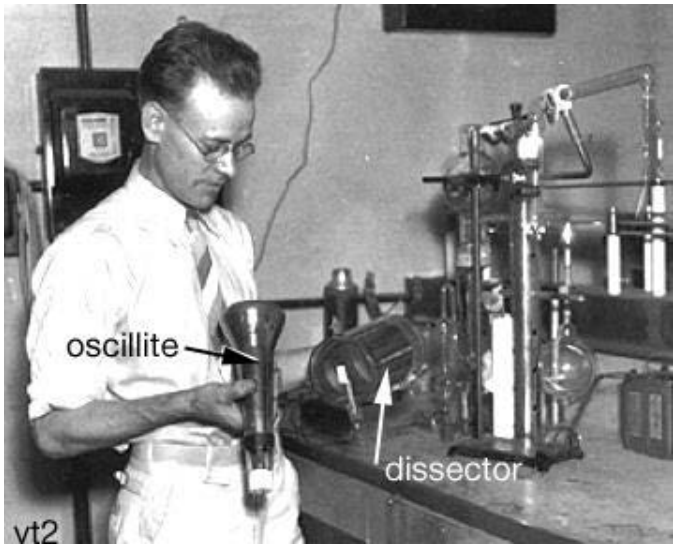


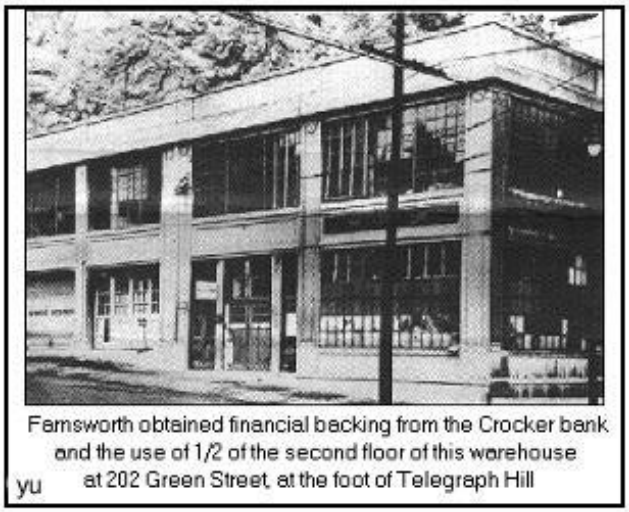
yt1

Un croquis du brevet de 1928 donne un aperçu de *l'Image Dissector* (yt1).

La première expérience eut lieu le 7 septembre 1927, au laboratoire de San Francisco. Étaient présents, Phil, sa femme Pem, et son associé Everson.

L'objet en mouvement à reproduire était une ligne noire peinte sur un verre dépoli, placé entre le transmetteur, le dissector et une forte lampe à arc. Dans une autre salle, le récepteur, l'oscillite, dérivé du tube de Braun, recevait l'image de la ligne ; d'après certains auteurs c'était un triangle noir. Lorsque Phil tourna la ligne horizontale de 90°, le récepteur reproduisit sa rotation en ligne verticale. Son carnet de laboratoire mentionne seulement : *The received line picture was evident this time."* (yt2)




Farnsworth obtained financial backing from the Crocker bank and the use of 1/2 of the second floor of this warehouse at 202 Green Street, at the foot of Telegraph Hill
yu

C'était gagné, **la télévision électronique était inventée** avec ce dissecteur d'image, capable de fragmenter une image électronique en un grand nombre de points. Une plaque commémore ce souvenir au 202 de la rue verte de San Francisco (yu). À 21 ans, ce jeune Mozart de l'électronique avait réalisé le rêve de ses 16 ans.

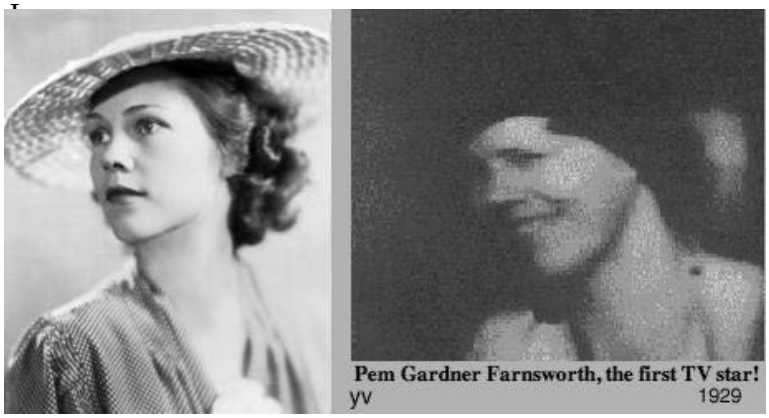
Il restait encore un très long chemin pour rendre le procédé opérationnel. Farnsworth s'était fixé une définition de 400 lignes, les systèmes électromécaniques ne dépassant pas 50 lignes. Mais début 1928, les dépenses elles, avaient dépassé le double de la limite accordée par les investisseurs, $ 60 000. Everson voulait faire une démonstration pour les rassurer, mais Phil hésitait.

Il la réalise cependant avec une définition de 60 lignes, en reproduisant un billet d'un dollar, suivi de la fumée de cigarettes. L'image comportait 8000 points, renouvelés 20 fois par seconde ; elle apparaissait sur un tube cathodique de 1,25 x 1,5 inches. Le San Francisco Chronicle du 3/09/1928 relatait : « *Deux avancées majeures en matière de télévision ont été annoncées hier par un jeune inventeur qui a développé un système fondamentalement différent de tout autre système en exploitation (Jenkins)… c'est une étrange petite image bleutée, souvent brouillée par des taches ou des zones floues, mais le principe de base est atteint et la perfection est maintenant un problème d'ingénierie.* »

Devant l'ampleur des dépenses à engager pour progresser, Roy Bishop, principal actionnaire, propose de vendre le brevet à de grosses sociétés, capables de développer l'invention, profitant ainsi rapidement d'un beau retour sur investissement. C'est ce que craignait Phil. Il savait qu'il y avait encore un long travail de perfectionnement qui permettrait d'accroître le portefeuille de brevets. Quand le système serait bien au point, un immense marché se présenterait et tous les fabricants viendraient demander une licence des brevets. Il convainquit, provisoirement, les bailleurs de fonds qu'ils auraient bien plus à gagner qu'en vendant maintenant.

Peu après un incendie ravagea tout le laboratoire qui renfermait des produits dangereux. Le *Lab Gang* remit rapidement tout en état. Cette équipe de 9 à 12 personnes très unies et motivées, formant le Lab Gang, travaillaient même la nuit.

Après des améliorations de clarté et l'augmentation du nombre de lignes, il présente en 1929 une image de 3,5 pouces, celle de sa femme Pem (yv). Ses yeux sont fermés en raison de l'éclairage très fort nécessaire. Ce problème d'une trop faible sensibilité nécessitant une très forte lumière restera le handicap du dissector. Il y avait trop d'électrons perdus, dits secondaires.



Il sera partiellement résolu par des améliorations successives, en particulier par un champ magnétique longitudinal en 1928, puis un multiplicateur d'électrons dont le brevet a été déposé le 3/3/1930 et publié le 7/8/1934 (yw) (4).

Espionnage

En 1930, un ingénieur de Westinghouse, Vladimir Zworzykin, demande à visiter le laboratoire de Farnsworth pour une éventuelle prise de licence, nécessitant une connaissance préalable approfondie du produit. Après trois jours de visite, il déclare à un tiers *« I wish that I might have invented it* ». Mais en quittant, il n'est plus question de licence. Peu après il est embauché par RCA. Farnsworth n'était probablement pas dupe de cet espionnage industriel, mais pensait que la protection par ses brevets récemment publiés était solide. Au départ du visiteur, le soir, il confie à Pem : peut-être j'en ai trop dit.

En effet, avec la radio puis la télévision, les électriciens devenus électroniciens devaient faire l'apprentissage du comportement très particulier des électrons dans les tubes à vide. Avec la radio, ils avaient déjà appris à maîtriser l'électricité à très haute fréquence dans les fils. C'est surtout ce savoir-faire, non mentionné dans les brevets, que tout pionnier essayait de ne pas communiquer ou d'acquérir.

L'année suivante, alors que Phil était parti voir au Bell Labs une nouvelle forme de césium, David Sarnoff, directeur de RCA, qui venait d'embaucher Zworzykin, demande à Everson de voir l'invention. Il lui propose l'achat de sa société pour $ 100 000, avec la collaboration de l'inventeur. Refus. Deux ans plus tard, RCA sortait un iconoscope conçu par Zworzykin.

En 1931 apparaissait l'opportunité de céder une licence à la petite société Philco Radio Corporation, en échange d'une aide aux progrès techniques en cours. Cela impliquait le transfert de l'équipe Farnsworth à Philadelphie pendant 6 mois, qui durèrent deux ans, avec des problèmes de fond, de fonctionnement et familiaux pour Phil. Cette association se termina par une rupture brutale pour des raisons financières.

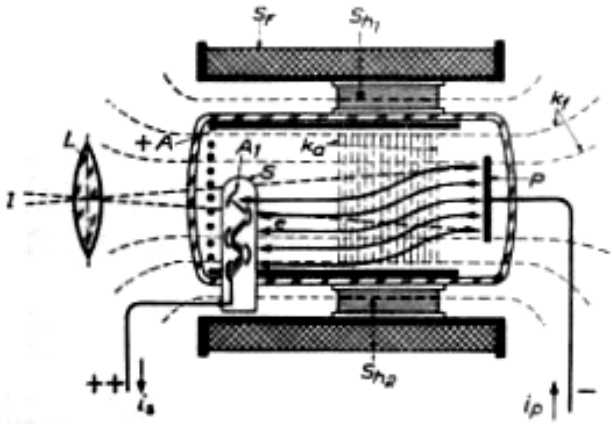
Farnsworth, en difficulté avec ses investisseurs, trouva en 1932 l'occasion inespérée de vendre $ 50 000 une licence hors d'Amérique, en Angleterre, à Baird dont le système électromécanique ne pouvait plus progresser.

yx1 Récepteur 1933 et tube dissector

Le succès

Sous le nom de Television Farnsworth Inc., la société reprit ses activités à Philadelphie. Le dissector s'améliorait avec divers perfectionnements concernant la sensibilité et la qualité de l'image jusqu'à 220 lignes (yx1), (yx2).

yy



yx2

Bien que Phil préférât travailler dans la discrétion, il accepte à l'été 1934 l'invitation du prestigieux Institut Franklin de Philadelphie de présenter une première démonstration publique mondiale de la nouvelle télévision électronique. Il rencontre Russell S. Turner, ingénieur et homme d'affaires qui s'intéresse à l'invention et financera la préparation du matériel adéquat.

Ce fut un réel succès ; la foule faisait la queue pour entrer pendant 15 minutes dans l'auditorium et voir les comédiens, athlètes, politiques ravis d'être « télévisés » en entrant par une première caméra (yy). Une seconde caméra filmait à l'intérieur. Le tout projeté sur des récepteurs (yz). La présentation était prévue pendant 10 jours, elle dura trois semaines.

yz Récepteur Farnsworth 1935

Des scientifiques venaient aussi de l'étranger, voir ce miracle dans le salon de Phil.

Tout cela stimulait son équipe, le Lab Gang, qui redoubla d'effort pour perfectionner au maximum le procédé et étoffer ainsi le portefeuille de brevets. En 1935, 32 brevets ont été déposés, dont 14 ont été pris au nom du chercheur de l'équipe l'ayant développé. Phil disait : je construis des hommes et non des gadgets.

Mais cette même année, la bataille juridique que lui avait déclarée RCA s'amplifiait (5). S'ajoutant à son travail, ces problèmes l'ébranlèrent, au bord de la dépression. C'était une stratégie des avocats de RCA qui en 1954 poussèrent au suicide Armstrong, inventeur de la modulation de fréquence.

En 1936, pour démontrer que le système était bien opérationnel, Phil aidé par Turner, construit un studio de télévision sur la colline de Wyndmoor, avec une antenne de 100 pieds permettant de couvrir Philadelphie. Il y avait même deux caméras de 441 lignes pour filmer les musiciens, chanteurs et danseurs.

La FFC accorda à la société une licence d'émission, n°W3XPF. Comme trois sociétés expérimentaient dans la région, Farnsworth, RCA et Philco, il y avait quelques dizaines de maisons équipées de récepteurs, chez les techniciens de ces sociétés. Le même phénomène des amateurs passionnés du début de la radio se reproduisait. Ils bricolaient leur récepteur de télévision.

Un article très élogieux parut dans l'hebdomadaire Colliers Magazine. Le service Paramount raconte l'histoire de l'homme qui a fait « *le rêve le plus fantastique de l'humanité sur le point de devenir une réalité.* »

En 1938, c'est la création à Fort Wayne, Indiana de *Télévision et Radio Corporation Farnsworth,* où Phil attendant que ses récents brevets soient accordés se lance dans d'autres recherches (za).

za Employees of Farnsworth Television and Radio, Fort Wayne, Indiana

Inventeur de la télévision

En mars 1939, c'est la fin du combat de David contre Goliath, les avocats de la puissante RCA capitulent et remettent discrètement à ceux d'un ancien paysan mormon de 33 ans un chèque de $ 3 millions pour une licence d'utilisation pendant 10 ans, de ses brevets concernant la télévision (6).

C'était la reconnaissance définitive de Farnsworth, inventeur de la télévision, que le tribunal avait déclaré dès 1934, sur laquelle RCA avait fait appel, mais perdu en 1936. En avril s'ouvre l'exposition universelle de New York où Sarnoff, devant le pavillon de RCA, déclare à la seule caméra de télévision de l'exposition :

« *Et maintenant nous ajoutons la vision au son* ».

Il pouvait enfin exploiter son iconoscope, antériorisé par les brevets de Farnworth.

Chacun des deux adversaires concluait avec ses propres règles de vie :

– Philo Farnsworth, avec l'esprit religieux des mormons : *Je sais que je n'ai jamais rien inventé. J'ai été un moyen par lequel ces choses ont été donné au savoir des hommes, aussi vite que le savoir pourrait les acquérir. Je donne tout le crédit à Dieu.*

– David Sarnoff, en buisenessman américain, avait fait une sérieuse entorse pour la première fois à sa règle d'or : *RCA ne paie pas de redevance de brevet, nous les recueillons.*

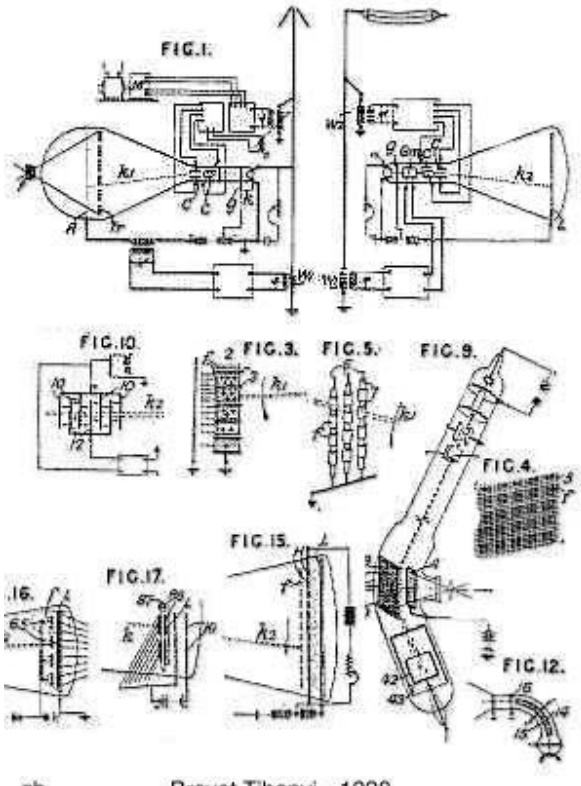
L'autre piste de télévision électronique.

Tihanyi

Ce physicien hongrois Kalman Tihanyi, inventeur productif, s'était aussi lancé sur un système de télévision tout électronique en 1926 qu'il breveta en 1928 en Allemagne, France et Angleterre, puis en Amérique. Le procédé adopté dans son Radioskop, inspiré par l'idée de Campbell Swinton, le précurseur, était une nette amélioration par rapport à celui-ci.

Le signal électrique envoyé au moment du balayage par le faisceau cathodique était plus puissant, par suite d'une accumulation de charges entre deux balayages. Ces charges résultaient d'électrons dits secondaires, phénomène parasite devenant utile (zb). Ce phénomène important fut ensuite dénommé stockage de charges.

Le dissector, procédé différent, utilisait directement comme signal électrique les électrons émis par le matériau photoélectrique. Il en résultait cependant un inconvénient, il nécessitait surtout au début, pour les scènes en studio, un très fort éclairage

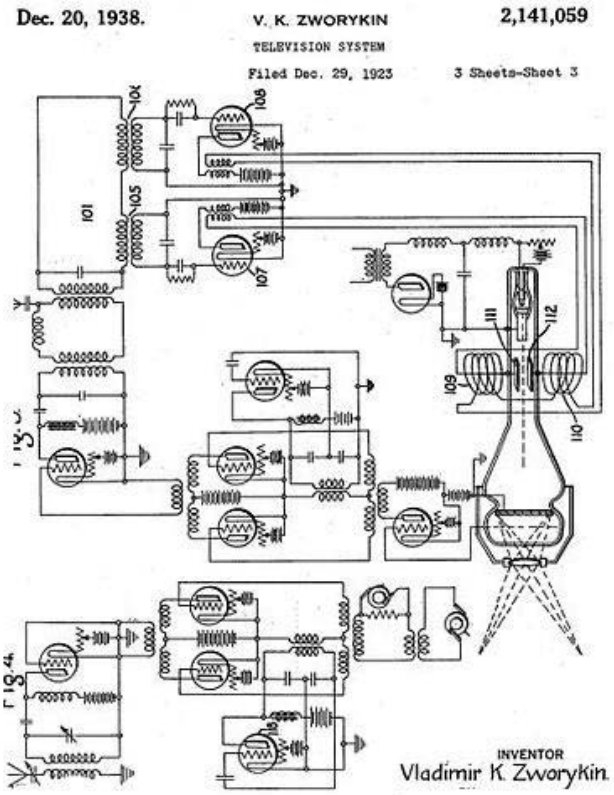


zb Brevet Tihanyi - 1928

que Farnsworth n'arriva pas à compenser complètement par des multiplicateurs d'électrons.

Bien que Tihanyi n'ait pas construit pas son appareil, les brevets du Radioskop étaient très approfondis et faisaient espérer qu'il pourrait fonctionner. Aussi il le présenta en Allemagne à Telefunken où il fut apprécié, mais sans encore remplacer le système Nipkow. Par contre un groupe de deux petites sociétés Loewe et Ferseh A.G. acquirent la licence.

En 1930, Zworykin adopta ce principe pour développer l'iconoscope, ce qui contraignait RCA à acquérir à terme une licence du brevet.



zc Brevet Zworykin 1923, accordé 1938

Zworykin

Le professeur russe Rosing avait eu comme élève, Vladimir Zworykin, avec qui il avait réalisé un système de télévision mixte, transmetteur à roues de Weiller, récepteur à tube cathodique.

Après la révolution de 1917, Rosing disparut et Zworykin émigra aux Etats-unis en 1919, travailla au laboratoire de Westinghouse en 1920 pour chercher un procédé d'analyseur d'image électronique pour la télévision. En 1923, il dépose un brevet, mais il n'est pas accordé après examen en raison d'antériorités, en particulier celle de l'Anglais Campbell Swinton. Or les années passent et Zworykin n'arrive pas à faire fonctionner son idée. Pourtant, dans cette grande société, il disposait pour ses recherches de techniciens compétents, de laboratoires bien équipés et de budgets adaptés. On n'a pas de trace du principe exact adopté, car ce brevet de 1923 n'a pas été accordé, mais modifié et divisé en deux en 1931, pour être finalement accordés en 1935 et 1938 (zc).

Finalement, en 1925, il prend aussi un autre brevet d'un système un peu différent de celui de Swinton. Le matériau photoélectrique était une couche d'hydrure de potassium en grains isolés électriquement et le faisceau électronique balayait cette couche à l'arrière.

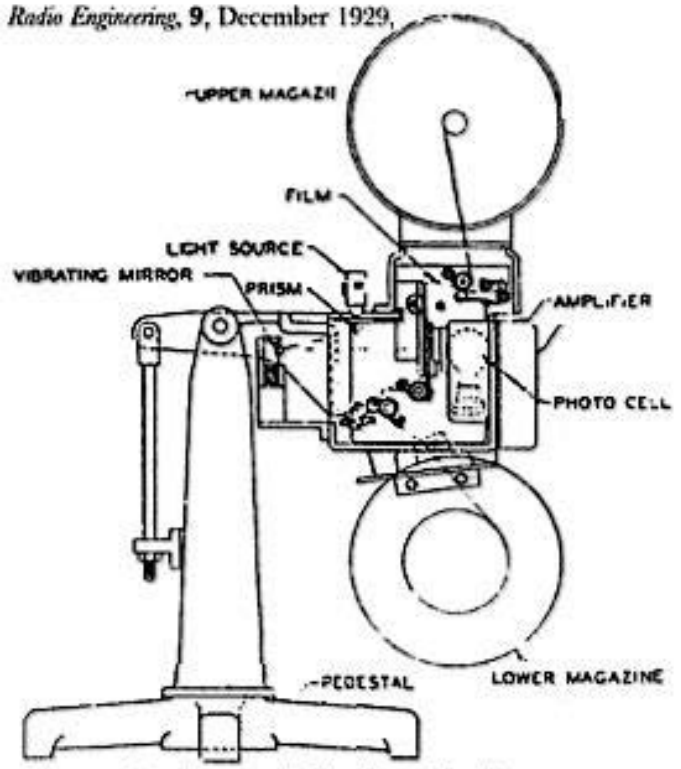
Le vice président S. M. Kintner l'incite à présenter ce système, même imparfait, au directeur de Westinghouse, C. M.. Davis. On apercevait l'image floue et pâle d'un crayon. Celui-ci suggérera à Kintner « *qu'il travaille sur quelque chose d'utile* ». On lui confia un nouveau domaine de recherches, la reprographie.

Après un voyage en France pendant l'été 1928, Sarnoff de RCA revient convaincu de l'avenir proche de la télévision. On lui avait présenté les expérimentations sur les tubes cathodiques réalisées par E.Belin, F.Holweck et A.Dauvillier. Il situe à quatre ou cinq ans dans un article du New York Times, l'invention d'un oeil électrique pour observer le monde.

Sachant que Zworykin avait travaillé sur ce sujet, il l'incite à se rendre à Paris. Celui-ci découvre au Laboratoire des Etablissements Belin les spécialistes qui lui montrent l'importance de la focalisation des faisceaux d'électrons par bobines électromagnétiques et plaque électrostatiques, afin d'obtenir une grande finesse des détails. Ils utilisent pour ces essais un tube tout métallique démontable et une pompe à vide rotative fonctionnant en permanence. Il réussit à en acheter un exemplaire qu'il rapportera en Amérique.

À son retour, Il fait part à Kintner de ses impressions et propose de reprendre et d'accentuer les recherches pour la télévision. Il doit en parler à Sarnoff. L'entrevue a lieu en janvier 1929. Celui-ci pressent bien que la télévision va être un marché aussi prospère que la radio. Le renforcement du groupe de chercheurs coûterait $100 000 sur deux ans. Zworykin arrive à le convaincre. Un accord intervient entre Westinghouse et RCA pour lui donner un staff technique étoffé avec les meilleurs de chaque spécialité.

Plutôt que d'attaquer le problème majeur, l'analyseur d'image, Zworykin met au point dans l'année un récepteur basé sur le tube cathodique, le kinéscope. Pour faire une démonstration, un émetteur était nécessaire ; précisément Westinghouse avait développé un système électromécanique capable de *scanographer* un film de cinéma, solution pratique qui sera aussi adoptée par d'autres, Telefunken et Baird. C'était un projecteur de cinéma transformé utilisant à la place de miroirs tournants, un miroir vibrant à 480 HZ (zd).



zd Analyseur de film à miroir vibrant

La démonstration eut lieu en novembre 1929 au meeting de l'Institute of Radio Engineers. Sarnoff apprécia et proposa de l'intégrer au nouveau centre de recherches de Camden dans le New Jersey. Mais en faisant avant un détour sur San Francisco pour voir où en était le procédé du jeune Farnsworth, sous prétexte de solliciter une licence pour Westinghouse. L'épisode d'espionnage a été relaté.

Une fois intégré à RCA, début 1930, il apprend la publication du brevet américain de Kalman Tihanyi, en comprend vite l'importance et pourquoi il avait échoué en 1925. Il a dû en parler à Sarnoff qui entame des pourparlers d'achat, mais attend que l'équipe de Zworykin arrive à un résultat en l'exploitant, soit 2 à 3 ans. RCA dépose alors en 1930, 31 demandes de brevets US sur des procédés de télévision basés sur ce stockage de charges ; aucun n'a été accepté, étant antériorisés par celui de Tihanyi déposé en 1929, accordé en 1939.

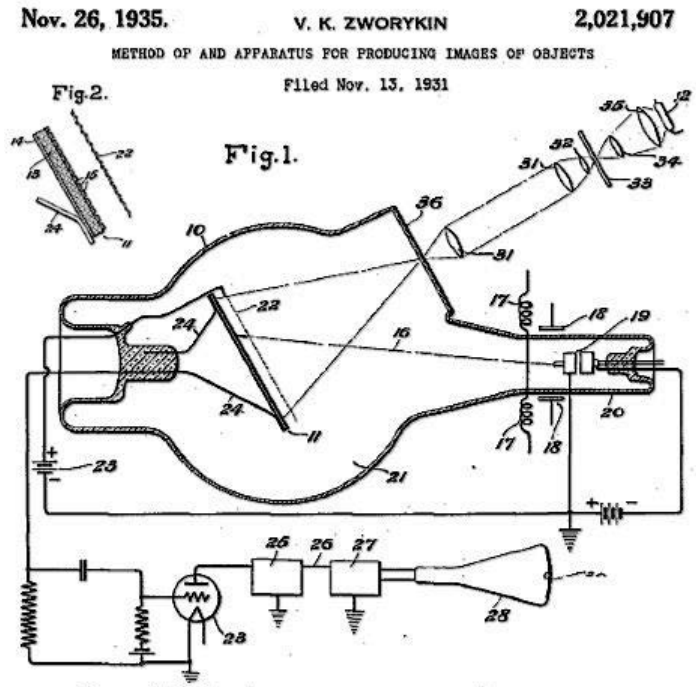
Quel acharnement, travail et coût ont demandé ces dépôts par des spécialistes en essayant de tourner le brevet du Hongrois. L'enjeu en valait la peine. Mais dans les années suivantes, RCA fit le silence sur cet apport essentiel à la réussite du futur iconoscope. Il n'eut pas à en acheter la licence, l'obtenant par EMI.

Ainsi, Zworykin se trouvait très bien armé pour résoudre son invention d'un analyseur d'image de télévision, au moins aussi performant que celui de son prédécesseur Farnsworth. Il avait compétence et expérience, une forte équipe de chercheurs, des éléments sur la maîtrise complexe des faisceaux cathodiques obtenus en France et à San Francisco et surtout une solution toute tracée qu'il fallait cependant valider, n'ayant jamais été réalisée. Ajoutons l'essentiel, pas de soucis financiers.

L'iconoscope

En 1931, il dépose un premier brevet de l'iconoscope, mais étrangement appliqué à un microscope électronique, pas à la télévision. Sans doute un subterfuge pour échapper aux refus de

l'année précédente. Il sera accordé en 1935. Dans cette version, il y avait une multiplication des grains de matière photoélectrique. (ze)


Nov. 26, 1935. V. K. ZWORYKIN 2,021,907

METHOD OF AND APPARATUS FOR PRODUCING IMAGES OF OBJECTS

Filed Nov. 13, 1931

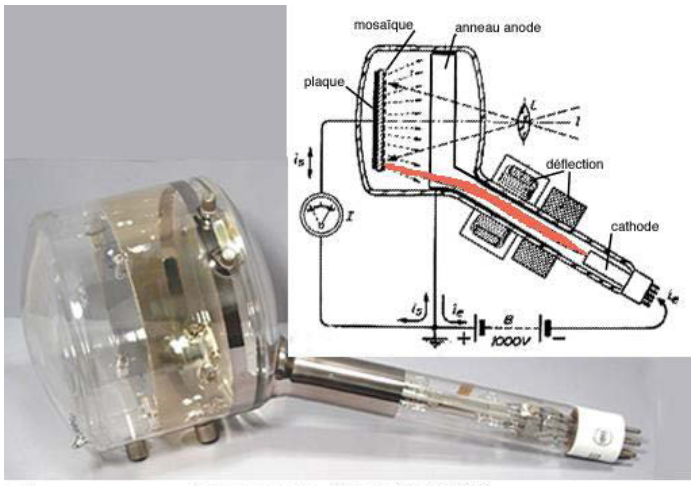
Fig.2.

Fig.1.

ze Brevet 1931 - iconoscope pour microscope

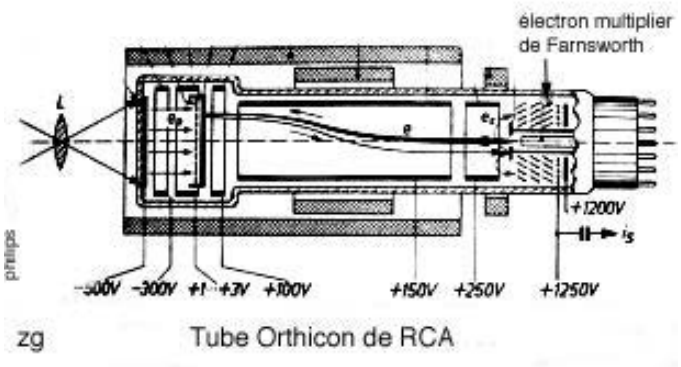
Principe de l'iconoscope

L'image est projetée sur une plaque isolante revêtue d'une mosaïque de grains de matériau photoélectrique, isolés électriquement entre eux. Une plaque conductrice commune est située sur l'autre face de la plaque isolante. Chaque grain se comporte avec la plaque commune comme un mini-condensateur, qui se charge positif pour chaque électron qu'il émet, en nombre proportionnel à l'éclairement reçu. Un faisceau d'électrons émis par une cathode balaye les grains séquentiellement, ligne par ligne, et décharge ainsi chaque condensateur qui envoie son signal électrique à la sortie. Le signal envoyé au moment du balayage par le faisceau cathodique était renforcé, par une l'accumulation de charges entre deux balayages. Ces charges résultant de l'action d'électrons dits secondaires, principe du stockage de charge



L'iconoscope opérationnel est présenté à la presse en 1933. Un article technique parait dans Wireless World. Le New York Times titre : *L'œil semblable à l'humain par les ingénieurs télévise les images*. L'iconoscope convertit des scènes en électricité pour les transmettre par radio. Développé par un travail de 10 années du Dr V. Zworykin, qui le présente à Chicago (zf). Plus sensible que le dissector son prédécesseur, il deviendra pratiquement le plus utilisé jusqu'à son remplacement par l'Orthicon en 1946 (zg).

Mais RCA ne peut pas le commercialiser, l'invention étant antériorisé aux USA par les brevets du radioskop de Tihanyi et surtout du dissector de Farnsworth. Sarnoff obtiendra la licence du radioskop en 1935, par échange avec sa filiale EMI en Angleterre qui l'avait elle-même acheté à Tihanyi.



zg Tube Orthicon de RCA

Par contre, pour le dissector, il prévoit que le prix sera beaucoup plus élevé et préfère attendre. Commer-cialement, il n'est pas pressé car cela ferait réduire trop tôt le marché de la radio, sur lequel il gagne encore de confortables redevances, jusqu'à la tombée des brevets dans le domaine public.

Aussi, il déclencher contre Farnsworth une guerre juridique d'usure de 5 ans (5). Déposer des brevets de détails qui seront refusés, mais font perdre temps, argent et santé à l'attaqué.

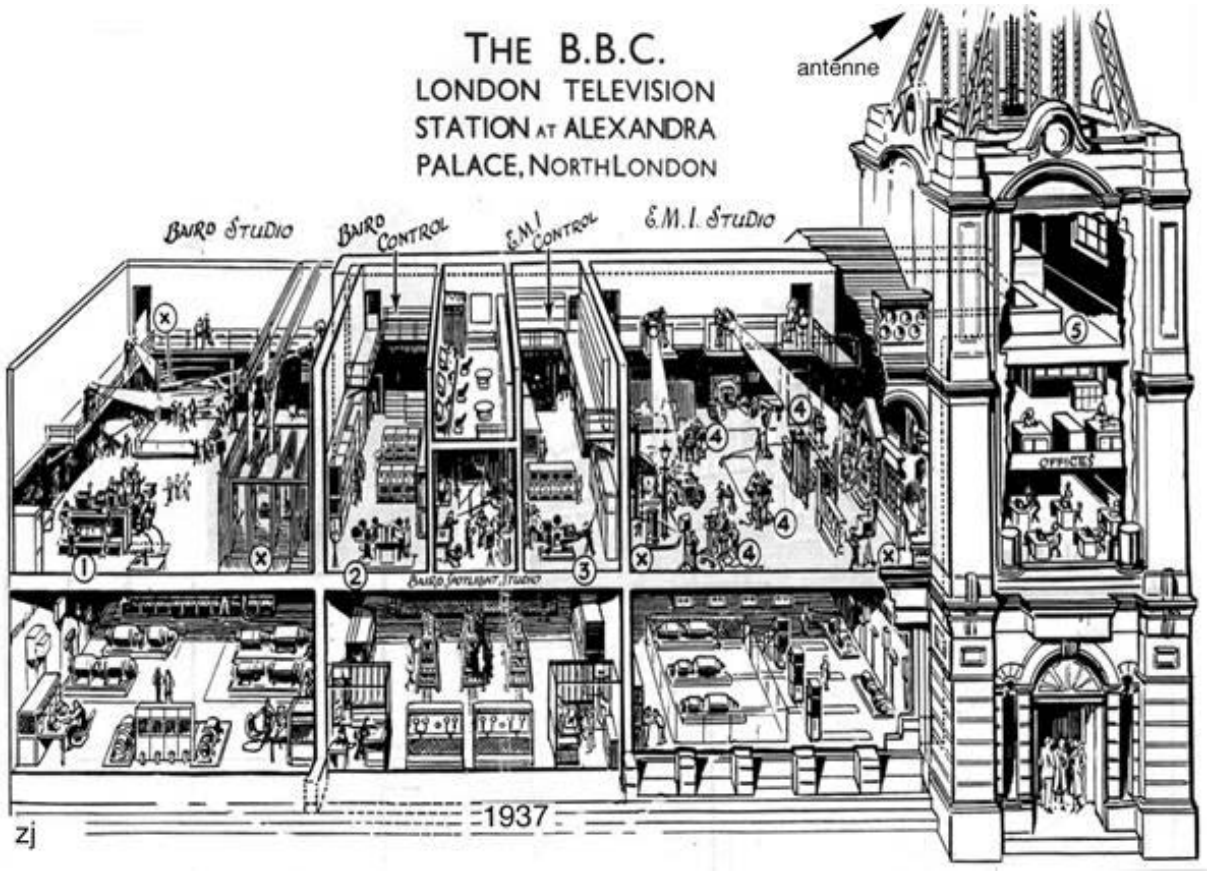
Mais si l'iconoscope n'est pas produit en Amérique avant 1939, il le sera en Angleterre dès 1936, sous forme d'une variante, *l'émitron.*

Emitron

Isaac Shoenberg, émigré russe, était arrivé en Angleterre en 1914 et travailla à la Marconi Telegraph Company. Puis passionné de musique, il s'engagea en 1931 à EMI, *Electrical and Musical Industries Ltd,* fusion des sociétés de disques qui voulaient se lancer dans la télévision électronique et Shoenberg rassembla une équipe qui arriva à un résultat moyen en 1932. Mais les progrès restaient décevants.

En 1934 EMI s'associe à Marconi Telegraph pour former Marconi-EMI, qui bénéficiait ainsi de l'aide de son actionnaire majoritaire RCA, sous forme d'un échange croisé de brevets et recherches. Marconi-EMI put ainsi développer son propre iconoscope, baptisé Emitron. Elle devait alors obtenir une licence du brevet Tihanyi, l'une des bases de l'iconoscope. L'achat fut conclu à Budapest début 1935. Cette opération permit par surcroît à Sarnoff de l'obtenir indirectement pour RCA sans débourser. Il y eut quelques dissensions internes, chaque société prétendant être le père de l'Emitron. Deux collaborateurs Tedham et McGee déposèrent cependant le brevet de l'Emitron début 1936, accordé en 1937.

Lorsque la BBC ouvrit en novembre 1936 le premier grand studio de télévision d'Alexandra Palace, les deux opérateurs choisis comme les meilleurs, Baird et EMI avaient chacun leur propre installation et studio (zj). Avec ses 405 lignes en électronique, EMI dominait son concurrent qui disparut rapidement, comme déjà relaté.



C'est sur le sol anglais que la télévision avait débuté avec la mise au point avancée du système électromécanique Baird. Sur ce sol, se concrétisa aussi la maturité du système électronique, développé aux Etats-Unis.

La guerre survint, et la technique de la télévision attendit quelques années, prête pour le développement industriel et commercial que nous connaissons.

Compléments

0 - Bibliographie

Wikipedia, english de préférence.

ABRAMSON ALBERT, *L'histoire de la Télévision 1880/1941,* Jefferson NC, 1987

BURNS R.W. *Television an international history of the formative years*, Institution of Electrical Engineers, London, 1998.

GEORGE SHIERS, *Early Television : A Bibliographic guide to 1940*, ed. Taylor & Francis, 1996.

1-Télévision en France :

Wikipédia, w.819lignes.free.fr/Histoire_de_la_television_francaise.html

2 - Philo Farnsworth

Biographie générale et brevets : http://en.wikipedia.org/wiki/Philo_Farnsworth

Farnsworth, New York, WW Norton & Co.

PAUL SCHATZKIN - *The boy who invented Television. The Farnsworth Chronicles* :

www.farnovision.com/chronicles/Brevets : Il aurait déposé, suivant les sources, 160 à 200 brevets, les ¾ sur la télévision.

Opinion du couple sur l'intérêt de la télévision : Pem pensait que la télévision servirait à l'instruction, qu'elle rapprocherait les peuples et éviterait les guerres. Dans les années 50/60, quand la télévision s'adaptait au plus petit dénominateur moyen, devenait trop commerciale, avec la publicité, Phil se demandait si toute l'énergie qu'il avait dépensée valait la peine. Une nuit de juillet 1969, assis a coté de Pem, ils regardaient ce que le monde entier pouvait aussi regarder, beaucoup grâce à eux, l'homme sur la lune. Sans triomphe personnel, il a regardé Pem et lui dit : Cela valait la peine.

3 - Dissector - Les allemands Dieckmann et Rudolph Hell avaient conçu un appareil sur ce principe, breveté en Allemagne, en avril 1925, publié en octobre 1927. Un appareil a été construit, mais n'a pas fonctionné, car Hell ne maîtrisait pas bien l'optique électronique qui guidait les rayons d'électrons dans le vide. Farnsworth ne pouvait pas connaître cet appareil, dénommé Bildzerlegerrôhre, tube fragmenteur d'image. De même on peut regretter, après coup, qu'il n'ait pas connu le procédé imaginé par Swinton, et que son concurrent Zworykin a exploité pour arriver plus tard au système de l'iconoscope, nécessitant moins d'éclairage pour le sujet à filmer.

4 b–Zworykin

- Wikipédia : en.wikipedia.org/wiki/Iconoscope

- ABRAMSON ALBERT, *Zworykin, pionnier de la télévision* . University of Illinois Press, 1995.

4 - Emission secondaire d'électrons

Ce phénomène parasite « d'émission secondaire » dans les tubes à vide fut exploité pour en faire un « multiplicateur d'électrons » et amplifier le signal de sortie. Il a été étudié en 1918 par Hull au laboratoire de Général Electric qui créa sur ce principe le Dynatron, et ensuite le magnétron, tube à champ magnétique axial extérieur, générateur de micro-ondes, pour radar, fours etc. De même par le Hongrois Kalman Tihanyi en 1928.

Le procédé de Farnsworth était différent, il a été breveté le 3/3/1930 et accordé en 1931. Après perfectionnement, il devint le multipactor, capable d'une amplification de 60 fois.

5- Batailles juridiques

À partir de 1932, David Sarnoff, dirigeant de RCA, plus grosse société américaine de radio, veut s'assurer que le dissector ne va pas le gêner pour le développement de l'iconoscope en cours. Il dispose d'une forte équipe juridique rodée aux batailles de brevets.

Farnsworth s'en remet à son seul avocat, ingénieur, Lippincott.

RCA commence par faire état que le premier brevet de Farnsworth de 1927, accordé en 1930 est antériorisé par celui de Zworykin de 1923. Or celui-ci n'a pas été accordé (antériorité de Swinton) puis modifié et séparé en deux en 1931, accordé enfin en 1938, malgré l'opposition de l'Office des brevets. De plus, il n'y a aucune preuve matérielle ni écrite ou témoignage que l'appareil de Zworykin ait fonctionné avant 1931, donc après 1927.

La stratégie des ces commandos juridiques est de prendre du temps à l'adversaire qui doit répliquer, l'épuiser sur le plan santé et financier pour payer ses propres avocats. De même faire appel, ce qui donne 16 mois d'attente, puis refaire un autre procès avec d'autres arguments.

Farnsworth passait de nombreuses semaines pour répondre à une inondation sans fin de questions posées par une batterie des plus grands avocats de RCA avec des armes légales. Chaque paquet de documents remis signifiait une semaine pendant laquel Farnsworth était en dehors de son laboratoire.

Le point le plus important que RCA n'a pas réussi à contredire était la revendication n°15 du brevet du dissector : « *Un appareil de télévision qui comprend un moyen pour former une image électrique, et des moyens de balayage pour chaque zone élémentaire de l'image électrique, et des moyens pour produire un flux d'énergie électrique en fonction de l'intensité de la zone élémentaire de l'image en cours de balayage électrique.* »

Finalement en 1934, après des pages de discours juridique, la décision se termina par une déclaration sans équivoque: « *La priorité de l'invention est attribuée à Philo T.Farnsworth* ». RCA fit encore appel et fut débouté en 1936. Mais le plus dangereux pour RCA était que ses avocats découvrirent que des éléments importants dans l'étude en cours du futur Orthicon étaient couverts par des brevets Farnsworth. Sarnoff comprit alors qu'il lui fallait capituler, solution contraire à ses principes financiers. En mars 1939, il faisait remettre discrètement $ 3millions à l'avocat de Farnsworth. Tous les industriels américains savaient que dans les années 20 et 30, il était pratiquement impossible de fabriquer tout type d'appareil radio sans payer de redevances sur les brevets de RCA, qui comprenaient la plupart des éléments de la technologie des tubes à vide. RCA comptait poursuivre cette stratégie pour la télévision.

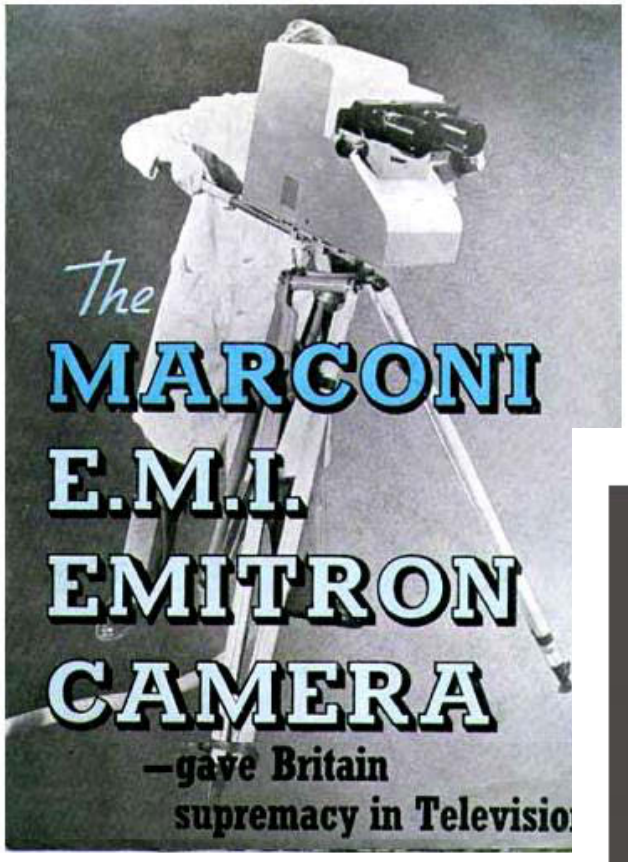
Aussi, cette décision attira à Farnsworth beaucoup de sympathie et de propositions concrètes d'appui. Le petit paysan pauvre ayant vaincu le grand ogre capitaliste qui voulait le spolier. Un bon thriller : www.farnovision.com/chronicles/tfc-who_invented_what.html

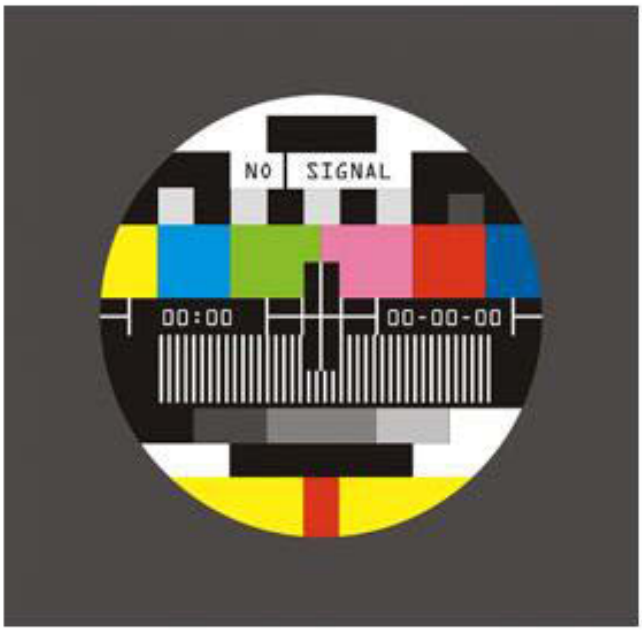
Cet épisode d'histoire industrielle a d'ailleurs fait l'objet d'une pièce de théâtre à Broadway en décembre 2007 : The *Farnsworth Invention.*

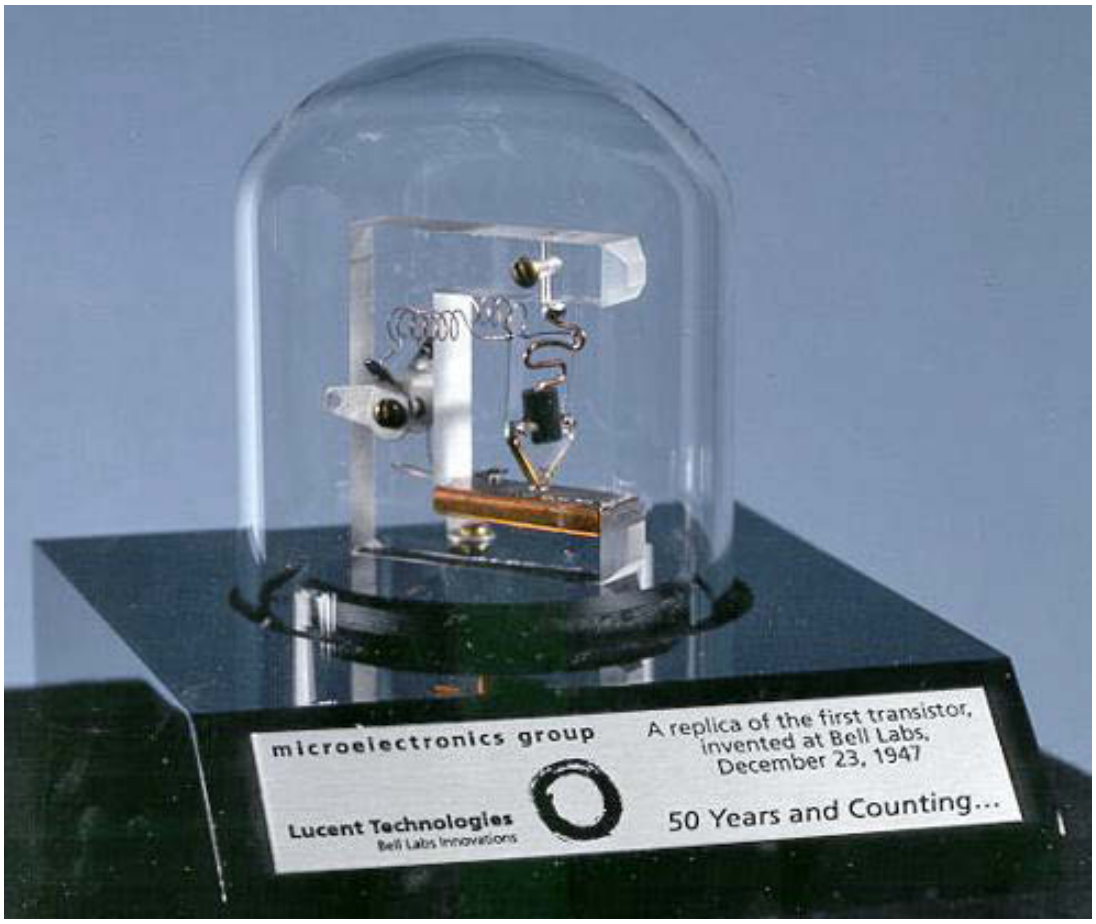
Ajoutons ci-après la photo de ce couple de chercheurs dont l'aventure attire la sympathie (zk), l'inventeur de la télévision. Cas rare dans l'histoire de l'électricité, ou l'on peut considérer une personne, ou un couple, comme le véritable et seul inventeur.

6 - RCA n'aurait pas versé 3 M$ mais 1 M$, d'après d'autres sources. C'est peu plausible car la somme dépensée par Farnsworth serait un peu inférieure à 1 M$. Celle dépensée par RCA avant l'accord serait de 10 M$. En valeur 2010 il faudrait multiplier par 50 par rapport à l'or. Farnsworth ne profita que d'une partie de cette somme, dont une autre partie revenait à ses investisseurs qui attendaient depuis 12 ans, une autre pour les avocats.

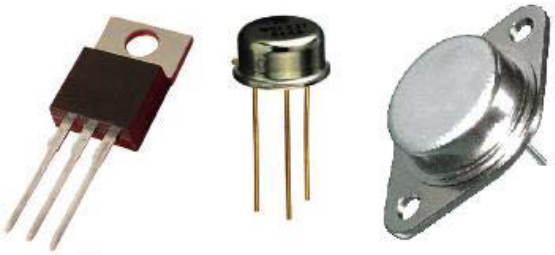
zk-The Famous Inventor and His Wife
from Collier's Weekly, October 1936

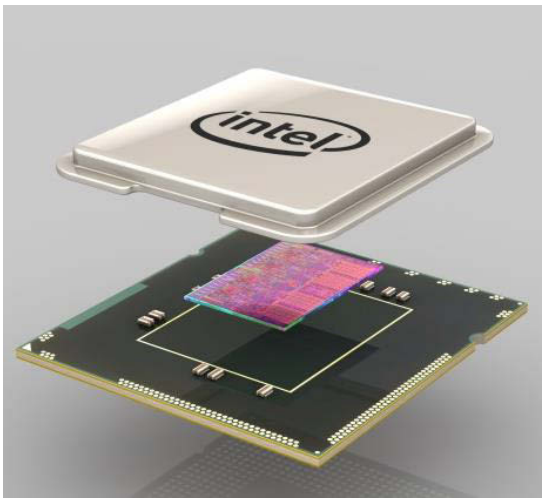





microelectronics group
Lucent Technologies
Bell Labs Innovations
A replica of the first transistor, invented at Bell Labs, December 23, 1947
50 Years and Counting...

SEPTEMBER · 1948
electronics
Revolutionary Amplifier
The CRYSTAL TRIODE




intel

7 - Effet transistor - Semi-conducteurs

L'homme a conservé sa pensée d'abord sur l'argile, la pierre, puis le papier, le parchemin, récemment sur des supports magnétiques, maintenant sur le silicium, extrait de la silice du sable.

Septième découverte fondamentale de l'électricité, en 1948, celle de l'effet transistor dans les semi-conducteurs appartient à la catégorie des recherches conduites dans un objectif précis, contrairement à la majorité des précédentes découvertes. Cette découverte des 3 chercheurs des *Bell Labs*, récompensée par un prix Nobel, a entraîné simultanément l'invention d'un nouveau composant dénommé transistor, dont les redevances sur les brevets ont été les plus élevées de l'époque.

Le premier objectif atteint, remplacer les tubes à vide, fut rapidement dépassé par une vague d'inventions, dont le flot semble à peine se tarir depuis soixante ans.

Les précurseurs

Cristaux semi-conducteurs

Les premiers semi-conducteurs observés, leur nom n'existant pas encore, étaient des corps et cristaux à la fois isolants et conducteurs dont la conduction électrique ne suivait pas celle des métaux et avait la particularité d'être souvent unilatérale, c'est-à-dire ne conduire le courant que dans un sens. D'où leur emploi au début comme redresseurs de courant alternatif HF, pour la détection des ondes de la radio.

Braun avait étudié cette conduction particulière dès 1874, sans intérêt à l'époque, mais en 1899 il breveta un détecteur radio à cristal. Pickard proposa aussi le silicium, Bose la galène, un sulfure de plomb. Nous savons le succès qu'eut la galène pendant longtemps, pour les premiers récepteurs radio (V-5).

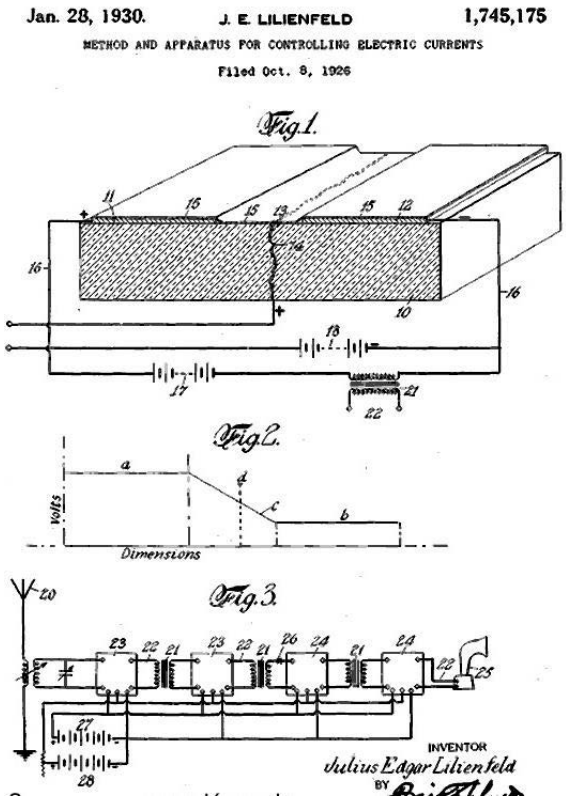
Cependant le plus ancien connu, le sélénium, avait la propriété particulière de générer de l'électricité en fonction de la lumière reçue. Étudié par l'Anglais Smith en 1873, Bell basa sur ce composant en 1876, un premier photophone optique : la voix faisait vibrer un miroir réfléchissant la lumière du soleil. À 20 m plus loin, la lumière captée éclairait une cellule au sélénium qui la traduisait en courant transformé en son par un écouteur de téléphone.

Siemens réalisa en 1885 un photomètre au sélénium longtemps utilisé en photographie jusqu'aux années 1960, mais pour générer un courant photoélectrique appréciable, il fallut attendre le silicium.

Premières recherches

L'objectif pendant les années 1920/30 était de trouver des éléments à l'état solide, capable de remplacer la lampe triode à vide dans ses différentes fonctions, d'abord l'amplification. Ses inconvénients étant la fragilité, le coût et la consommation d'énergie. Plus tard, vers 1935, un objectif plus ponctuel a été le remplacement des commutateurs électromécaniques des centraux téléphoniques en cours d'automatisation par des matériels plus fiables.

Probablement l'un des premiers chercheurs sur ce problème, Julius E. Lilienfeld, physicien allemand ayant émigré aux Etats-Unis, dépose en 1926 un premier brevet US, *Méthode et appareil pour la commande des courants électriques* (a), suivi d'un deuxième en 1928.


Jan. 28, 1930. J. E. LILIENFELD 1,745,175

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Filed Oct. 8, 1926

Fig.1.

Fig.2.

Volts

Dimensions

Fig.3.

INVENTOR

Julius Edgar Lilienfeld

BY

L'étonnant est qu'il décrit pratiquement ce que l'on appela en 1959 la technique MOS, le transistor à effet de champ, le contrôle du flux de courant par couplage capacitif à une électrode. Deux autres brevets suivent, auxquels s'ajoute celui d'un condensateur électrolytique, composant qui deviendra essentiel en électronique.

En 1934 le physicien O.Heil dépose aussi un brevet sur un amplificateur à semi-conducteur.

Il n'y a pas de preuve qu'ils aient fonctionné, d'autres l'ont probablement aussi essayé, mais sans succès. L'idée est venue trop tôt et un brevet qui n'a pas été suivi de réalisation opérationnelle n'a pas grand intérêt pratique, ni valeur commerciale.

À la recherche d'une théorie

Quand un appareil, basé sur un principe juste, ne marche pas, les raisons sont parfois subtiles. Dans ce cas, les chercheurs ayant compris, à peu près, dans les années 1920 le comportement des électrons dans le vide des tubes, ont dû dans les années 1930 découvrir le comportement très différent des électrons dans les semi-conducteurs. Par exemple la notion un peu surprenante de trou, absence d'un électron, qui se déplace aussi.

Le physicien Pauli estimait qu' « *on ne devait pas travailler sur les semi-conducteurs, c'est une sale histoire, qui sait si les semi-conducteurs existent* ».

Pourtant l'Anglais Alan Wilson publie en 1931 deux articles sur « *La théorie des semi-conducteurs électroniques* », en y adaptant la mécanique quantique. Il estime que leurs propriétés particulières sont dues à la présence d'impuretés dans les cristaux très purs. L'avenir confirmera cette hypothèse.

Des explications satisfaisantes sur le redressement du courant sont apparues en 1938, suite aux recherches du russe Davydov, de l'Anglais Mott et de Walter Schottky de Siemens.

En étudiant en 1940 un redresseur au silicium pour détection des micro-ondes de radar, deux chercheurs des Bell Labs, Russell Ohl et Jack Scaff constatent qu'il y avait une séparation dans une dalle, plaquette de silicium, deux régions contenant des impuretés différentes. Une impureté de phosphore donnait un excès d'électrons, l'autre avec du bore donnait un manque (trou). Ils ont dénommé ainsi les régions N, négative et P, positive. La séparation, barrière où se réunissent ces régions est devenue la jonction PN. Le choix du phosphore comme impureté avait été fait dans la cinquième colonne de la classification Mendeleïev, celui du bore dans la troisième.

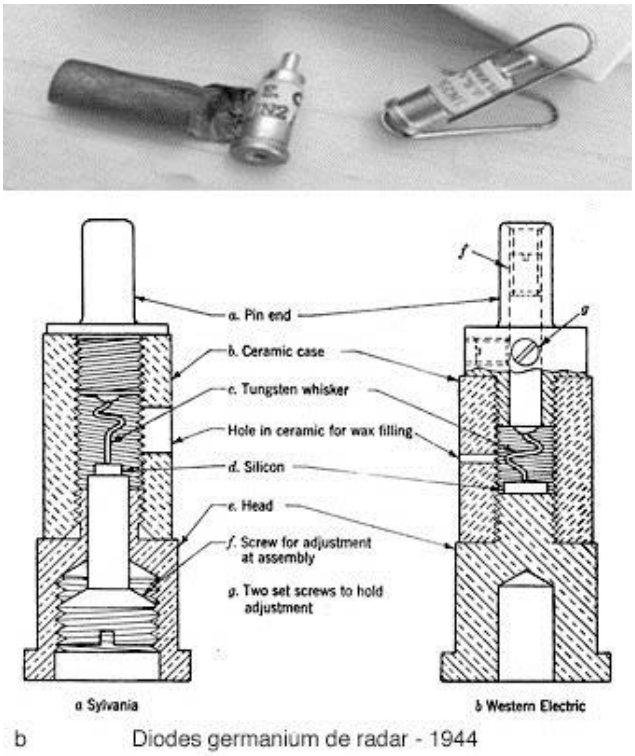
Simultanément ils découvraient que si de la lumière éclairait cette jonction, un courant s'établissait entre N et P par effet photoélectrique. Cela a donné la cellule photoélectrique, devenue photovoltaïque. Cette jonction est devenue le cœur des redresseurs à semi-conducteurs et a guidé la conception du transistor à jonction de Shockley en 1948.

WW2, comme toute guerre, va faire fortement progresser les techniques, dont celle de la production du germanium et du silicium de très haute pureté, ainsi que la méthode de dopage P ou N. Ces diodes-redresseurs étaient nécessaires aux très hautes fréquences des micro-ondes pour radars (b). Les premiers radars anglais ont été l'arme défensive nouvelle qui a sauvé la Grande-Bretagne de l'invasion aérienne, en 1940 (2).

William Shockley des Bell Labs déclarait en 1939 « *Il est envisageable que l'amplificateur utilisant les semi-conducteurs au lieu du vide est en principe possible* ».

Les chercheurs se retrouvaient dans une situation comparable avec celle du début du siècle avec une diode à vide dont le fonctionnement était maîtrisé. Une dizaine d'années furent nécessaires pour que l'on ajoute sur le parcours des électrons une vanne de réglage, la grille, pour en faire la triode amplificatrice ; il suffisait d'un faible signal de tension sur la grille pour réguler le fort courant traversant la diode. Mais la différence était que la circulation des électrons dans le vide était plus facile à comprendre que dans un semi-conducteur, cet état solide de la matière, aussi différent d'un conducteur que d'un isolant.

Le raisonnement des chercheurs a donc été de simuler une grille en injectant des électrons par une électrode dans la barrière séparant la zone P de la zone N.

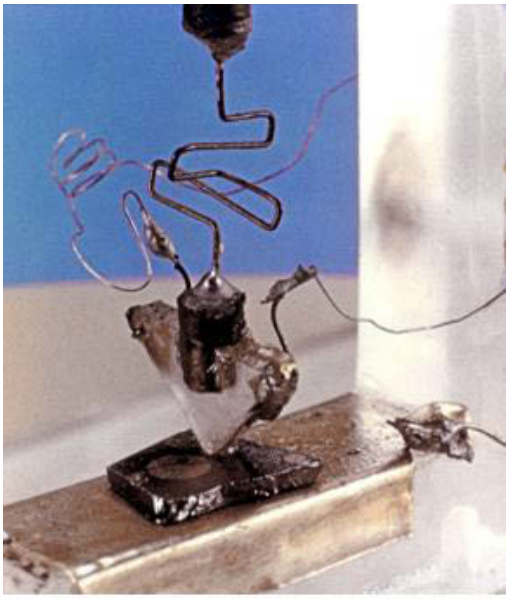


b Diodes germanium de radar - 1944

Transistor à pointes

À son retour aux Bell Labs après des missions pour la guerre en 1945, Shockley constitue un groupe de recherches sur la physique de l'état solide, les semi-conducteurs. L'essai d'un amplificateur *« à effet de champ »* au silicium ne donne pas de résultat. John Bardeen pense que les électrons à la surface peuvent bloquer la pénétration du champ dans le semi-conducteur et avec Walter Brattain ils étudient alors les états de surface.

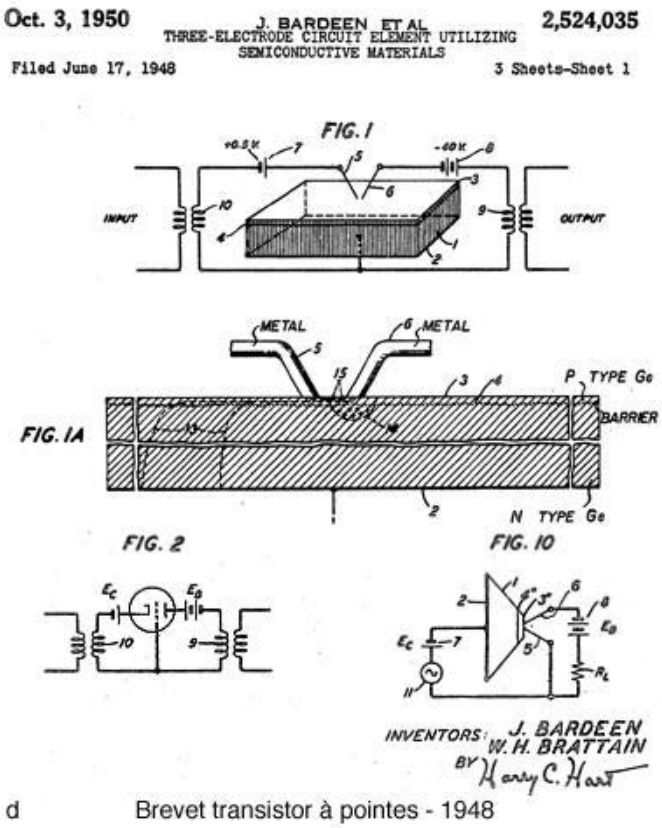
Le 16 décembre 1947, un premier amplificateur fonctionne avec une amplification de 15. Dispositif rustique, lent et instable, il dérive des diodes à pointe de radar. On rapporte que les chercheurs effectuaient une mesure du champ de potentiel autour d'une pointe, quand un effet amplificateur apparut si la distance entre les deux pointes devenait très faible, moins d'un mm. La pointe de la diode produisait l'équivalent d'une petite zone dopée entourant sa zone de contact. Après étude de cet effet, ils ont réalisé un prototype à partir d'un monocristal de germanium. On y retrouve les électrodes de sortie en forme de cats whiskers, les moustaches de chat des célèbres diodes à galène de radio (c).



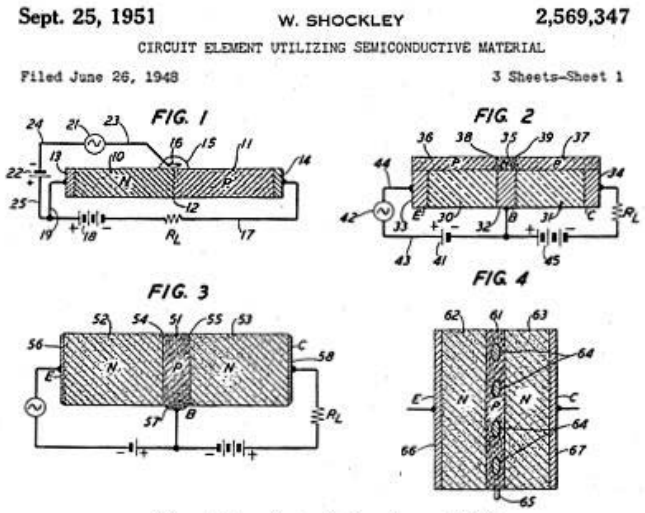
c premier transistor - 1948

La présentation de l'invention en interne eut lieu le 23 décembre, un beau cadeau de Noël, mais la conférence de presse n'eut lieu que le 30 juin 1948, car le brevet ne fut déposé que le 17 juin (d), et le 26 juin Shockley déposait aussi un brevet sur autre type de transistor à jonction (e).

Comme pour les grandes découvertes, l'intérêt du public fut réduit à quelques journalistes présents. Les inventeurs savaient cette fois l'importance de leur découverte, mais restaient conscients des longs progrès à faire avant d'envisager son utilisation pratique.



d Brevet transistor à pointes - 1948



e Brevet transistor à jonction - 1948

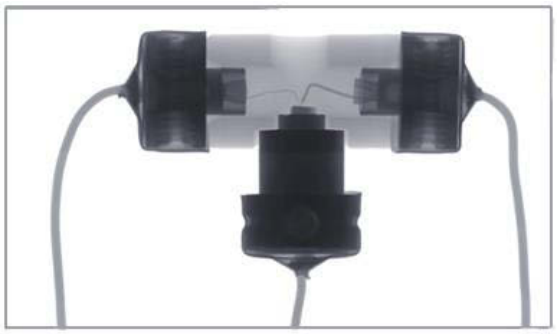
Transistron

C'est le nom d'un autre transistor à pointe qu'ont développé deux physiciens allemands dans la filiale Westinghouse française en 1947/48, en parallèle avec les Américains de Bell, tout en les ignorant probablement.

Ils faisaient parti des scientifiques et techniciens allemands, récupérés après la guerre par les Alliés, au titre de réparation intellectuelle des dommages de guerre. Le plus connu étaient von Braun, devenu le père des fusées spatiales américaines.

Tous deux avaient été impliqués dans les études des radars allemands. Herbert Mataré développait les redresseurs germanium et silicium à Telefunken, Heinrich Welker travaillait à la purification du germanium. Pendant la guerre, Mataré avait été intrigué par le même phénomène d'interférence remarqué par les Américains de Bell. Lorsque deux contacts sont très rapprochés, le potentiel de l'un peut influencer le courant de l'autre. Il développa un amplificateur sur ce principe qui donna de bons résultats en juin 1948, grâce au germanium très pur élaboré par Welker. Ils apprenaient alors que Bell Labs venait de développer le même composant (e2).

Quelques milliers de transistrons, plus fiables que ceux de Bell, ont été utilisés pour le système téléphonique français. En 1952, les inventeurs sont revenus en Allemagne et Welker devint directeur des recherches de Siemens.



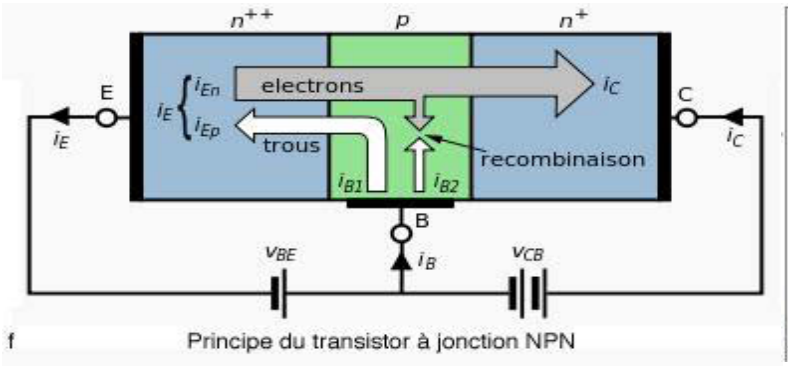
e2 Transistron - 1948

Cette coïncidence laisse songeur sur la similitude de fonctionnement des cerveaux humains.

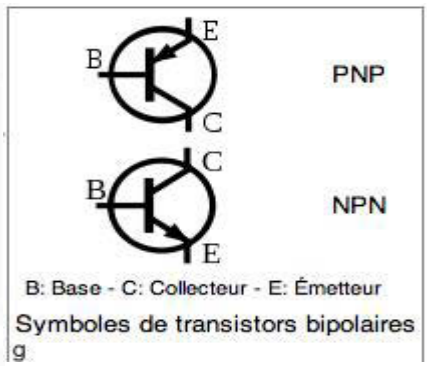
La similitude d'expérience, de savoir de ces chercheurs, dans un environnement semblable, à la même époque, travaillant sur le même objectif, constatent le même phénomène étrange, ont la même réaction pour en tirer profit et aboutir à un appareil semblable. Il est très improbable qu'ils aient eu des contacts avec leurs homologues du Bell Labs.

Transistor bipolaire à jonction

Le transistor à pointes avait été mis au point par Brattain et Bardeen, sans que le responsable du groupe, Shockley, y ait réellement participé. Il en ressentit une forte vexation personnelle, critiqua la conception du transistor car son nom ne pouvait apparaître dans le brevet.

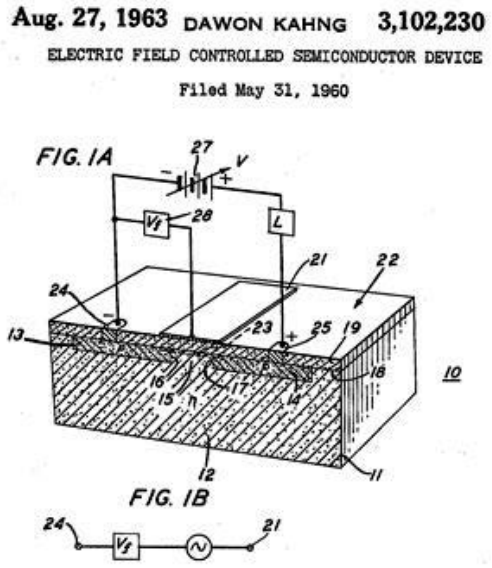


f Principe du transistor à jonction NPN



g

Il se lança alors dans un travail personnel intensif pour trouver un autre type de transistor n'ayant pas les inconvénients théoriques et pratiques du système à pointe (f). Un mois plus tard il avait conçu un transistor différent, avec la jonction PN proposée par Ohl en 1940. Breveté en juin 1948, Shockley publiait son fonctionnement en 1949 (g). Les trois chercheurs Brattain, Bardeen et Schockley reçurent, associés, le prix Nobel de physique 1956 pour leurs recherches sur les semi-conducteurs et la découverte de l'effet transistor.



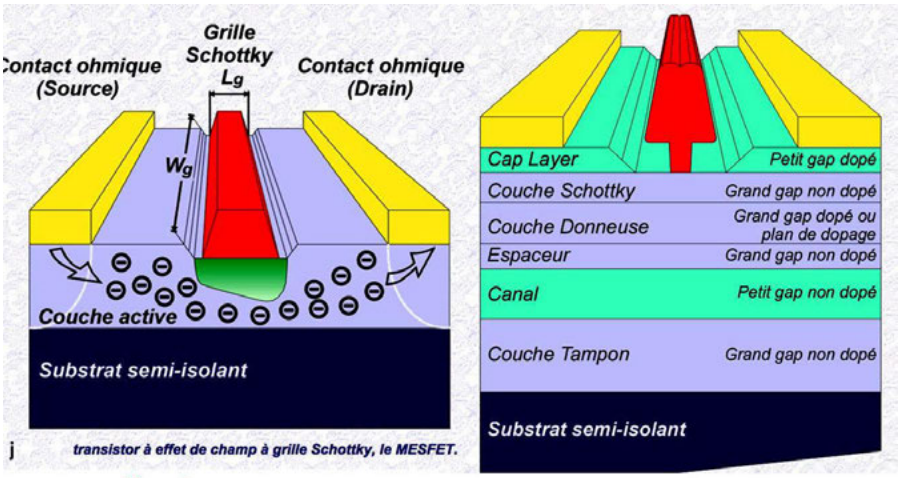
h Transistor à effet de champ MOS - 1959

Transistor à effet de champ

Ce type de transistor, le premier envisagé par Lilienfeld en 1926, vainement essayé par Heil, Shockley et d'autres est enfin réalisé aux Bell Labs en 1959 par J.Attala et D.Kahng (h). Sans rentrer dans les explications techniques, bien développées dans nombre de documents, résumons en précisant qu'il évitait un défaut de son prédécesseur à jonction. Il résolvait autrement le problème des états de surface qui bloquent la pénétration des champs électriques à l'intérieur du semi-conducteur.

En examinant le simple croquis du brevet, comme d'ailleurs les précédents, on reste surpris par la simplicité apparente de ce sandwich de couches qu'il a fallu quarante ans pour faire fonctionner après des dizaines d'échecs. On peut entrevoir sur ce schéma du Polytech de Lille, les difficultés de conception et de fabrication des 6 couches dans une épaisseur inférieure au mm (j).

L'apparition de ce nouveau transistor de la famille des MOS ne fut pas dans l'immédiat un événement.



j transistor à effet de champ à grille Schottky, le MESFET.

Un peu lent au début, ses qualités se découvrirent progressivement : petite taille, faible consommation d'énergie et surtout facile à intégrer (3).

Actuellement, 99% des transistors utilisés sont de ce type ou des variantes.

Vers le développement

Le premier transistor à pointes, difficile à fabriquer avec ses électrodes espacées d'une fraction de mm et pas très fiable, fut fabriqué à quelques milliers d'exemplaires puis remplacé par le bipolaire à jonction. Le coup de colère de Schockley s'était transformé en un mois en coup de génie, sous l'effet d'une farouche volonté de réussir.

De nombreux perfectionnements furent nécessaires avant de lancer les fabrications. En particulier deux techniques ont été difficiles à mettre au point ;

– La pureté indispensable du germanium, puis du silicium à 99,99% et leur élaboration sous forme de monocristaux de plus en plus gros. Ils étaient ensuite tronçonnés en fines lames (wafer).

– Le dopage pour introduire la quantité voulue d'impureté.

– Suivaient ensuite la gravure et le dépôt d'autres matériaux.

Le germanium, plus facile à utiliser au début, avait des inconvénients, entre autres sa sensibilité à la température ; de plus, une tension inverse trop faible en limitait les applications. Le silicium s'imposa comme le principal matériau semi-conducteur utilisé. Il l'est encore aujourd'hui, très abondant sur terre, son extraction de la silice à l'état brut se fait au four électrique.

En avril 1952, Bell Labs organisait un grand symposium auquel étaient conviés une centaine de représentants de 40 entreprises ayant acheté la licence pour 25 000 $. Ils avaient 9 jours pour écouter des exposés, poser toutes les questions sur la fabrication et visiter la récente usine.

Une bible « *The Transistor* » leur était remise, surnommée *Livre de recettes de ma Bell.*

Une mutation totale

Malgré la ressemblance des trois électrodes du transistor avec les trois *pattes* de la triode, la technique d'utilisation des semi-conducteurs était une complète remise en question de celle des tubes à vide. L'amplification, qui s'appliquait auparavant sur des tensions en alternatif, se faisait en courant continu, sous des tensions de quelques volts. Cela transformait complétement la conception des circuits par les électroniciens, et déclencha une nouvelle heure de gloire pour la pile, ce modeste composant qui avait fait découvrir l'électricité.

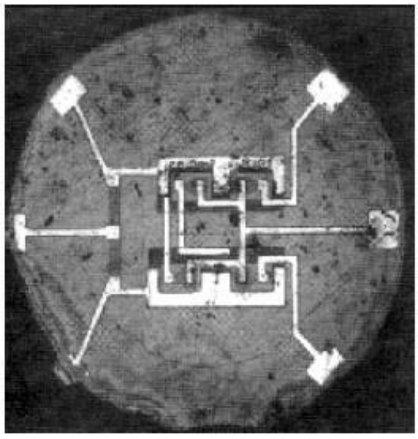
Le transistor offrait la possibilité extraordinaire de commuter un courant de zéro à une valeur finie, et inversement, à une très grande vitesse donc fréquence, par une impulsion sur sa base de très faible énergie . Il inaugurait une nouvelle ère de la logique numérique, ou digitale, fonctionnant par tout ou rien, c'est-à-dire de un à zéro.

Cette propriété se trouva parfaitement adaptée aux premiers computers qui calculaient alors en partie en analogique, en partie en logique digitale. S'ajoutant à la miniaturisation des composants, tous les appareils, à très faible consommation électrique, s'affranchissaient de la prise de courant. Ils devenaient autonomes, alimentés seulement par des piles peu puissantes de quelques volts.

Ces piles qui ne servaient plus qu'à l'éclairage de secours, la lampe de poche, redevenaient l'alimentation essentielle pour les petits postes radios devenus portables. Elles progressèrent alors, de salines à alcalines, puis maintenant au lithium.

Pendant plus d'une dizaine d'années, les transistors étaient des composants discrets, c'est-à-dire unitaires, que l'on soudait par leurs trois *pattes* sur des circuits imprimés. Sur ces plaques isolantes étaient imprimées en cuivre les connexions les reliant avec les autres composants, diodes, condensateurs et résistances.

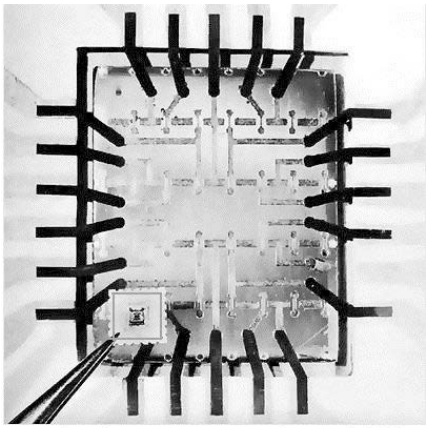
Circuits intégrés



l circuit intégré Fairchild 1959

En 1958, Jack Kilby, ingénieur à Texas Instrument, eut l'idée simple et pratique de constituer deux et plus de transistors ou diodes sur la même plaque de silicium, plutôt qu'indépendants. Il les connectait par des fils ordinaires. Ensuite il intégra ces connections sur le même substrat, et pourquoi pas aussi des résistances et des condensateurs en réduisant leurs dimensions. L'inductance, d'un certain volume incontournable, est restée le composant difficile à miniaturiser. Les premiers circuits étaient en germanium, ensuite en silicium chez Fairchild (l) qui contesta l'antériorité de Texas. Les transistors MOS se sont révélés plus faciles à intégrer (m).

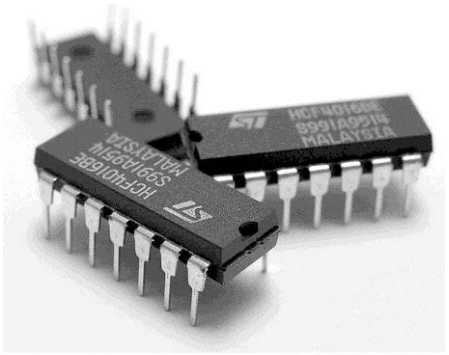
Le prix Nobel de 2000 fut attribué à Kilby.



m circuit avec 16 transistors MOS

La tranche, plaque, ou *wafer*, de moins de 1/10 de mm est découpée dans un barreau de silicium monocristallin, pur à 99,99%, de 100 à 300 mm de diamètre. Une série de couches de différents matériaux, dont des semi-conducteurs P ou N, étaient déposées successivement avec des découpes très fines, obtenues par photo-lithogravure. Le circuit intégré était ensuite encapsulé dans un boîtier DIP (n).

Cette invention relativement simple apporta progressivement des améliorations inimaginables, en performances, fiabilité, prix, résultant d'une densité de composants sur un substrat en nombre croissant à chaque décennie de 10 à 1000, 1M, puis des centaines de millions, le milliard ayant été atteint en 2008.



n Boitiers DIP

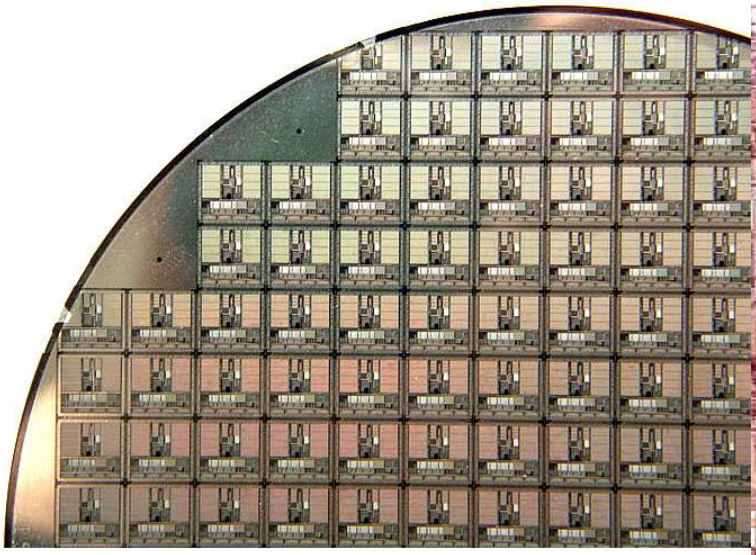
Cette croissance est formulée par la célèbre loi expérimentale de Moore, le nombre de composants intégrés sur le même substrat de silicium double tous les 1,5 ans. Combien de temps encore, alors que la miniaturisation atteint ses limites, en approchant du domaine des effets quantiques ?

Microprocesseurs

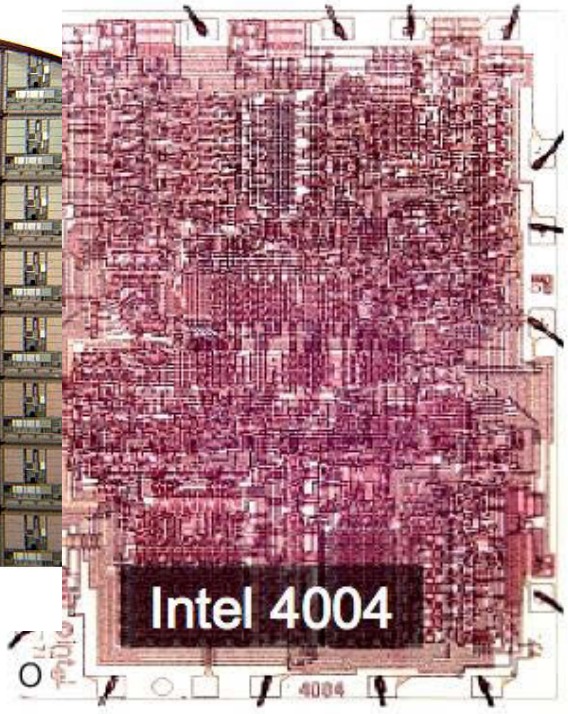
Assez rapidement on réalisa que l'assemblage de multiples composants actifs, transistors et dérivés sur le même support que des composants passifs, condensateurs et résistances permettaient, en les connectant suivant un schéma spécifique, de réaliser un sous-ensemble réalisant une application particulière. Il remplissait alors différentes fonctions, logique, arithmétique, analogique, mémoire, ou dédiée à un processus particulier, d'où le nom de microprocesseur ; par exemple gérer une calculette, faire tourner une montre, furent les plus étonnants pour le public.

Le premier microprocesseur a été conçu par Intel en 1972. Ce 4004 était une unité de calcul de 4 bits utilisant 2300 transistors (o). La miniaturisation se poursuivant, quelques années plus tard, des dizaines de microprocesseurs étaient gravé sur une tranche de silicium (p).

Un essor prodigieux se déclencha à partir des années 1970, les applications potentielles se multipliant.



p Dizaines de microprocesseurs



o

Mémoire

L'ordinateur, dès ses débuts, avait besoin de stocker des informations sous forme digitale. Le principe était de faire passer un élément magnétique de l'état magnétisé à démagnétisé. L'invention est due au danois Valdemar Poulsen, qui breveta en 1898 un appareil utilisant un fil d'acier, premier magnétophone.

Ce fut d'abord la bande magnétique, puis des petits tores de ferrite, puis des disquettes en plastique souple, support de la couche magnétisable, la disquette.

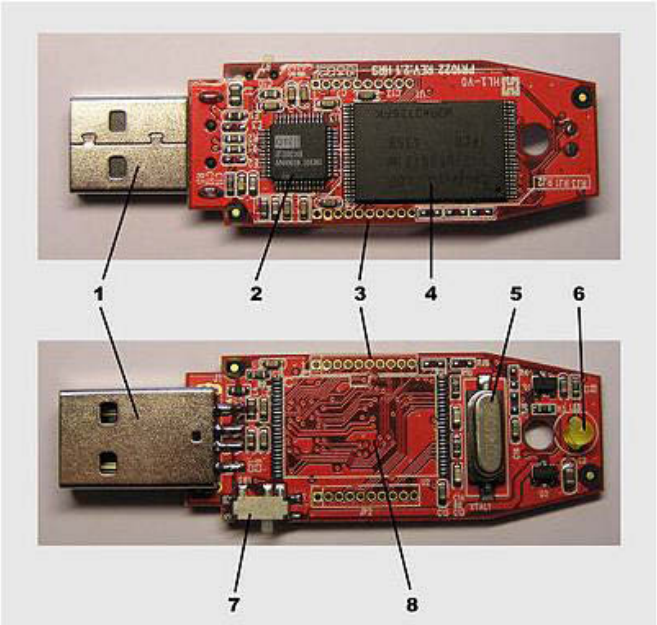
L'évolution semble achevée pour l'ordinateur, avec le disque dur, en matériau amagnétique, verre au début, revêtu de la fine couche magnétisable, permettant des temps d'accès très rapides, des capacités croissantes et l'inverse pour les prix.

En parallèle, le disque optique CD créé pour l'enregistrement sonore, s'est trouvé bien adapté comme mémoire transportable.

Enfin s'est développée progressivement la carte mémoire à semi- conducteurs, un circuit intégré, dont on connaît les variantes, dont la plus utilisée est la carte à puce.

La carte mémoire la plus banalisée est la clef USB apparue peu avant 2000.

schéma d'une clé USB 64MO



Applications du transistor et dérivés

Ils envahissent presque tous les produits industriels

Domaine de l'électricité - énergie

La maturité des applications énergétiques de l'électricité semblait atteinte au début du XX^{E}. L'électronique de puissance à semi-conducteur permit de résoudre à partir de 1975 presque tous les problèmes pas ou mal résolus par l'électromécanique ou l'électronique à tubes. Ce ne fut pas une révolution, mais des évolutions ponctuelles. Les composants ont été d'abord des diodes, puis des thyristors remplaçant les thyratrons, suivis de transistors de puissance.

– Le redresseur de puissance au germanium puis au silicium. Auparavant il n'y avait que l'oxyde de cuivre ou la diode à vide pour les petites puissances, le redresseur à vapeur de mercure pour les grandes.

– Les convertisseurs statiques pour la régulation de vitesse des moteurs synchrones et asynchrones en alternatif, en remplacement des moteurs en continu.

– Les automatismes industriels, de téléphonie et autres, à relais électromagnétiques, remplacés par des relais statiques.

– Les thyristors haute tension pour le transport THT en courant continu, remplaçant les redresseurs à vapeur de mercure.

– Les panneaux photovoltaïques en silicium transforment l'énergie lumineuse du soleil en électricité, infiniment mieux que le sélénium.

– Une déception notable : A partir des années 1970, il était envisageable de remplacer l'appareillage électromécanique pour la commutation de puissance par des composants statiques à semi-conducteurs. Ce matériel assure le contrôle-commande de la puissance dans tous les réseaux de transport et distribution de la basse à la haute tension. Les recherches sur cet objectif ont échoué, l'arc électrique fugitif reste aujourd'hui le processus encore incontournable pour la commutation d'énergie. (4)

Domaine de l'électricité-information

q

Dans ce domaine, le terme révolution est à mettre au pluriel.

– L'objectif initial des chercheurs de Bell était le remplacement des relais électromécaniques de téléphone automatique, pas assez rapides ni fiables.

– D'une façon générale, c'était le remplacement des tubes à vide dans les applications radio et la télévision naissante. Le récepteur radio sans lampes, et alimentation par de simples piles, devint miniature et portable en 1958 sous le nom de *transistor* (q).

– Une application particulière avait émergé pendant la guerre, le computer. Le problème était de calculer le nombre optimum de navires chargés d'armes et d'escorteurs militaires des convois transatlantiques en 1943/44, pour minimiser les risques de torpillage par les sous-marins. De même le décryptage des codes secrets ennemis. Le terme de Recherche Opérationnelle, RO, recouvrait ces longs calculs de combinatoire, et pour les résoudre plusieurs calculateurs furent construits avec des tubes. Le premier grand calculateur à tubes, l'ENIAC conçu en 1943, fonctionna jusqu'en 1946 avec 17 000 tubes, dont 2 en moyenne tombaient en panne chaque jour. Il pesait 30 t et consommait 150 kW.

D'autres modèles plus performants furent développés après WW2 pour le calcul analogique en s'inspirant des théories du traitement de l'information développées par Alan.Turing et J.von Neumann.

À partir de 1960, les calculateurs ont utilisé les transistors, particulièrement prédestinés au calcul numérique. Ce fut l'ère des grosses machines pour centres de recherches. Le *computer* devient ordinateur en français. Puis la taille se réduisit avec le *Micral N* français en 1973. Aux Etats-Unis *l'Apple I* consacra l'arrivée en 1976 du *Personnal Computeur*, le PC, avec d'importantes innovations dont la célèbre souris, le menu etc. (5).

Pourtant la première société mondiale de computer, IBM, attendit quatre ans pour réaliser l'avenir potentiel du PC. L'ordinateur était ainsi la conjonction de plusieurs éléments, la théorie de l'informatique, le primitif calculateur à tubes, le numérique par le transistor, suivi de ses évolutions, circuit intégré puis microprocesseur.

– Les composants à semi-conducteurs sont à la base d'une foule d'automatismes et systèmes de contrôle-commande dans tous les environnements domestiques, collectifs industriels, moyens de locomotion, satellites, etc.

Le numérique (ou digital)

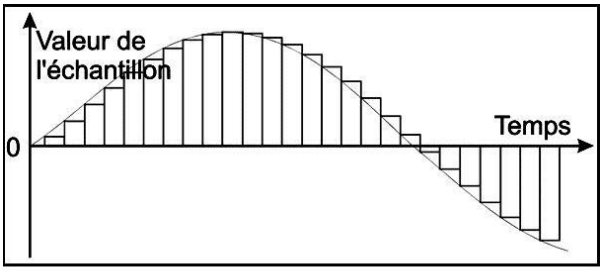
S'il y a des découvertes marquantes ayant apporté de profonds bouleversements (1), d'autres plus rares, de père inconnu, apparaissent discrètement, se faufilent au milieu des autres, sans se faire remarquer au début, malgré leur impact capital à terme. Telle est la découverte progressive du numérique. Est-ce même une découverte, tellement elle semble banale ?

Tout ou rien, zéro et un, ou bien *to be, or not to be*, selon un célèbre Anglais, devait être depuis longtemps une manière simple de compter.

Avec le télégraphe, apparurent divers codages (V-1). Le Morse traduisait les 26 lettres avec un code suivant 4 types de circulation de courant : établi-coupé – court-long. W. Thomson réduisit ce code à deux symboles pour les messages transmis par le premier câble transatlantique

Les marins, pour savoir où ils se trouvaient, utilisaient un sextant mesurant la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Des calculs ou mieux des tables donnaient le résultat cherché. La courbe continue suivie par le soleil était ainsi décomposée en une série de points d'espacement de temps constant ; exemple d'échantillonnage pour transformer une grandeur variable d'une façon continue, analogique, en une suite de valeurs discrètes, en numérique, comme l'illustre (r).

À l'apparition des premiers computers à tubes, on hésitait entre le digital et l'analogique, plus familier au physicien. L'apparition du transistor précipita la transition. Il était capable d'établir et un interrompre un courant de faible valeur, un signal, par réception d'un ordre électrique de très faible valeur – ceci des millions de fois par seconde. Cette aptitude se propagea dans tous les domaines du traitement d'information.



r Transformation analogique en numérique

Dans un CD, chaque valeur d'échantillon, codé sur 16 bits, peut prendre 65 535 valeurs, et la durée d'un échantillon est telle qu'il y en a 44 100 par seconde

Le téléphone fit un premier essai avec le numérique. Le magnat mondial AT&T toujours à la recherche d'un système multiplex, capable de faire passer plusieurs conversations simultanées dans le même fil lança vers 1960 le système T, capable de faire passer 24 circuits simultanément dans une paire de fils. La voix transformée en impulsions numériques codées circulant à près d'un million par seconde.

Le système français Minitel, important précurseur de l'Internet en bénéficia.

Puis les faisceaux hertziens pour ce téléphone concrétisaient l'incursion du numérique dans la transmission sans fil, lui apportant perfection qualitative, précision extrême, débit et vitesse.

La voie était tracée pour appliquer le numérique à toutes les communications hertziennes permettant d'abord la multiplication des chaînes TV sur des bandes de fréquences trop étroites pour l'analogique. Le sommet a été peut-être atteint par le téléphone portable et ses variantes, réunissant les avantages quantitatifs de la transmission de l'information numérisée par ondes électromagnétiques jusqu'aux relais aériens, la miniaturisation de son microprocesseur et de la mémoire en volume et énergie, grâce à l'accu au lithium.

Conclusion provisoire

Le lecteur pourrait s'étonner que ce dernier chapitre sur la plus importante découverte et invention en électricité du XX^{e} siècle, par ses conséquences, ne soit pas plus développé. Les semi-conducteurs ont déclenché en cascade depuis 60 ans, les bouleversements spectaculaires que l'on sait, dans le traitement et le transport de l'information.

L'invention du transistor est seule analysée. Ses multiples conséquences sont simplement citées sans approfondir leur maturation. Les nouvelles applications et les produits dérivés se poursuivent. Mais un recul d'une à deux décennies est toujours nécessaire pour mieux comprendre l'histoire.

En attendant, nombreux sont les sites web et publications qui présentent bien les conséquences de l'invasion des semi-conducteurs.

L'homme avait compris le comportement de l'électricité dans les conducteurs solides, puis dans le vide partiel ou total et l'espace, et finalement dans les semi-conducteurs.

Mais est-ce vraiment fini ? Le passé laisserait à penser que non, pourtant les arbres ne montent pas jusqu'au ciel, dit-on.

Compléments

1- Webographie

Des emprunts ont été faits aux auteurs suivants, qu'auteur et lecteurs remercient :

Computer History Muséum - computerhistory.org/semiconductor/timeline.html

– ANCEAU F.- Une petite histoire des transistors – CNAM

– LILEN H. Cinq inventions à l'origine de l'ère électronique – Vuibert, 2007

– http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_transistor

Ils apportent nombre de développements techniques.

2- Radar Application particulière mais importante des ondes électromagnétiques, l'invention du radar n'a pas été analysée dans ce livre pour deux raisons :

– Elle illustre l'invention typique, développée progressivement par plus d'une dizaine de chercheurs avançant en parallèle dans 8 pays, dans les années 20 et 30. Dans chaque pays, on estime y avoir fait les améliorations les plus significatives. Il est donc difficile d'analyser la démarche inventive de ces progrès. Les deux verrous étant l'émetteur de micro-ondes, le magnétron, et le détecteur, la diode au germanium, clone de la galène des premiers sans-filistes. Selon la tradition, il y a des précurseur, l'Allemand Christian Hülsmeyer, inventeur d'un Telemobiloskop en 1904. Son appareil fonctionnait, mais n'intéressa personne. Le Titanic n'était pas encore construit. Après, en 1915, Fessenden, l'homme de la radiophonie, inventait le Fathometer, radar à ultrasons pour mesurer la profondeur.

– Le lecteur intéressé dispose de nombreux sites web valables, qu'il était inutile de simplement recopier, tels que : httfr.wikipedia.org/wiki/Radar

3- Transistor MOS http://www.polytech-lille.fr/cours-transistor-effet-champ/hemt/hemt.htm

4- Appareillage électrique

Ce n'est pas vraiment exact, l'arc n'est pas indispensable, il est possible de couper un courant à son passage précis à zéro, à chaque demi alternance du courant alternatif, avec une simple diode à semi-conducteur, ou mieux un composant plus élaboré, le transistor de puissance, le triac ou le thyristor. Malgré d'importants efforts de recherche, nous n'y sommes pas encore parvenus pour des courants importants et les hautes tensions

Comme dans d'autres sociétés de construction électrique, j'avais conduit dans les années 1970 à la société Merlin Gerin des recherches sur ce sujet. L'objectif était de remplacer tous les interrupteurs et disjoncteurs électromécaniques actuels utilisant l'arc, par les nouveaux composants statiques à semi-conducteurs. Aucune société n'est arrivé à résoudre ce problème.

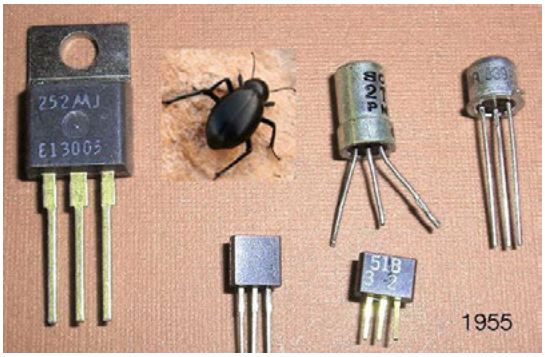
Cette possibilité théorique s'est heurtée à plusieurs difficultés encore insurmontables, techniques et économiques. En particulier cette énergie accumulée dans les circuits toujours inductifs par les très forts courants de court-circuit, plus de 100 000A en basse tension, provoquant un déphasage courant/tension qui ne passent plus à zéro au même moment. Il s'ensuit une importante énergie électromagnétique qu'il faut dissiper et l'arc se trouve être le conducteur transitoire inespéré capable de la dissiper. Au début du XX^{e} siècle, J.Slépian, ingénieur de Westinghouse, soulignait: L'arc électrique est un beau cadeau de la nature, c'est le conducteur transitoire irremplaçable qui permet à l'interrupteur de passer très rapidement mais progressivement de l'état conducteur à l'état isolant. L'art est de le bien contrôler. Pour les appareilleurs, l'arc est un phénomène difficile mais incontournable…aujourd'hui.

D'autre part nous sommes toujours incapables de couper pratiquement un courant continu sous une tension dépassant 4 à 6 000 volts. Car pour ramener le courant à zéro, il faut créer une contre-tension, par la tension d'arc, supérieure à celle du réseau. Alors qu'en alternatif, le courant s'annule 100 fois par seconde, sinon il serait, lui aussi, impossible à couper.

Aussi, l'application des systèmes de commutation à semi-conducteurs reste encore limité à des cas spécifiques, d'une part pour remplacer les contacteurs et relais dans tous les automatismes basse tension, d'autre part, ce qui est surprenant, pour le contrôle du transport d'énergie à très haute tension en courant continu. Ce courant s'impose dans deux applications particulières, soit pour les conséquences de la forte capacité des câbles sous-marins, soit économiquement pour le transport terrestre au delà de 1000 km.

5- Ordinateur

Parmi les nombreux livres traitant de l'histoire de l'ordinateur, l'un est simple et bien documenté : *Les objets qui racontent l'informatique,* multi auteurs, EMCC, Lyon 2008. Édité par l'ACONIT, Association pour la Conservation de l'Informatique et de la Télématique (aconit.org). Elle a rassemblé, à Grenoble, la plus grande quantité, peut-être connue, de matériels informatiques, sans encore d'espace pour les présenter et expliquer au public comment s'est construit le monde informatique.



L'insecte à trois pattes
qui a envahi tous les systèmes
de traitement de l'information

Bibliographie générale

Une bibliographie particulière figure en fin de chaque chapitre, dans les compléments.

Webographie

Wikipedia – Livres à *gallica.bnf.fr*

Revues à *cnum.cnam.fr* - Génie industriel 1851 à 1871 – La Nature 1873 à 1962 –
- La lumière électrique 1879 à 1894

Bibliographie L'évolution des connaissances en électricité est bien perçue à la lecture des **Traités de physique** successifs, multi-réédités.

A. DE LIBES Traité de physique – Courcier Paris -1813

PELLETAN – Traité de physique – Ballière Paris – 1838

M. POUILLET – Traité de physique expérimentale Hachette Paris 1853 – 15 edit 1828 à 1865

A. BOUTAN – CH D'ALMÉRIA Traité de physique Dunod Paris– 1861

A. GANOT – Traité de physique – Hachette Paris– 1865 – 20 éditions 1851 à 1894

J. JAMIN– Traité de physique – Gauthier Paris –1870

E GÉRARD –Leçons sur l'électricité – Gauthier Paris 1891

P. JANET – Leçons d'électrotechnique –Gauthier 1900

Livres

ABBÉ NOLLET Recherches sur les phénomènes électriques 1753

P. SUE – Histoire du galvanisme – Bernard Paris– 1802/05

E. BECQUEREL – Histoire de l'électricité –Didot Paris 1856

TH. DU MONCEL – Applications de l'électricité –Libr. scient. 1874

L'éclairage électrique –Hachette 1883

L'électricité force motrice hachette 1884

J H GORDON –Traité d'électricité et de magnétisme – Traduit de l'anglais –Baillère Paris 1881

A. GUILLEMIN – Magnétisme et électricité–Hachette Paris –1883

L. FIGUIER –Les merveilles de la science –Furne- Jouvet Paris-T1,1867 – 1868

– Les nouvelles conquêtes de la science –L'électricité Flammarion Paris 1883

– L'année scientifique et industrielle– Hachette – 1856 à 1894 – *gallica.bnf.fr*

H. FONTAINE –Eclairage à l'électricité–Librairie polytech. Paris 1888

E. DEBEAUX – Physique populaire – Hatier Paris 1890

H FONTAINE –LEBLANC – Dictionnaire d'électricité et de magnétisme– Hatier 1889

A. RITTER VON URBANITZKY –Electricity in the service of Man – Cassel London 1890

R.V. PICOU – Les machines dynamos électriques – Garier –1891

H. DE GRAFFIGNY –Encyclopédie électromécanique –11 tomes –Bernard 1896/98

F. LOPPE – Courants alternatifs industriels –Bernard 1896

M. DEPREZ – Traité d'électricité industrielle –Paris 1896

J. RODET – Courants polyphasés – Gauthier 1903

L. POINCARÉ – L'électricité Flammarion Paris 1910

R.A. MILLIKAN – L'électron –Alcan Paris 1926

R. MASSAIN – Physique et physiciens Magnard – Paris 1939

A. EINSTEIN – L'électrodynamique des corps en mouvement- Gauthier 1955

LEPRINCE-RINGUET – L'aventure de l'électricité –Flammarion 1983

NICOLAS STROTZKY – La planète Électricité – Hologramme Paris 1984

FIN du Tome V et du livre

Iconographie

Les gravures au trait (80%) sont extraites de livres et revues du XIX^{E}. Remercions les auteurs de leur qualité. Les autres dessins et photos dont l'origine est identifiable sont référencées. Celles de l'auteur par ADX, pour les autres sur une liste, envoyé sur demande à contact@. Remercions les de leur contribution gracieuse, pour ce livre destiné à diffuser la culture scientifique et technique.

Reproduction

Elle est libre pour toute utilisation non commerciale, à but culturel ou didactique, en indiquant l'origine : A. Ducluzaux –Électricité

Errata

Ces livres, contenant des milliers d'informations, recueillies dans plus d'une centaine de documents divers, il en résulte statistiquement quelques erreurs malgré une vérification des sources. Le lecteur est donc remercié de signaler les erreurs de fait ou d'interprétation qu'il aura noté, avec leurs sources accessibles.

Les remarques et apports personnels sont souhaités :

contact@electricite-decouvreurs-inventeurs.com

Si le lecteur souhaite poursuivre son exploration dans la genèse des autres domaines du monde électrique, il peut choisir parmi les 4 autres tomes, dont les sommaires ci-contre.

Il peut lire auparavant des extraits de chaque partie sur le site web :

ÉLECTRICITÉ – DÉCOUVREURS – INVENTEURS

electricite-decouvreurs-inventeurs.com

L'électricité
Découvreurs et Inventeurs

Sommaires

Tomes

I –Défricheurs de l'inconnu

Au lecteur
1- L'électricité, essai de définition
2- Magnétisme et électricité statique. Des chinois à Coulomb
3- L'électricité dynamique, la pile- Galvani, Volta – 1800
4- Découverte de l'électromagnétisme - Oersted, Ampère –1820
5- Découverte de l'Induction – Arago, Faraday – 1831
6- Lois et théories

II – Générer l'électricité

1- Générateurs électrochimiques, pile, accu, stockage
2- Générateurs statiques thermo/photo/piezo-électriques
3- Générateurs électromécaniques à induction
4- Bobine d'induction, Page, Ruhmkorff
5- Quelles énergies pour produire l'électricité – 1880-2011
6- Historique de la production d'électricité en France

III – Et la lumière fut – L'électrochimie

1- Lampe à arc
2- Lampe à incandescence
3- Lampe à décharge
4- L'exposition internationale d'électricité à Paris - 1881
5- Développements et réseaux d'éclairage électrique
6- Électrochimie –Électrométallurgie

IV–Vecteur d'énergie

1- Moteurs en courant continu
2- Transporter *la Force* - Guerre des courants, l'alternatif
3- L'alternatif, nouveau vecteur d'énergie, nouvelles machines
4- Centrales et réseaux de transport
5- Locomotion électrique par terre, mer, air.

V – Vecteur d'information

1- Télégraphe
2- Téléphone
3- Découverte des ondes électromagnétiques – Maxwell – Hertz
4- Découverte de l'électron – J.J. Thomson – Tubes à vide – 1897
5- TSF – Radiophonie
6- Télévision
7- Découverte de l'effet transistor, semi-conducteurs –1948

Biblio-webographie

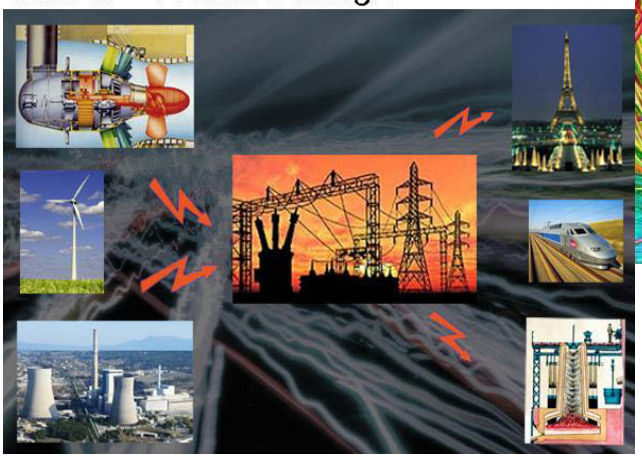
Les 5 tomes

Tome III - Et la lumière fut - Électrochimie

Tome II - Générer l'électricité

Tome V - Vecteur d'information

Tome IV - Vecteur d'énergie



?

Oh, fée électricité ! que ferions-nous sans toi ?

Achevé d'imprimer en octobre 2014 par LEN S.A.S. – 92150 Suresnes
Dépôt légal : octobre 2014
Imprimé en France