

Deuxième partie

Les principes de la réalisation
physique

Chapitre 2

Codage de l'information

Nous avons vu au chapitre précédent le principe théorique de ce que doit faire un ordinateur. Ceci est suffisant pour l'utiliser et passer aux problèmes de programmation. Cependant, même si l'on n'a pas de raison particulière de savoir comment est réalisé effectivement un ordinateur, il est bon d'avoir quelques notions sur sa réalisation, ne serait-ce que par curiosité.

Le problème est maintenant le suivant : comment sont réalisées effectivement les machines correspondant aux principes décrits au chapitre un ? Nous allons en donner les grands principes tout en montrant comment on peut réaliser une telle machine. Nous ne décrirons pas nécessairement la technologie utilisée aujourd'hui pour cela. Ce qui compte ici, c'est de montrer qu'on peut en réaliser une. Nous verrons de plus quelques limites à cette réalisation, ces limites ne dépendant pas de la technologie utilisée.

Le premier problème, celui abordé dans ce chapitre, est comment coder les données et les résultats, qui fait l'objet de ce qui est appelé **codage de l'information** en informatique.

2.1 Le contexte

Première idée fondamentale : utilisation de l'électricité.- La première grande idée à la base de la technologie des ordinateurs actuels est d'utiliser l'électricité et non plus des systèmes mécaniques, alors que c'était le cas de la machine de Pascal. Ceci ne veut d'ailleurs pas dire que l'on ne peut pas réaliser un ordinateur entièrement mécanique : BABBAGE a montré, dans les années 1830, que cela est possible. Mais la technologie en est délicate et l'idée est aujourd'hui abandonnée, surtout pour des raisons de vitesse d'exécution.

Deuxième idée fondamentale : calculateur numérique.- Comment représenter les données et les résultats ? On parle de l'**information** pour faire plus court. Une première idée est d'utiliser une caractéristique du courant (intensité, tension...), qui est une grandeur continue, c'est-à-dire à valeur dans l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels, ce qui permet de représenter de façon naturelle les nombres réels. On parle de **calculateur analogique** dans ce cas. Cependant, on s'est vite aperçu que la précision n'est pas très bonne. Là encore, les calculateurs analogiques sont abandonnés de nos jours.

L'idée retenue est finalement la suivante : on s'intéresse simplement au fait qualitatif du passage du courant. Ceci permet de distinguer deux états dans un fil électrique : l'état « le courant passe » et l'état « le courant ne passe pas ». Dans ce qu'on appelle la **logique positive**, le premier état est représenté par le symbole 1 et le second par le symbole 0 (par 0 et par 1 respectivement en **logique négative**). On parle de **calculateur numérique** (*digital computer* en anglais) lorsqu'on retient cette idée.

On appelle **bit** (pour l'anglais *BI*nary *diGI*T) l'un des deux états 0 ou 1.

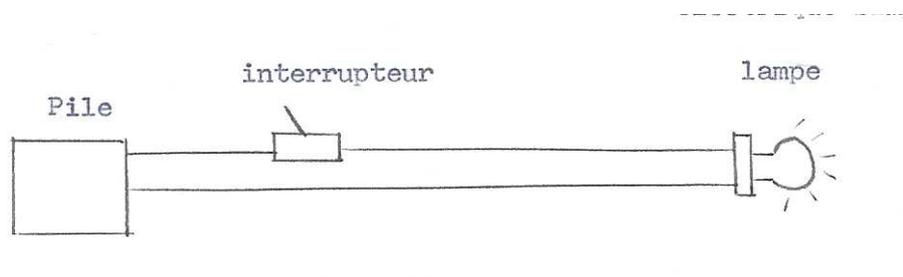


FIGURE 2.1 – Principe de la transmission d'un bit

Principe de transmission de l'information.- Considérons par exemple le circuit électrique simple de la figure 2.1 constitué d'une pile, d'un interrupteur, d'un porte-ampoule muni d'une ampoule et de fils. Lorsque l'interrupteur est dans une certaine position, appelons-la 0, le courant ne passe pas dans le circuit et l'ampoule ne brille pas. Dans l'autre position, appelons-la 1, le courant passe et l'ampoule brille.

Ceci nous permet de transmettre un bit, et donc de l'information, sur une certaine distance, par exemple d'une pièce à une autre.

Quantification de l'information à transmettre.- La transmission de bits permet de transmettre de l'information.

Par exemple pour indiquer qu'il est occupé, le directeur appuie sur un interrupteur et une ampoule rouge indique à l'extérieur qu'il ne faut pas entrer.

Bien entendu l'information que l'on veut transmettre peut être plus élaborée. On veut par

exemple transmettre le gagnant d'une épreuve parmi trois candidats, disons A, B et C. On se servira alors de deux bits et non plus d'un seul. Les bits seront numérotés 1 et 2 et on conviendra, par exemple, du **code** suivant :

Bit 1	Bit 2	Signification
0	0	candidat A
0	1	candidat B
1	0	candidat C
1	1	pas de signification

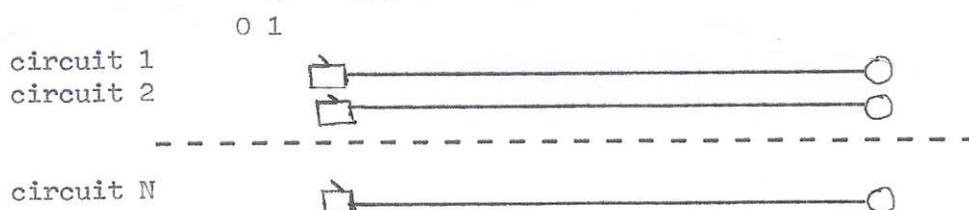


FIGURE 2.2 – Principe de la transmission de l'information

Plus généralement, soient n circuits du type simple de la figure 2.1, numérotés de 1 à n , représentés schématiquement à la figure 2.2. Plus n est grand, plus l'information que l'on peut transmettre est élaborée.

Codage et décodage de l'information.- Pour transmettre de l'information en utilisant des bits, il faut que l'expéditeur et le destinataire conviennent d'un code, comme nous l'avons fait pour les deux problèmes précédents.

Une fois ce code déterminé, on passe au **codage** de l'information : l'expéditeur code ce qu'il veut transmettre (*to encode* en anglais), l'envoi, fait savoir au destinataire qu'il peut lire ce qu'il a envoyé, grâce à une petite sonnette par exemple, et le destinataire le **décode**.

Remarques.- 1^o) Remarquons que la transmission exige un temps de préparation. Ceci est le cas de toutes les façons de faire. On appelle **cycle machine** le temps nécessaire pour effectuer une instruction très élémentaire. Dans notre dispositif, la durée du cycle machine est très long. Les ordinateurs modernes battent à quelques GHz, un GHz représentant un million de cycles machines par seconde.

- 2^o) Certains verront une limitation à notre système rudimentaire de transmission de l'information : que se passe-t-il si une ampoule grille? Malheureusement ce type de limitation est inhérent à tout dispositif, quel qu'il soit. Il faut tester de temps en temps la **fiabilité** du dispositif.

Données à représenter.- Quelles sont les données à représenter? Des nombres certainement tout d'abord, pour effectuer des calculs. Rappelons que l'on distingue plusieurs ensembles de nombres : l'ensemble \mathbb{N} des entiers naturels, l'ensemble \mathbb{Z} des entiers relatifs, l'ensemble \mathbb{Q} des rationnels, l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels, l'ensemble \mathbb{C} des nombres complexes... Pour les calculateurs

analogiques, l'ensemble de nombres de base à représenter est celui des nombres réels. Pour les calculateurs numériques il s'agit de celui des entiers (relatifs).

Cela ne signifie pas que l'on utilise un calculateur analogique lorsqu'on veut travailler avec les nombres réels et un calculateur numérique lorsqu'on veut travailler avec les entiers. Dans les deux cas on travaille avec les autres ensembles de nombres en **codant** leurs éléments, c'est-à-dire qu'on les représente en spécifiant une convention pour cela.

À part les nombres, on a aussi besoin de coder du texte. Le développement de l'informatique a montré que l'on peut également coder des images, des photos, du son, des vidéos et d'autres types de données.

Pour traiter des problèmes variés, les ordinateurs commencent par coder un type élémentaire. Pour les calculatrices, il s'agit des nombres (entiers relatifs et nombres à virgule). Les ordinateurs modernes sont orientés texte plutôt que nombres.

Bit, quartet, octet et mot.- On appelle **quartet** (ou **demi-octet**, *nibble* en anglais) un groupe de quatre bits. On appelle octet (*byte* en anglais) un groupe de huit bits. Plus généralement on appelle **mot** un groupe d'un certain nombre de bits qui dépend du contexte, en général du processeur.

Remarques.- 1^o) À la vérité le mot anglais *byte* veut dire multiplet, si bien que l'on rencontre dans la littérature des expressions comme *a seven bit byte* ou *an eight bit byte*. Mais ce mot a fini par désigner un octet. Le mot *octet* existe également en anglais mais il n'est utilisé techniquement que dans le cadre des télécommunications, en particulier dans le cadre des réseaux informatiques.

- 2^o) Faites bien attention que *mot* dans le sens donné ici n'a pas de rapport avec les mots d'un texte.

2.2 Codage des entiers naturels

Représentation des entiers naturels.- Comment représenter un entier naturel sur un calculateur numérique? La réponse est apportée par le principe de la *numération* : tout entier naturel se représente par une suite de *chiffres* (*digit* en anglais). Il y a dix chiffres différents (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) dans la numération habituelle, dite **numération décimale**. Cependant on peut utiliser d'autres *bases* de numération que la base dix, par exemple la base soixante pour repérer les angles en degré.

La numération la mieux adaptée à notre situation, avec deux états (le courant passe ou le courant ne passe pas) est celle de base deux, appelée **numération binaire**. Dans ce cas on n'utilise que deux chiffres : 0 et 1. Soit un nombre écrit en binaire, par exemple 1011. Il peut être représenté par quatre fils (numérotés) dans certains desquels passe un courant et où dans d'autres le courant ne passe pas : dans notre exemple le courant ne passe pas dans le fil n° 3 si on numérote les fils de 1 à 4, le fil numéro un représentant les unités.



FIGURE 2.3 – Numération binaire

On voit dès lors l'intérêt en informatique d'utiliser la numération binaire au lieu de la numération décimale usuelle. Comme on sait faire autant de choses avec l'une qu'avec l'autre, cela n'apporte pas de complication (théorique) supplémentaire. Il faut par contre commencer par traduire tous nos nombres (qui sont exprimés en décimal lorsqu'ils proviennent d'un problème de la vie courante, par tradition) en binaire. Cela peut apporter un surcroît de travail lorsqu'on l'effectue à la main mais on sait aussi construire des traducteurs automatiques.

Première limitation : dans l'amplitude des nombres représentés.- Soit alors un certain nombre de fils, disons n , numérotés de 1 à n . On peut représenter les entiers naturels de 0 à $2^n - 1$. Ce ne sont pas tous les entiers naturels mais il est de toute façon sans espoir de trouver une façon concrète de les représenter tous.

Ceci nous conduit à une première limitation dans la pratique par rapport à notre modèle théorique dans lequel un registre pouvait contenir un entier naturel aussi grand que l'on voulait.

On ne représente pas tous les entiers mais un intervalle fini d'entiers.

On peut toujours essayer de se consoler en se disant que l'on ne considère que des entiers relativement petits dans la vie courante et qu'il suffit de prendre n assez grand pour représenter tous ceux qui sont nécessaires. Cependant les nécessités dépendent des domaines d'application et, quel que soit le n choisi, il existe presque toujours un domaine pour lequel ceci est insuffisant.

2.3 Codage des textes

L'alphabet le plus utilisé en informatique il y a encore peu de temps était l'alphabet ASCII.

DÉFINITION 1 .- On appelle **alphabet ASCII** (lire *aski*) l'alphabet défini en 1963 par l'*American Standard Code for Information Interchange* constitué des 128 caractères suivants :

- 33 caractères dits *spéciaux* :

Nom	Acronyme de	Signification
NUL		
SOH	<i>Start Of heading</i>	début d'en-tête
STX	<i>Start of TeXt</i>	début de texte
ETX	<i>End of TeXt</i>	fin de texte
EOT	<i>End Of Transmission</i>	fin de transmission
ENQ	<i>ENQuiry</i>	interrogation
ACK	<i>ACKnowledge</i>	accusé de réception
BEL	<i>BELL</i>	sonnerie
BS	<i>BackSpace</i>	espace arrière
HT	<i>Horizontal Tabulation</i>	tabulation horizontale
LF	<i>Line Feed</i>	interligne
VT	<i>Vertical Tabulation</i>	tabulation verticale
FF	<i>Form Feed</i>	présentation de feuilles
CR	<i>Carriage Return</i>	retour chariot
SO	<i>Shift Out</i>	code spécial
SI	<i>Shift In</i>	code de retour à la normale
DLE	<i>Data Link Escape</i>	code d'échappement
DC1	<i>Device Control 1</i>	commande de périphérique
DC2		
DC3		
DC4		
NAK	<i>Negative AcKnowledge</i>	accusé de non réception
SYN	<i>SYNchronous idle</i>	synchronisation
ETB	<i>End of Transmission Block</i>	fin de bloc de transmission
CAN	<i>CANcel</i>	annulation
EM	<i>End of Medium</i>	fin de support
SUB	<i>Substitution</i>	substitut
ESC	<i>ESCAPE</i>	échappement
FS	<i>File Separator</i>	séparateur de fichier
GS	<i>Group Separator</i>	séparateur de groupe
RS	<i>Record Separator</i>	séparateur d'enregistrement
US	<i>Unit Separator</i>	séparateur d'unité
' '		espace

- et les symboles suivants :

'!' " ' # ' \$ ' % ' & ' ' ' (') ' * '
 ' + ' , ' - ' . ' / ' 0 ' 1 ' 2 ' 3 ' 4 '
 ' 5 ' 6 ' 7 ' 8 ' 9 ' : ' ; ' < ' = ' > '
 ' ? ' @ ' A ' B ' C ' D ' E ' F ' G ' H '
 ' I ' J ' K ' L ' M ' N ' O ' P ' Q ' R '

'S' 'T' 'U' 'V' 'W' 'X' 'Y' 'Z' '[' '\'
 ']' '^' '<' ' ' ' ' 'a' 'b' 'c' 'd' 'e'
 'f' 'g' 'h' 'i' 'j' 'k' 'l' 'm' 'n' 'o'
 'p' 'q' 'r' 's' 't' 'u' 'v' 'w' 'x' 'y'
 'z' '{' '|' '}' '~' DEL.

DÉFINITION 2.- Le **code ASCII** est une façon de coder l'alphabet ASCII, tout simplement en numérotant les caractères de cet alphabet de 0 à 127 dans l'ordre que nous venons d'indiquer.

Exercice 1.- *Écrire en ASCII le texte suivant :*

Exercice 2.- *Écrire en clair le texte dont le code ASCII est :*

Remarque.- Cet alphabet, conçu aux États-Unis, n'est pas adapté aux langues autres que l'anglais. Il a été porté de 128 caractères à 256 un peu plus tard (*alphabet C.C.I.T.T. n° 5*) par le *Comité Consultatif International des Télégraphes et Téléphone*. Cependant cet alphabet à 256 caractères n'est pas universel : il est, par exemple, modifié pour la France en suivant une norme AFNOR (*Association Française de NORMALISATION*).

Désormais l'alphabet *unicode* de 65 536 caractères (les 128 premiers symboles sont les mêmes que ceux de l'alphabet ASCII) fait référence; c'est celui qui est utilisé dans le langage de programmation JAVA.

2.4 Appendice : conversions

Exercice 1.- *Donner la représentation binaire de 99 (écrit en décimal).*

Exercice 2.- *Donner la représentation décimale de 10110111b.*

Exercice 3.- *Donner la représentation en base quinze de $99A_{17}$ (écrit en base dix-sept comme l'indique l'indice).*

Exercice 4.- *Effectuer l'addition en binaire :*

Exercice 5.- *Effectuer la soustraction en binaire :*

Exercice 6.- *Effectuer la multiplication en binaire :*

Exercice 7.- *Effectuer la division euclidienne en binaire :*

2.5 Historique

2.5.1 Utilisation de l'électricité

Les premiers outils d'aide aux calculs furent les abaques puis les calculatrices mécaniques telles que la machine de Pascal. Le premier ordinateur (conçu mais non réalisé) est la machine de Babbage au XIX^e siècle, entièrement mécanique, mue par une machine à vapeur.

Il semble que la première personne à avoir eu l'idée d'utiliser l'électricité pour effectuer des calculs soit George STIBITZ en 1937, mathématicien aux *Bell Telephone Laboratories* : il observe la similitude entre les nombres binaires et les circuits faisant intervenir les relais téléphoniques ; il emprunte quelques-uns de ceux-ci et réalise un circuit expérimental permettant d'additionner deux chiffres binaires.

George Robert STIBITZ est né le 20 avril 1904 à York en Pennsylvanie. Il passe son enfance à Dayton, dans l'Ohio, où son père enseigne la théologie. La ville abrite le quartier général d'une entreprise florissante : *National Cash Register* (NCR). Cette firme a créé une école technique, placée sous la direction de Charles KITTERING. Inventeur prolifique, connu du grand public comme le père du démarreur électrique pour les voitures, il est surtout l'un des grands animateurs techniques de NCR. Après une formation très concrète dans cet établissement, STIBITZ suit des cours de philosophie à Granville (Ohio), puis s'inscrit à l'*Union College* de Schenectady (dans l'état de New-York) où il passe une maîtrise ès sciences en 1927. Il occupe alors un emploi temporaire aux laboratoires de recherche de *General Electric* puis reprend ses études. Après la philosophie et la physique générale, STIBITZ s'oriente vers la physique mathématique à l'université Cornell. Il y obtient en 1930 un doctorat de physique avec une thèse sur les vibrations des membranes non planes. Cette fois, à vingt-six ans, STIBITZ se juge suffisamment armé pour affronter la vie active et se fait engager par les laboratoires de Bell Telephone (« Ma Bell », Maman Bell, comme on appelait familièrement cette entreprise), laboratoires alors situés à New-York City. Il y travaille onze années, jusqu'en 1941.

L'entreprise Bell, qui a créé le premier téléphone commercial en 1877 (un cornet unique, alternativement porté à l'oreille et à la bouche), puis les premières cabines téléphoniques entre 1890 et 1900, veut maîtriser les problèmes posés par la création de grands centraux téléphoniques et rester à la pointe de son secteur industriel, d'où la création des laboratoires.

À l'automne 1937, la direction des laboratoires Bell charge STIBITZ d'étudier comment perfectionner les éléments magnétiques inclus dans les relais téléphoniques. Tout en poursuivant ses recherches, STIBITZ est frappé par les riches possibilités de ces petits composants que sont les relais : ils peuvent matérialiser de façon parfaite les deux états binaires de base, 1 et 0. À peine adolescent, il avait appris l'arithmétique binaire : sa mère, professeur d'algèbre, lui a donné à lire un traité sur ce sujet.

Ceci est la partie la plus intéressante de l'histoire pour nous. Disons cependant ce qu'il est advenu de cette découverte. STIBITZ montre son modèle à ses collègues des *Bell Labs*. T. C. FRY, chef du groupe de STIBITZ, lui demande en été 1938 de construire une machine permettant de manipuler les nombres complexes.

2.5.2 Utilisation de la numération binaire

Konrad ZUSE est le premier concepteur de calculateur à utiliser la numération binaire, en 1934 dans le cadre de la conception de son Z1, à technologie mécanique, en Allemagne. Indépendamment, George STIBITZ a la même idée aux États-Unis en 1937, comme nous venons de le voir. Ceci ne veut pas dire que cette idée soit appliquée de façon universelle d'emblée : il faut attendre le début des années 1950 pour que la numération binaire soit employée de façon exclusive sur les calculateurs.

La numération binaire est utilisée par des peuplades dites primitives	Découverte
Bien avant son utilisation effective par ZUSE et STIBITZ, de nombreux auteurs recommandent l'utilisation de la numération binaire pour les calculs.	Emploi
Même après le premier emploi par ZUSE et STIBITZ, beaucoup de concepteurs de calculateurs continuent à utiliser la numération décimale.	Déploiement

2.5.3 Le codage des textes

Le codage des textes pour la transmission à distance date des premiers procédés de transmission à distance. Les premiers codes sont liés aux signaux de fumée des indiens (*native American*) d'Amérique du Nord ou à l'usage du tam tam dans certaines civilisations africaines mais on ne connaît pas le détail du code utilisé. Il faut attendre la fin du XVIII^e siècle pour que soit organisé un réseau de communication à distance systématique ; jusque-là, le messenger à pied, à cheval ou en bateau avait suffi ou on n'avait rien trouvé de mieux.

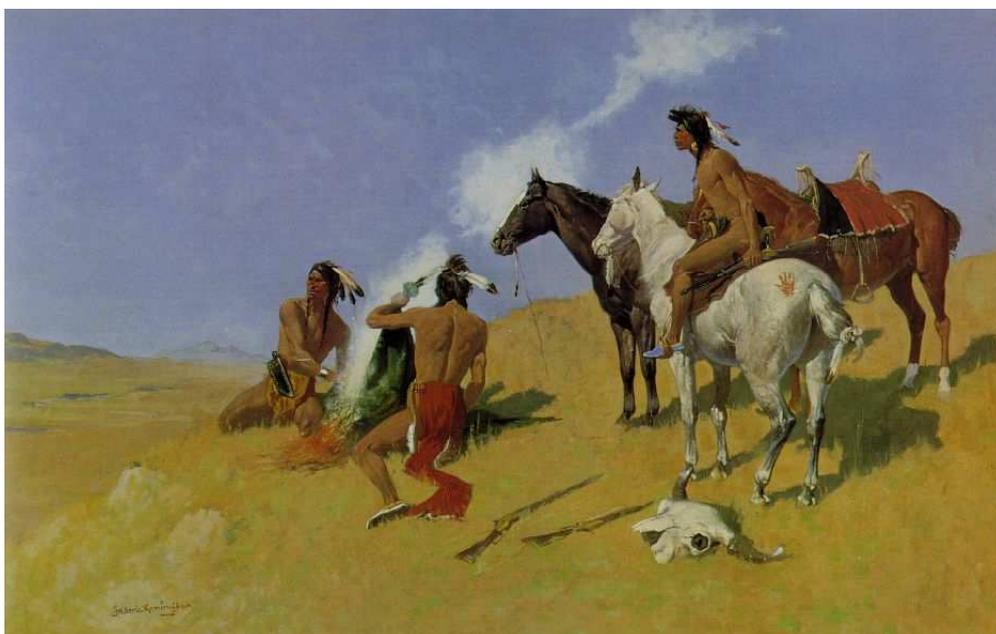


FIGURE 2.4 – Tableau de Frederic REMINGTON

On forme les signaux de fumée en couvrant et découvrant un feu à l'aide d'un large tissu, comme le montre le célèbre tableau de Frederic REMINGTON (figure 2.4), vulgarisé par les nombreux films de western. Avec de l'entraînement, on peut arriver à contrôler la taille, la forme et le rythme des signaux. On peut les observer à longue distance, et les relayer via plusieurs stations. On ne sait pas s'il existait un code standardisé ou si l'émetteur et le receveur se mettaient d'accord à l'avance sur le code.

Le poète ESCHYLE décrit, dans sa tragédie *Agamemnon*, une sorte de ligne télégraphique. Il suppose qu'Agamemnon, pour annoncer à sa femme Clytemnestre la prise de Troie, a échelonné, sur toute la route, des porteurs de flambeaux. Le poète fait parler ainsi le dernier homme chargé d'observer ces signaux : « *Grâce aux dieux, l'heureux signal perce l'obscurité. Salut, flambeau de*

Prémices

la nuit, qui fait luire un beau jour! ». Clytemnestre s'empresse d'annoncer la bonne nouvelle au chœur tragique. On lui demande quel messager a pu l'instruire si vite de cet événement heureux, et la reine l'explique en ces termes :

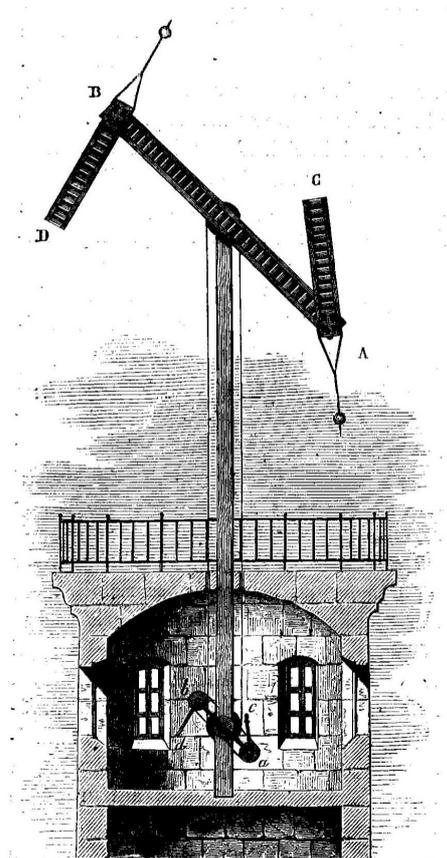


Fig. 19. — Télégraphe de Chappe.

FIGURE 2.5 – Télégraphe Chappe [Fig-68]

« Celui qui nous a appris cette nouvelle, c'est Vulcain, au moyen des feux qu'il a allumés sur le mont Ida. De foyer en foyer, la flamme messagère a volé jusqu'ici. Du mont Ida, le signal lumineux a passé Lemnos ; de cette île, le sommet du mont Athos a reçu le troisième signal. Ce signal, provenant d'un flambeau résineux, a voyagé sur la surface des eaux d'Hellé, et a doré de ses rayons le poste de Maciste. Celui-ci n'a point tardé à remplir son devoir, et son fanal a bientôt averti les gardiens du Messape aux bords de l'Euripe ; ils y ont répondu, et ont transmis le signal en allumant un monceau de bruyère sèche, dont la clarté, parvenant rapidement au delà des plaines de l'Asope, jusqu'au mont Cithéréen, a continué la succession de ces feux voyageurs. Le garde de ce mont a allumé un fanal, dont la lueur a percé comme un éclair jusqu'au mont d'Égiplanète, au delà des marais de Gorgopis, où les surveillants que j'avais placés, ont fait sortir d'un vaste bûcher des tourbillons de flamme, qui ont éclairé l'horizon jusqu'au delà du golfe Saronique, et ont été aperçus du mont Arachné. Là veillaient

ceux du poste le plus voisin de nous, qui ont fait luire sur le palais des Atrides ce feu si longtemps désiré! ».

Grille des signaux de correspondance			
1	26	47	72
2	27	48	73
3	28	49	74
4	29	50	75
5	30	51	76
6	31	52	77
7	32	53	78
8	33	54	79
9	34	55	80
10	35	56	81
11	36	57	82
12	37	58	83
13	38	59	84
14	39	60	85
15	40	61	86
16	41	62	87
17	42	63	88
18	43	64	89
19	44	65	90
20	45	66	91
21	46	67	92
22		68	
23		69	
24		70	
25		71	

FIGURE 2.6 – Code utilisé pour le télégraphe Chappe

On ne sait pas si ESCHYLE rapporte en ces termes un fait historique, ou seulement le fruit de son imagination. Mais ce passage du tragique grec nous montre que l'emploi de signaux convenus d'avance pour annoncer une nouvelle, est alors connu. Bien entendu, nous ne savons rien du code utilisé.

On connaît d'autres essais de télégraphie (voir [Cha-25] et [Fig-68], chapitre un) mais pour *écrire de loin*, selon l'objet et l'étymologie du télégraphe, il faut *voir de loin*. L'invention de la lunette d'approche peut seule permettre l'art de la télégraphie (optique). Le physicien français Guillaume AMONTONS (1663–1705) a l'idée en 1690 (d'après son éloge par FONTENELLE) de se servir d'une lunette pour observer les signaux transmis par des postes fixes.

Aucune des idées n'est réellement mise en place avant l'installation en 1794 du télégraphe Télégraphe optique

optique de l'ingénieur français Claude CHAPPE (1763–1805). Celui-ci ne détrône pas le messager à cheval, plus lent certes mais qui peut emporter avec lui une assez grande quantité de messages. Le système de Chappe (figure 2.5) est composé de bras mobiles : une longue barre de fer qui porte, à chacune de ses extrémités, deux autres barres plus petites, susceptibles de tourner autour de la barre principale, et de prendre ainsi toutes sortes de positions. Cette machine est disposée en haut d'une tour ; l'opérateur, placé dans une chambre au-dessous de cette tour, fait mouvoir les trois barres au moyen de cordes et de poulies. Il y a 116 tours de Paris à Toulon. Ce système convient pour des messages brefs ou des ordres à transmettre (un signal parvenait de Paris à Toulon en 20 minutes par beau temps). Bien entendu un code, conçu avec l'aide de Léon DELAUNAY (né en 1765), est associé à ce télégraphe (figure 2.6) mais nos codes actuels n'en sont pas des descendants.

Morse Code Alphabet		
The International morse code characters:		
A .-	N -.	0 -----
B -...	O ---	1 .----
C -.-.	P .-.-.	2 ..---
D -..	Q -.-.-	3 ...--
E .	R .-.	4-
F ..-.	S ...	5
G --.	T -	6 -....
H	U ..-	7 --...
I ..	V ...-	8 ----..
J .-.-.	W .--	9 ----.
K -.-	X -.-.	Fullstop .-.-.-
L .-..	Y -.-.	Comma -.-.-
M --	Z --..	Query ..-.-.

FIGURE 2.7 – Code Morse

La machine de Chappe est d'abord appelée *tachygraphe*, c'est-à-dire « qui écrit vite ». Dans une conversation qu'a au mois d'avril 1793 Ignace CHAPPE, frère de Claude CHAPPE, avec André-François MIOT, comte de Mélito (1763–1841), homme lettré, qui sera plus tard membre de

l'Institut, ministre plénipotentiaire et ambassadeur, ce dernier n'approuve pas ce nom et propose de le remplacer par *télégraphe*, c'est-à-dire « qui écrit de loin ».

Plusieurs essais de télégraphie électrique sont effectués dès le XVIII^e siècle (voir [Fig-68], Télégraphe électrique chapitre deux). Alessandro VOLTA (1745–1827), en inventant la pile électrique, permet à l'électricité de ne plus subir la déperdition de l'électricité statique utilisée jusqu'alors. Un physicien de Munich, Carl von STENHEIL (1801–1870), découvre en 1838 la possibilité de supprimer le second fil du circuit, en prenant la terre elle-même comme conducteur de retour. Il invente également le papier tournant se déplaçant devant un crayon. François ARAGO (1786–1853) découvre en 1820, en répétant l'expérience d'Ørsted, l'*aimantation temporaire du fer doux*, c'est-à-dire du fer pur, sous l'influence du courant électrique.

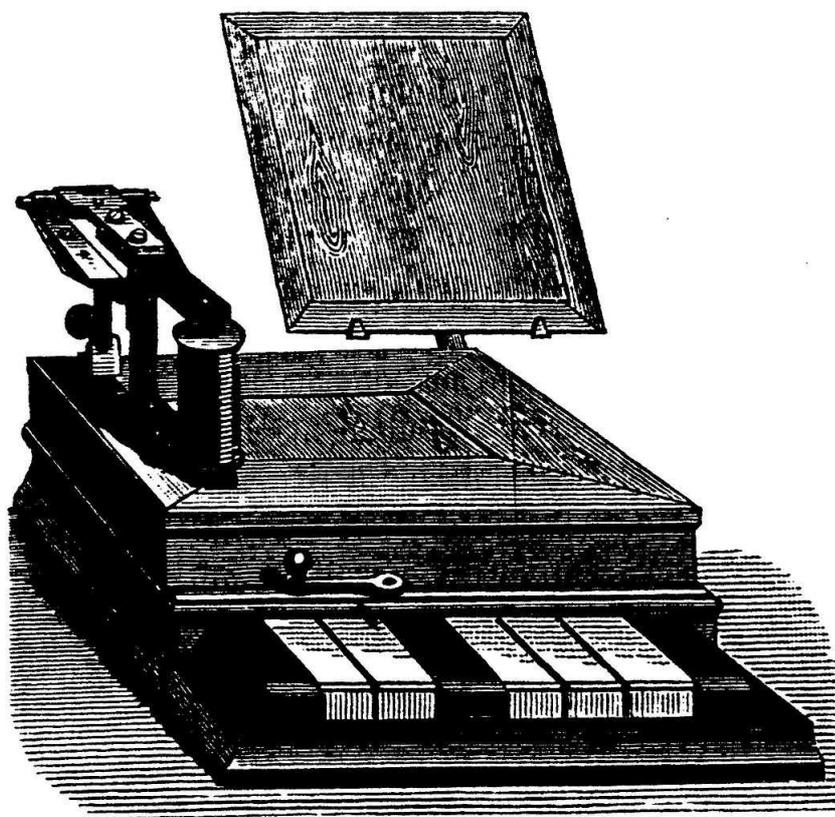


FIGURE 2.8 – Clavier télégraphique à 5 touches d'Émile Baudot, **Journal télégraphique**, vol. 8, n° 12, décembre 1884

Le télégraphe électrique est inventé en 1832 aux États-Unis par Samuel MORSE (1791–1872) et mis en place en 1844. Samuel MORSE est peintre et devient professeur à l'Athénée de New-York, où il discute souvent avec Freeman DANA qui fait un cours sur l'électromagnétisme, y expliquant entre autres comment construire un électro-aimant. MORSE effectue plusieurs séjours en Europe pour y étudier les œuvres d'art dans les musées. Lors du retour de son second séjour, sur le paquebot *Le Sully* en 1832, il conçoit son télégraphe. Dès son retour à New-York, il s'occupe de construire l'appareil télégraphique dont il a conçu l'idée. Mais ce n'est qu'en 1835 qu'il

peut être soumis à des expériences sérieuses. Un *manipulateur* permet de produire à distance les établissements et les interruptions de courant pendant le temps convenable. Une première ligne est construite de Washington à Baltimore en 1844.

Les nouvelles relatives à l'élection du président sont transmises avec tant de rapidité que tout le monde est convaincu dès ce moment des avantages de ce nouveau moyen de communication. Tout aussitôt se forment plusieurs compagnies pour en doter le pays.

Le codage des signaux, dans la première version mise au point, est assez complexe [Mor-38]. Le code fonctionne sur la base d'une combinaison de trois symboles : le trait, le point et l'inter-valle. Les points et les traits symbolisent des chiffres qui eux-mêmes renvoient aux mots d'un dictionnaire.

En 1838, MORSE propose la correspondance directe des traits et des points avec des lettres de l'alphabet : par exemple le 'E', la lettre la plus usitée, est représentée par un point. Il s'agit du fameux **alphabet Morse** (figure 2.7), que nous appellerions de nos jours *code Morse*. Là encore ce code n'a pas de lien avec les codes utilisés de nos jours en informatique.

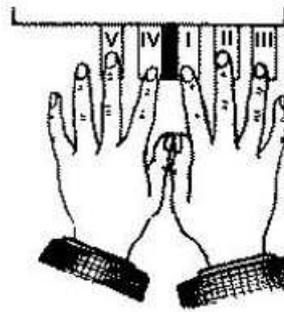


FIGURE 2.9 – Disposition des mains sur le clavier Baudot

HUGHES, professeur de physique à l'université de New-York, invente le télégraphe imprimant, non pas par une série de traits et de points, mais en lettres ordinaires d'imprimerie. Au poste de réception il suffit donc de couper la bande de papier imprimée qui sort de l'instrument, et l'on envoie au destinataire cette même bande de papier portant la dépêche. Cette invention ne connaît pas de succès aux États-Unis mais l'auteur vient à Paris où elle est déployée sur une ligne.

Multiplexage

La télégraphie électrique prend une extension considérable vu le nombre croissant de dépêches amené par l'abaissement des tarifs au début des années 1870. Pour répondre à cette augmentation, on commence par multiplier, sur les lignes les plus encombrées, le nombre de fils et celui des employés. Mais ce moyen n'est pas possible pour les lignes de grande étendue.

Le physicien WHEATSTONE apporte une première amélioration grâce aux *transmetteurs automatiques*, qui expédient les dépêches au moyen d'une bande de papier perforée (héritée des métiers Jacquard) à l'avance par l'expéditeur, et dont les trous correspondent aux caractères de l'alphabet Morse.

GINTL, de Vienne, a l'idée des *transmissions simultanées*, qui consiste à envoyer plusieurs dépêches à la fois sur le même fil, dans le même sens ou dans les deux sens opposés. Quand la

transmission des dépêches s'effectue simultanément entre deux postes reliés ensemble, on donne à ce mode de transmission le nom de **duplex**. Si on transmet simultanément deux dépêches dans un sens, et deux autres en sens contraire, le système employé prend le nom de **quadruplex**. La mise en œuvre est due à l'Américain STEARN.

Dans un troisième système, celui des *transmissions multiples*, on fait usage de plusieurs *appareils transmetteurs*, manœuvrés à la fois par autant d'employés. Cela consiste à diviser le temps de la transmission en intervalles réguliers et périodiques, dont chaque période est affectée à un appareil transmetteur distinct. Imaginé en 1860 par ROUVIER, inspecteur des lignes télégraphiques françaises, la première réalisation a lieu en 1871 par MEYER, employé de l'administration des télégraphes de Paris. Le télégraphe Meyer comprend trois appareils distincts : le *récepteur*, le *transmetteur* et surtout le *distributeur* qui permet d'envoyer tour à tour les dépêches de chacun des appareils. Mais il est rapidement abandonné au profit du *télégraphe Baudot*, qui fournit des dépêches imprimées et pas seulement les signaux *gaufrés* (traits et points) de l'alphabet Morse.

Le Français Émile BAUDOT (1845–1903) entre comme apprenti opérateur aux Postes et Télégraphes en 1869, où il apprend le maniement du code Morse et du télégraphe imprimant de HUGHES. Il conçoit un nouveau système télégraphique en 1870, breveté le 17 juin 1874 (brevet n° 103 898 « Système de télégraphie rapide »), dans lequel les signaux sont traduits automatiquement en caractères. Le matériel est constitué de trois parties : le clavier (figure 2.8), le distributeur et un ruban de papier. L'élément principal est le distributeur dans lequel un contact rotatoire effectue un bref contact avec une série de secteurs. Cinq contacts sont utilisés pour envoyer un groupe de signaux représentant un caractère. Le clavier est constitué de cinq touches type piano, dont deux sont frappées par la main gauche et trois par la main droite. Le code est conçu de façon à ce qu'on se le remémore facilement. Une fois le sous-ensemble des cinq touches appuyées, celles-ci sont bloquées jusqu'à ce que le contacteur passe sous elles, qui les libère en envoyant un clic suffisamment audible pour avertir l'opérateur qu'il peut préparer le caractère suivant. Au niveau du récepteur, le signal est temporairement stocké sur trois électro-aimants avant d'être décodé pour impression.

Code Baudot

Le système Baudot est accepté par l'administration française des télégraphes en 1875. Les premiers tests sont réalisés entre Paris et Bordeaux le 12 novembre 1877. Fin 1877, la ligne Paris-Rome, d'environ 1 700 kilomètres, est opérationnelle. Le système est présenté à l'exposition universelle de Paris en 1878, où il gagne la médaille d'or.

Le **code Baudot** binaire à cinq bits, développé par Émile BAUDOT en 1874, est également appelé **code télégraphique** ou **alphabet international (AI) n° 1**. Le tableau ci-dessous montre les diverses combinaisons de courants. Les signes + et - indiquent le sens des courants émis :

Repos	- - - - -
A ou 1	+ - - - -
B ou 8	- - + + -
C ou 9	+ - + + -
D ou 0	+ + + + -
E ou 2	- + - - -
É ou etc.	+ + - - -
F ou p	- + + + -
G ou 7	- + - + -
H ou H	+ + - + -
I ou o	- + + - -
J ou 6	+ - - + -
K ou (+ - - + +

L ou =	+ + - + +
M ou)	- + - + +
Blanc-chiffres	- - - + +
Erreur	- - - + +
N ou N°	- + + + +
O ou 5	+ + + - -
P ou %	+ + + + +
Q ou /	+ - + + +
R ou _	- - + + +
S ou ;	- - + - +
T ou !	+ - + - +
U ou 4	+ - + - -
V ou '	+ + + - +
W ou ?	- + + - +
X ou ,	- + - - +
Y ou 3	- - + - -
Z ou :	+ + - - +
T ou .	+ - - - +
Blanc-lettres	- - - - +

Les 32 caractères possibles ne permettent pas de coder les lettres et les chiffres. En 1901, le code Baudot original est modifié par Donald MURRAY, qui réorganise la disposition des caractères, ajoute de nouveaux symboles et introduit la notion de **jeu de caractères**. Comme il souhaite utiliser un clavier de machine à écrire, il n'y a plus de lien entre le code lui-même et la disposition des touches. Il organise donc les caractères de façon à ce que les transitions les plus courantes entre caractères génèrent un nombre minimal de transitions entre les cinq bits du code, ce qui minimise l'usure du matériel.

00	01	02	03	04	05	06	07
NUL	E 3	LF	A -	SP	S ' I	8	U 7
08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F
CR	D ENQ	R 4	J BEL	N ,	F !	C :	K <
10	11	12	13	14	15	16	17
T 5	Z +	L >	W 2	H £	Y 6	P 0	Q 1
18	19	1A	1B	1C	1D	1E	1F
O 9	B ?	G &	FIGS	M .	X /	U ;	LTRS
Letters			Figures			Control Chars.	

FIGURE 2.10 – Code Baudot

La *Western Union* modifie le code de Murray, en éliminant certains caractères. Le code obtenu est le code Baudot actuel, appelé **code CCITT n°2**. La figure 2.10 montre les deux jeux de caractères appelés *Lettres (Lower Case)* et *Chiffres (Upper Case)*. L'ensemble *Chiffres* contient aussi d'autres symboles (ponctuation, &, #...). Deux caractères *Inversion Lettres* (code 31) et

Inversion Chiffres (code 27) permettent de commuter entre les deux ensembles.

Les téléscripteurs

Au milieu des années 1930, les progrès du télégraphe sont tels qu'il est possible de se passer des opérateurs morse : les **téléscripteurs** sont capables de reproduire automatiquement et à distance un texte tapé sur un clavier de machine à écrire. Cependant la mise en relation des correspondants demeure le dernier obstacle à la réalisation d'un système entièrement automatique.

Les opérateurs télégraphiques commencent alors à développer des systèmes qui utilisent les cadrans rotatifs à impulsions déjà utilisés dans les réseaux téléphoniques pour mettre en relation les téléscripteurs. Ces machines sont appelées **Télex**, de la contraction des mots anglais *Telegraph exchange*. Les Télex commencent par établir une liaison grâce à l'envoi d'impulsions à des commutateurs rotatifs, puis ils émettent les messages en code Baudot. Ce système, appelé Télex de « type A », automatise entièrement l'envoi de messages.

Le premier grand réseau Télex est mis en place en Allemagne dans les années 1930. Il est destiné aux communications au sein du gouvernement. En France, le réseau Télex est inauguré par le Général de Gaulle le 18 juin 1946.

Généralement, les messages sont préparés à l'avance, sur des rubans perforés. Toutes les machines de Télex sont équipées d'un lecteur de ruban perforé à 5 bits, ainsi que d'un perforateur. Une fois que le ruban perforé a été préparé, on le repasse dans le Télex une fois la communication établie. Ainsi, le message peut être émis en un minimum de temps.

Dès le début des années soixante, IBM décide de lancer une série d'ordinateurs de différentes puissances qui soient compatibles entre eux. La **série 360**, lancée en 1965, s'impose rapidement. EBCDIC

La série 360 impose comme norme l'adoption, comme plus petite unité accessible en mémoire, du caractère de 8 bits et non plus du mot. L'une des innovations est la mise au point du code **EBCDIC** (pour *Extended Binary Coded Decimal Interchange Code*), une nouvelle manière de coder les caractères. Jusque-là les ordinateurs utilisaient des paquets de 6 chiffres binaires pour représenter l'ensemble des caractères utilisés, ce qui permettait de représenter au maximum 64 caractères. Mais pour des applications ordinaires, l'ensemble des signes utilisés dans un service comptable par exemple, il faut compter au moins 120 signes, si l'on inclut toutes les subtilités que sont les majuscules, les minuscules, les chiffres, les signes d'opération, la ponctuation, etc. Le code EBCDIC utilise 8 chiffres binaires au lieu de 6.

Le code EBCDIC anticipe de peu une nouvelle norme mise au point aux États-Unis en 1967 ASCII à l'usage des transferts d'information dans les télécommunications : la norme **ASCII** (pour *American Standard Code for Information Interchange*), qui prévoit la normalisation d'un code à 7 chiffres binaires. ASCII

Elle est inventée par l'Américain Bob BEMER en 1961. Sa dernière version stabilisée est normalisée par l'ANSI en 1986 sous la désignation ANSI X3.4 :1986.

2.6 Bibliographie

- [Cha-25] CHAPPE, Ignace, **Histoire de la télégraphie**, deux volumes, 1824. Version électronique téléchargeable sur *GoogleBooks*.
- [Eschyle] ESCHYLE, **Tragédies**, traduction de Paul Mazon seule, Belles Lettres, Collection Les grandes œuvres de l'antiquité classique, 1962, xxi + 409 p.
- [Fig-68] FIGUIER, **Les merveilles de la science**, tome II, 1868. Téléchargeable sur :
<http://www.gallica.fr>

[La première introduction historique à consulter pour le télégraphe optique Chappe (chapitre un) et le télégraphe électrique (chapitre deux).]

[Fig-90] FIGUIER, **Les merveilles de la science**, Supplément, tome I, 1890, 740 p. Téléchargeable sur :

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k24678x>

[La première introduction historique à consulter pour le télégraphe Baudot (chapitre « Supplément au télégraphe électrique »).]

[Mor-38] MORSE, Samuel, déposé le 7 avril 1838, US Patent 1 647, breveté le 20 juin 1840, 9 p. Version électronique téléchargeable sur *GoogleBooks*.