

« On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire ».

Auguste Comte, Cours de philosophie positive, 1830-1842

# 1

## Supports physiques de communication

### 1.1 Naissance des télécommunications

#### 1.1.1 Introduction

LE mot *télécommunication* a été introduit en 1904 par Edouard ESTAUNIÉ, ingénieur et écrivain français, dans son « Traité pratique de télécommunication électrique ». Il est issu du préfixe grec « τῆλε » (têle) signifiant *loin* et du latin *communicare*, pour *partager, communiquer*. Par ce nouveau terme, il souhaitait unifier sous une même discipline la télégraphie, la téléphonie et les radio-communications naissantes. En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, les télécommunications désignent<sup>1</sup> toute transmission, émission ou réception de signes, de signaux, d'écrits, d'image, de sons ou de renseignements de toute nature, à distance, par fil, radioélectricité, optique ou d'autres systèmes électromagnétiques. Elles confirment leur convergence avec le monde informatique, amorcée dans les années 1970, et absorbent progressivement le secteur audiovisuel pour donner naissance à un monde massivement connecté de données *multimedia*, terme désignant le rapprochement, au sein d'un même « medium » interactif, de données liées au texte, à l'image, au son ou à la vidéo.

Dans le même temps, le réseau *Internet*, balbutiant dans les années 1970 avec le lancement du courrier électronique, a évolué dès le début des années 1990 vers un tissu mondial de liens et de nœuds fournissant de gigantesques volumes de pages en langage HTML<sup>2</sup>, vecteurs de l'information multimedia. Internet est devenu en quelques années une infrastructure de communications à l'échelle mondiale, englobant les interconnexions des réseaux informatiques publics et privés. Ses retombées ont depuis longtemps dépassé le

---

1. Selon le texte officiel de l'UIT, Union Internationale des Télécommunications, créée en 1865.

2. HyperText Markup Language

cadre de la communication entre scientifiques initiés pour s'étendre au commerce, à l'économie, aux loisirs, et à tous les aspects de nos sociétés directement ou indirectement liés à l'information et à la communication. L'essor de la téléphonie mobile et des terminaux mobiles connectés vient renforcer cette profusion d'échange d'informations. Les technologies des objets connectés et de l'Internet pourraient même à terme, faire communiquer entre elles chaque entité vivante ou inerte sur Terre. A ce sujet, si la norme IPV4 du protocole internet IP<sup>3</sup> ne permettait d'adresser « que »  $2^{32} \simeq 4,3$  milliards d'adresses terrestres différentes, provoquant une pénurie annoncée de liens, le nouveau système d'adresses codées sur 128 bits (IPV6) permet de définir  $2^{128} \simeq 2,4 \cdot 10^{38}$  identifiants indépendants. Pour fixer les idées, on peut prendre le *quadrillon* (i.e.  $10^{24}$ ) comme référence, cet ordre de grandeur fournissant l'estimation du nombre de grains de sable contenus dans le Sahara ou du nombre totale de gouttes d'eau contenues dans les océans terrestres. Avec plus de  $10^{38}$  adresses possibles, IPV6 offre près de 670 quadrillions d'adresses par  $\text{mm}^2$  carré de surface terrestre ... !

Nous aurions cependant tort de croire que cette émergence de l'Internet et de la communication mobile constitue un bouleversement technologique, social et économique sans précédent. L'humanité a déjà connu de profonds changements en matière de communications et d'échanges par les inventions de l'écriture, de la monnaie ou de l'imprimerie, mais ces innovations ont mis des centaines d'années à percoler dans les sociétés, au gré de l'efficacité des langages et des moyens de transport, jadis uniques vecteurs de l'information.

Dans ce premier chapitre d'introduction, on se penchera plus spécialement sur la période 1850-1950, laquelle, non content d'avoir accompagné la deuxième phase de la révolution industrielle, a vu naître et se développer la base des télécommunications modernes, sans toutefois bénéficier des infrastructures de communication actuelles et de la pression des énormes intérêts financiers du monde numérique du XXI<sup>e</sup> siècle.

### 1.1.2 Aux origines

Les premiers modes de transmission de l'information pouvaient être divisés en deux groupes : les signaux visuels (flammas, fumée, phares..) et les signaux sonores (cris, cors, sifflements, cloches). Tous ces systèmes primitifs, même s'ils utilisaient des rudiments de codage, ne constituaient pas à proprement parler un réseau de transmission de l'information.

C'est probablement en Grèce antique que l'on trouve la trace des premiers moyens de communication à distance, le plus souvent imaginés pour informer au plus vite les dirigeants des épisodes de guerre. A Troie, les navires partaient à la bataille avec des voiles noires et les remplaçaient par des blanches en cas de victoire. L'issue des combats était donc rapidement connue aux abords des ports. C'est cette coutume qui valut à Thésée, héros de la mythologie grecque ayant oublié de hisser la voile blanche après sa victoire sur le minotaure, la triste mésaventure du suicide de son père Egée au retour de son bateau. Quant aux messagers grecs, ils pouvaient parcourir des dizaines de kilomètres pour faire parvenir les informations stratégiques à leurs destinataires. Un épisode célèbre, rapporté par Plutarque, est celui de la bataille de Marathon (490 av. J.C.). Les troupes athéniennes

---

3. Internet protocol.

ayant vaincu les Perses, le messager Philippides parcourut au pas de course près de 42 km jusqu'à Athènes, où il succombe d'épuisement, juste après avoir annoncé la victoire. Un autre moyen de communication à distance répandu chez les Grecs était celui des signaux de feu, décrits dans les récits de Homère. Des feux allumés dans l'obscurité étaient repérés à plusieurs kilomètres et relayés par d'autres messagers jusqu'à leur destination finale. Puis à l'époque romaine, des *tours à feux* étaient allumées près des côtes méditerranéennes pour guider les marins. Des réseaux de phares ont ainsi été créés par les Carthaginois sur la côte nord de l'Afrique et en Espagne, utilisés simultanément pour la signalisation et la transmission de signaux lumineux. Les Gaulois quant à eux avaient un système de communication à distance basé sur un télégraphe *oral*. Tout événement d'importance, comme le mouvement d'une armée ennemie, était proclamé à grands cris dans la campagne. Ceux qui percevaient ces hurlements les transmettaient à d'autres, et ainsi de suite, de village en village. Même si ces moyens primitifs ont été perfectionnés au cours du Moyen Âge, la vitesse de communication est longtemps restée celle du courrier, du coureur à pied ou du coursier à cheval. Or, ce paramètre devient rapidement un enjeu fondamental dans le développement des sociétés, tant pour des besoins militaires que commerciaux.

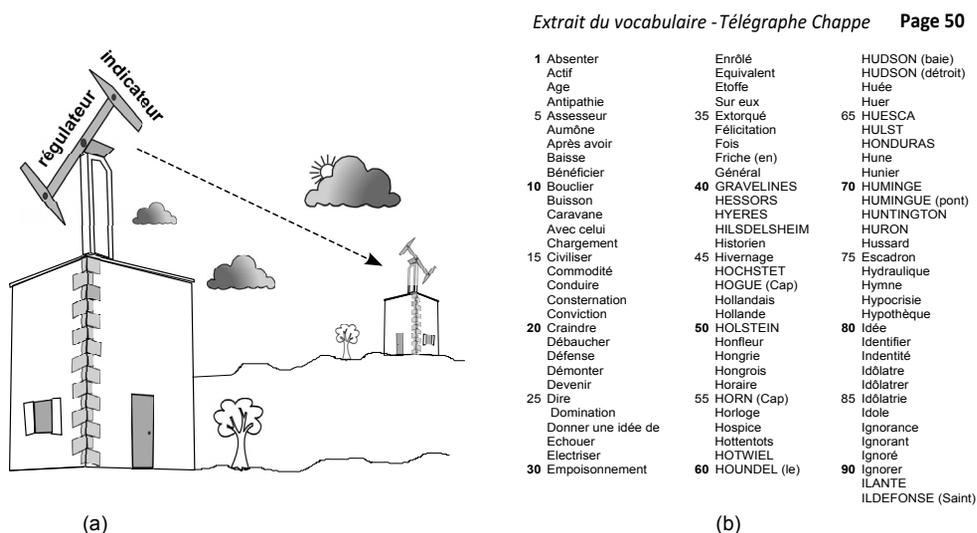
### 1.1.3 Le télégraphe optique

En 1684, le physicien britannique Robert HOOKE fut le premier à exposer clairement le principe du télégraphe visuel, basé sur des stations relayant des symboles visibles à distance, mais sa solution ne fut jamais mise en application. En France, il faudra attendre les guerres de la Révolution pour que naisse un véritable réseau de télécommunications organisé, hiérarchisé et quasi-permanent. Ainsi, en mars 1792, Claude CHAPPE propose à l'Assemblée Législative un système de communications<sup>4</sup> basé sur la transmission de messages entre des stations espacées d'une dizaine de kilomètres et situées sur des points élevés. La ligne Paris-Lille est opérationnelle dès 1793 et sera suivie de Paris-Strasbourg. Le consulat, puis l'Empire suscitent un développement massif du réseau, qui s'étendra jusque à la fin des années 1840, où il totalisera près de 5000 km de ligne, avec 534 stations desservant 29 grandes villes. Son usage est réservé à l'armée et aux services de l'Etat. Le code ou vocabulaire est dépendant des pièces mobiles du télégraphe, à savoir un bras principal central, appelé *régulateur*, muni de deux ailes pivotantes nommées *indicateurs* (figure 1.1a). Le régulateur est aligné selon deux positions, horizontale ou verticale, les obliques étant réservées au service. Des angles de 45° sont utilisés par les deux indicateurs, soit 7 positions pour chaque élément car le positionnement de l'indicateur dans le prolongement du régulateur est exclue, jugée trop ambiguë. Le nombre de positions affichables par le système est donc  $7 \times 7 \times 2 = 98$  messages de base. Six sont nécessaires pour le service et il reste 92 signaux de correspondance utilisables pour former les messages. Pour ce faire, on utilise un répertoire de 92 pages contenant chacune 92 lignes avec un mot ou une expression, permettant ainsi de piocher dans un dictionnaire de  $92 \times 92 = 8464$  mots, consignés dans un livre tenu secret par le directeur du site, pour décoder les dépêches (figure 1.1b). Malgré cette capacité limitée, ce télégraphe *optique* représente une première forme de réseau de télécommunications, hiérarchisé et centralisé. A partir de 1850, il sera rapidement remplacé par le télégraphe électrique. Le télégraphe optique

---

4. Mis au point avec ses quatre frères.

est encore utilisé de nos jours dans le code international des fanions.



**FIGURE 1.1** – a) vue schématique d'un site de transmission optique Chappe et b) extrait d'une des 92 pages du vocabulaire Chappe.

### 1.1.4 Le télégraphe électrique

Ce n'est qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle qu'apparaît l'exploitation de l'électricité pour représenter et transmettre une information. L'acte de naissance de l'électromagnétisme date de 1820, lorsque le danois Hans Christian ØERSTED découvre l'effet produit par un courant électrique sur une aiguille aimantée mobile sur un pivot. Dans la foulée, le français André-Marie AMPÈRE énonce un ensemble de principes qui définissent le champ magnétique créé par un courant, et l'action d'un champ magnétique sur un conducteur parcouru par un courant. La première « transmission à distance » est ainsi née. En 1831, le britannique Michael FARADAY découvre les courants d'induction qui prennent naissance dans les conducteurs placés dans un champ magnétique variable, ou se déplaçant dans un champ magnétique. Ces résultats fondamentaux favorisent la mise au point du télégraphe électrique pour transmettre un texte par alphabet codé. L'un des premiers télégraphes électriques utilisant l'effet électromagnétique est un appareil à aiguilles réalisé en 1833 par les allemands Carl Friedrich GAUSS et Wilhelm Eduard WEBER. Il fonctionnera sur une dizaine de kilomètres entre l'observatoire et l'université de Göttingen. Le télégraphe à aiguilles est alors amélioré durant les années 1835-40 par les travaux conjoints de l'américain Samuel MORSE et des britanniques William COOKE et Charles WHEATSTONE. On atteint alors des débits de l'ordre de 20 mots par minute ! Le déploiement des lignes télégraphiques à longue distance est facilité par la mise en évidence des pertes résistives d'un matériau conducteur par le britannique James Prescott JOULE en 1841. Morse réalise le 24 mai 1844 la première liaison de télégraphie électrique entre Washington et Baltimore, utilisant la modulation binaire d'un courant continu et donnant en réception des traces de points et de traits formant un alphabet, qui deviendront rapidement un code international. En 1848, une grande avancée technologique est réalisée par l'allemand Werner

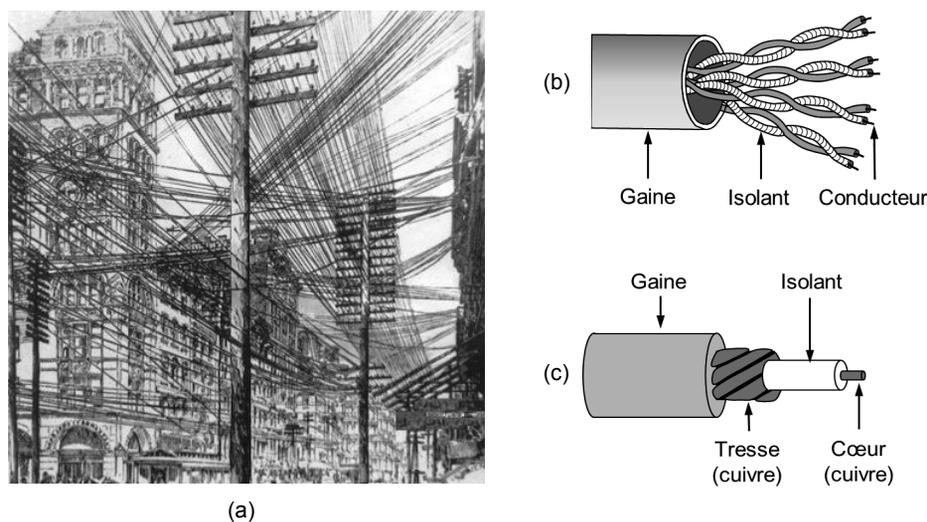
SIEMENS, qui développe une presse spéciale permettant l'extrusion et le collage sur les fils de cuivre d'une gomme naturelle isolante issue du latex, la gutta-percha. Cette dernière perdurera jusque dans les années 1930 et la découverte du polyéthylène. Des câbles isolés en rouleau de plusieurs kilomètres sont rapidement développés, et le premier lien sous-marin télégraphique transatlantique est posé en 1858 entre l'Irlande et Terre-Neuve. Il est constitué d'une âme composée d'un toron de sept fils de cuivre pur gainé de trois couches de gutta-percha. Un message inaugural est échangé entre la reine Victoria et le président James Buchanan. La transmission du message de 100 mots dure 67 minutes. Le câble tombera en panne au bout de trois semaines, avant d'être reconnecté durablement en 1866.

### 1.1.5 Le télégraphe parlant

Alors que le télégraphe électrique se déploie à travers le monde, une nouvelle technique voit le jour sous le nom de télégraphe *parlant*. De nombreux chercheurs avaient eu l'intuition du téléphone. C'est le cas du français Charles BOURSEUL, agent du télégraphe, qui démontre en 1854 que les vibrations acoustiques générées par la voix humaine peuvent être transmises de manière identique au télégraphe électrique. Il rencontre alors un scepticisme général et n'a pas les moyens matériels de développer son invention. Ce n'est qu'en 1889 que la France le reconnaîtra comme le véritable père du téléphone, en l'élevant au grade de Chevalier de la Légion d'honneur.

C'est toutefois en 1876 que l'américain Alexander Graham BELL est identifié comme l'inventeur du téléphone, non sans susciter une certaine polémique avec l'italien Antonio MEUCCI, qui a déposé le premier brevet sur l'invention quelques semaines avant celui de Bell. Les institutions américaines reconnaîtront définitivement l'antériorité de l'invention et des brevets de Meucci en ... 2002. Tout comme le télégraphe, le système de Bell est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. Dans les premières versions, les vibrations de pression acoustique communiquées par la voix à la membrane du transmetteur (une plaquette en bois solidaire de crayons en graphite) entraînent une variation du flux magnétique d'un barreau aimanté placé devant lui, générant un courant électrique par induction. Le signal acoustique est ainsi transformé en un signal électrique analogique. Dans le récepteur, le courant électrique venant de la ligne téléphonique est envoyé dans un électroaimant qui agit sur une plaque souple dont les vibrations reconstituent la voix. A son origine et malgré des performances satisfaisantes, le téléphone n'intéresse que peu de monde en raison de son assimilation à la sonnette des domestiques.

Les premières lignes téléphoniques suivent le développement du télégraphe et n'offrent alors que des liaisons point-à-point, multipliant le nombre de fils en environnement urbain (figure 1.2.a). Le grand blizzard qui ravage la côte ouest des Etats-Unis en mars 1888 détruit une grande partie des lignes téléphoniques et accélère le processus d'enfouissement des câbles. La création de *centraux de commutation* devient rapidement une nécessité. C'est chose faite en 1878, date de mise en service du premier central téléphonique dans le Connecticut. Le premier système électromécanique de commutation est mis au point en 1891. On compte alors 1,5 million de téléphones aux Etats-Unis. La qualité des premières liaisons inter-urbaines n'est toutefois pas fameuse. Les lignes sont réalisées au moyen de deux fils de cuivre ou de bronze. Mais il faut augmenter le diamètre des fils pour lutter contre l'affaiblissement du signal et la quantité de cuivre nécessaire pour les longues distances rendait prohibitif le coût de ce mode de transmission. Le britannique



**FIGURE 1.2** – a) Paysage urbain de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, avant la mise en place des câbles à paires torsadées (b) et c) Schéma en coupe d'un câble coaxial.

Oliver HEAVISIDE avait mis au point dans les années 1880 le modèle théorique de ligne de transmission à constantes distribuées. Il avait montré que l'affaiblissement linéique d'une ligne peut être diminué en interposant régulièrement sur le câble une inductance de valeur calibrée en fonction des paramètres physiques de la ligne. S'inspirant de ces travaux, les solutions viennent au tout début des années 1900. Le danois Carl Emil KRARUP propose d'envelopper le conducteur de cuivre d'une matière possédant des propriétés magnétiques (un fil de fer par exemple), et le serbo-américain Mihajlo PUPIN suggère le placement à intervalles réguliers d'inductances le long des câbles de communication. En réalisant l'adaptation d'impédance suggérée par Heaviside, ces bobines permettent de réduire l'affaiblissement des câbles téléphoniques interurbains et d'accroître la portée des communications téléphoniques, tout en diminuant le diamètre des conducteurs. La Bell Company achète tous ses brevets en 1901. Toutefois, s'ils résolvent le problème dans les basses fréquences, les câbles « pupinisés » présentent des forts affaiblissements dans les hautes fréquences, et le salut ne viendra finalement qu'avec l'introduction de répéteurs amplificateurs. Les premiers câbles régionaux sont posés avec des *répéteurs* tous les 60 kms, tel le Paris-Bordeaux, posé en 1929. Jusqu'à la seconde guerre mondiale, les câbles téléphoniques sont constitués de « paires » ou de quarts de fils (figure 1.2.b). Après la guerre, les artères à grande distance, qui écoulent des milliers de communications téléphoniques régionales, utilisent un autre type de câble plus performant, le câble *coaxial*, schématisé sur la figure 1.2.c. Ce câble peut transmettre des bandes de fréquence beaucoup plus larges qu'une paire de fils, permettant ainsi le multiplexage fréquentiel d'un plus grand nombre de voies ainsi que la diminution de la quantité de fils nécessaires aux différentes liaisons. On l'utilisera dès la fin des années 1960 dans l'industrie naissante de la cablo-distribution.

### 1.1.6 Du transistor au circuit intégré

En 1883, l'américain Thomas EDISON, qui étudiait le phénomène de dégradation du filament de sa lampe à incandescence, remarqua qu'un courant électrique pouvait passer entre la plaque métallique, qu'il avait introduite dans l'ampoule, et le filament. Cette génération de flux d'électrons par un métal porté à haute température est exploitée par la britannique John Ambrose FLEMING<sup>5</sup>, alors ingénieur chez Marconi, qui invente et brevète en 1904 la *diode à vide*. Ce tube redresseur de courant comporte deux électrodes : la cathode (un filament pointu), chauffée, émet des électrons que l'anode (une plaque) peut capter, tandis que le contraire n'est pas possible. La diode à vide est considérée comme le premier composant électronique. Deux ans plus tard, l'américain Lee DE FOREST ajoute au redresseur de Fleming une grille de contrôle entre le filament et la plaque et obtient un détecteur radio à tube, baptisé « audion ». Il perfectionne son invention avec Edwin ARMSTRONG<sup>6</sup> et met au point la *triode*, premier amplificateur électronique. Ce dispositif se révèle déterminant dans le déploiement du réseau téléphonique, des liaisons radio à longue distance, du *radar*<sup>7</sup> et des premiers calculateurs électroniques.

Au début des années 1930, pour pallier la piètre fiabilité des commutateurs téléphoniques de l'époque, qu'ils soient à relais électromécaniques ou à tubes à vide, les laboratoires Bell se lancent dans l'exploration d'interrupteurs plus fiables fondés sur un nouveau concept physique, les semi-conducteurs. Ces matériaux isolants possèdent une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent rejoindre la bande de conduction. La théorie des semi-conducteurs s'est développée dans les années 1920 à partir des travaux théoriques des français Louis DE BROGLIE et Léon BRILLOUIN, du hongrois Eugene WIGNER et du suisse Félix BLOCH. On cherche dans un premier temps à construire des transistors<sup>8</sup> à effet de champ, sortes de triodes à l'état solide, sans toutefois parvenir à les fabriquer. Le dispositif semi-conducteur comporte trois électrodes actives, et doit permettre de contrôler un courant sur une des électrodes de sorties grâce à une électrode d'entrée. C'est le physicien autrichien Julius LILIENTHAL qui dépose le premier brevet décrivant le fonctionnement et l'utilisation d'un dispositif à effet transistor dès 1925, sans aucune démonstration expérimentale, toutefois. Après une vingtaine d'années de développements théoriques et d'essais en laboratoire, c'est en 1947 que naît aux Bell Labs le *transistor bipolaire*. Les inventeurs en sont les américains William SHOCKLEY, Walter BRATTAIN et John BARDEEN, qui recevront le prix Nobel de physique en 1956. Le transistor ouvre de nouvelles perspectives pour détecter et amplifier les courants électriques, car il est à la fois beaucoup plus compact et plus robuste que le tube électronique, et fonctionne instantanément avec des tensions mille fois plus faibles.

Cette première génération de transistors utilise du cristal de germanium présentant des performances fluctuant en fonction de la température. En 1954, la société Texas Instrument (fondée en 1941 à Dallas) fabrique et commercialise le premier transistor en silicium, plus stable. La taille des transistors se réduit à celle d'un grain de sable, mais la densité des fils de connexion freine le développement de circuits complexes. La solution

---

5. A ne pas confondre avec son homonyme et compatriote John Alexander Fleming, découvreur de la péniciline en 1928.

6. Le futur inventeur de la contre-réaction et de la modulation de fréquence.

7. RAdio Detection And Ranging.

8. TRANSfer resISTOR.

vient du circuit intégré, regroupant composants électroniques et liaisons métalliques dans un matériau semiconducteur d'un seul bloc. Le premier brevet de circuit intégré est déposé 1959 par Jack KILBY de Texas Instrument. Il devance de deux mois la société Fairchild, qui possède toutefois la solution pour fabriquer ces circuits intégrés en très grande quantité (procédé Planar). Inventeur génial, Kilby développera par la suite la calculatrice de poche et l'imprimante thermique et partagera le prix Nobel de physique en 2000 avec l'allemand KROMER et le russe ALFEROV, deux autres précurseurs de la physique et des structures à semi-conducteurs.

La diffusion des transistors et des circuits intégrés dans les équipements électroniques s'accélère avec les pressions conjuguées de la Guerre Froide et de la conquête spatiale. Aux Etats-Unis, le lancement du programme Apollo, doté de 25 milliards de dollars, donne un coup d'accélérateur aux recherches sur les calculateurs et les circuits intégrés. En 1965, la production annuelle de transistors dépasse les 600 millions d'unités outre-Atlantique. La même année, l'américain Gordon MOORE, de la société Fairchild, énonce la loi qui portera son nom, conjecturant que la densité d'intégration dans un circuit intégré doublera tous les ans. Bien que corrigée quelques années plus tard à 18 mois, cette règle se révèle encore exacte de nos jours. Moore fonde en 1968 la société Intel<sup>9</sup>, qui produit en 1971 le premier microprocesseur, portant la référence 4004. Alimenté en 15 volts et aussi puissant que le premier ordinateur (ENIAC<sup>10</sup>), il fonctionne sur 4 bits et intègre 2300 transistors. Il est utilisé l'année suivante par la NASA pour le projet de sonde spatiale Pioneer 10.

De nos jours, les puces les plus performantes comportent plusieurs milliards de transistors, connectés par des liens (pistes) de quelques dizaines de nm d'épaisseur, se rapprochant de la distance inter-atomique au sein du matériau semi-conducteur.

### 1.1.7 L'émergence des radiocommunications

Dans les années 1860, le britannique James Clerk MAXWELL réalise une synthèse des études antérieures sur l'électromagnétisme en unifiant les propriétés électriques, magnétiques et lumineuses de la matière. Ses résultats sont accueillis en 1865 avec un grand scepticisme. En 1887, l'allemand Heinrich Rudolf HERTZ confirme cette théorie en mettant en évidence les ondes électromagnétiques (o.e.m.), et en montrant qu'elles possèdent toutes les propriétés de la lumière. Leurs applications pratiques –qu'elles soient guidées dans une ligne ou non– se multiplient dès lors : réception des signaux radio par le français Edouard BRANLY grâce à son *cohéreur à limaille* (1890), première antenne radio-réceptrice par le russe Alexandre POPOV en 1896, et la même année, première transmission radio de messages télégraphiques sur 12 km par l'italien Guglielmo MARCONI à Salisbury (U.K.). En 1901, la *Marconi's Wireless Telegraph Corporation* réalise la première liaison télégraphique transatlantique entre les Cornouailles et Terre-Neuve (3400 km).

En ce début de XX<sup>e</sup> siècle, plusieurs problèmes doivent être résolus pour permettre de meilleures performances en matière de transmission : trouver des composants capables d'émettre des puissances élevées, améliorer la sensibilité des récepteurs et enfin manipuler et filtrer les signaux reçus. Le tube triode de De Forest (1906) sera, jusqu'à l'invention

---

9. Integrated Electronics.

10. Electronic Numerical Integrator and Computer, conçu en 1946 à l'Université de Pennsylvanie.