Chapitre 4

Réalisation des circuits combinatoires

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment SHANNON a modélisé en 1937 la conception de la réalisation des opérations arithmétiques par des *circuits combinatoires*. Il s'agit d'un modèle (mathématique) qu'il faut implémenter pour obtenir la réalisation en pratique.

Plusieurs technologies ont été utilisées pour la réalisation des circuits combinatoires :

- Ils furent tout d'abord réalisés de façon électromécanique en utilisant des relais téléphoniques, avant même les réflexions de SHANNON puisque ces dernières furent une commande de Vannevar BUSH pour améliorer son analyseur différentiel réalisé en partie avec des relais.
- Une multiplication est effectuée plus vite que par un opérateur humain, et avec une probabilité de se tromper beaucoup moindre, mais ceci est encore insuffisant pour le calcul des tables de tir à la fin de la seconde Guerre Mondiale. Les relais sont alors remplacés par des tubes électroniques utilisés en radio, plus exactement par des triodes. On arrive ainsi aux calculateurs rapides dont la première réalisation convaincante est l'ENIAC, opérationnel en novembre 1945.
- L'ENIAC comporte 18 000 triodes alors que les réalisations les plus complexes de l'époque ne comprenaient pas plus d'une centaine de tubes électroniques. Ces lampes grillent régulièrement et la consommation électrique est énorme. L'apparition du transistor en 1948 va permettre de résoudre ces deux problèmes tout en miniaturisant les calculateurs.
- Le nombre d'éléments augmente de plus en plus. L'apparition des circuits intégrés en 1959 permet de miniaturiser encore plus les ordinateurs.

4.1 Les circuits électromécaniques

4.1.1 Principe de réalisation des circuits

Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'il suffit de savoir réaliser quelques fonctions logiques de base pour les réaliser toutes. On appelle **porte** (*gate* en anglais) un tel élément de base (par un jeu de mot rappelant qu'il n'y a que deux valeurs : une porte est ouverte ou fermée). On relie ces différentes portes entre elles pour obtenir des **circuits de commutation** (autre nom donné aux circuits combinatoires, car ils étaient utilisés à l'origine pour les commutateurs automatiques des centrales téléphoniques).

4.1.2 Les relais

Nous avons déjà décrit ce qu'un un relais électromécaniques dans le chapitre précédent. Reprenons ici ce que nous avions dit alors dans un but de complétion.

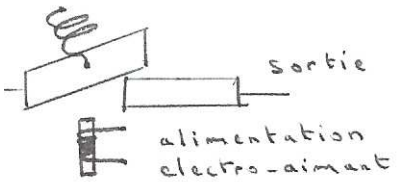

FIGURE 4.1 – Principe d'un relais

Un **relais** (*relay* en anglais) est un interrupteur commandé électriquement comme montré à la figure 4.1 : il est formé de deux languettes d'acier (donc conductrices de l'électricité et attirables par un électro-aimant), l'une fixe et l'autre mobile, pouvant se toucher ; la languette mobile est tenue en position disons haute, ne touchant pas la languette fixe, grâce à un ressort de rappel ; un petit électro-aimant peut, lorsqu'il est alimenté, la mettre en position basse, ce qui permet le passage du courant.

FIGURE 4.2 – Représentation schématique d'un relais

Un relais peut être représenté schématiquement comme sur la figure 4.2, la vrille correspondant à l'électro-aimant.

On peut distinguer deux types de relais : ceux dont la position naturelle est d'être ouvert (le ressort de rappel évite le contact entre les deux languettes ; c'est le type que nous avons représenté ci-dessus) et ceux dont la position naturelle est d'être fermée (le ressort de rappel force le contact entre les deux languettes).

4.1.3 Réalisation des portes logiques

4.1.3.1 Réalisation d'un inverseur

On voit à la figure 4.3 comment on peut réaliser un circuit NON : ici on considère que la position naturelle du relais est d'être fermé et non ouvert ; un courant en entrée ouvrira l'interrupteur ; puisque cela arrête le courant, le résultat sera un courant qui ne passe pas ; ainsi, à tout moment entrée et sortie ont des valeurs opposées, comme il était requis.

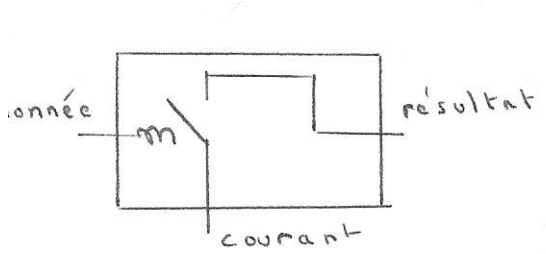

FIGURE 4.3 – Inverseur à relais

4.1.3.2 Réalisation d'une porte OU

On voit à la figure 4.4 comment on peut réaliser une porte OU : le courant essaie de passer par l'un des deux relais, qui sont montés en parallèle et dont la position naturelle est d'être ouverts ; ce n'est que lorsque le courant ne passe dans aucun des deux points d'entrée que le courant ne passe pas en sortie.

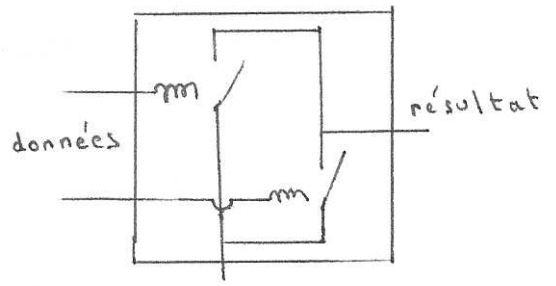

FIGURE 4.4 – Porte OU à relais

4.1.3.3 Réalisation d'une porte ET

On voit à la figure 4.5 comment on peut réaliser une porte ET : les deux relais, dont la position naturelle est d'être ouverts, sont montés en série ; il est clair que les deux relais doivent être fermés pour que le courant passe, donc que le courant passe dans les deux points d'entrée simultanément.

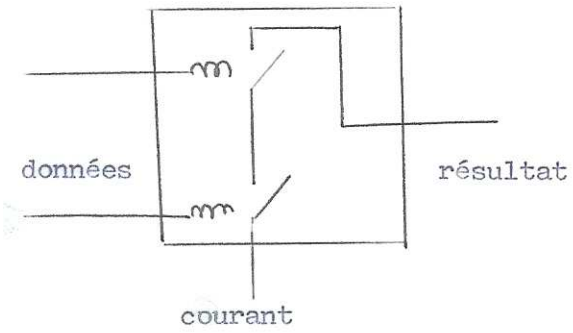

FIGURE 4.5 – Porte ET à relais

4.2 Les circuits à lampes radio

4.2.1 Diode et triode

4.2.1.1 Émission thermoélectronique

Lorsque la température d'un corps s'élève, les électrons des atomes captent une partie de l'énergie thermique et changent de niveau dans l'atome. Ceux qui sont situés sur les couches externes peuvent éventuellement quitter l'influence du noyau qui les retenaient et s'échapper complètement.

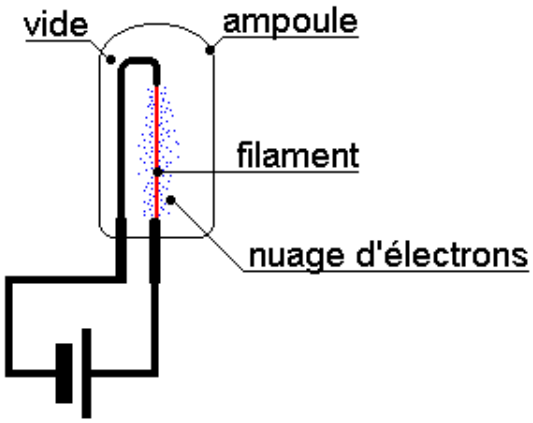

FIGURE 4.6 – L'émission thermoélectronique

Un filament métallique, placé dans une ampoule vide d'air et parcouru par un courant électrique d'intensité suffisante, peut atteindre une température telle que les électrons des atomes appartenant à sa surface peuvent s'échapper et former un nuage autour de lui. Bien sûr, ils ne vont pas bien loin car les charges positives des noyaux qu'ils ont quitté les attirent et ils finissent par rejoindre le filament.

4.2.1.2 La diode

La lampe électronique la plus simple est la **diode**, dont le principe est représenté à la figure 4.7. Une telle lampe comporte trois broches sortant d'une ampoule en verre à l'intérieur de laquelle un vide très poussé a été fait (pression de l'ordre de 10^{-6} mm de mercure), reliées à deux éléments métalliques :

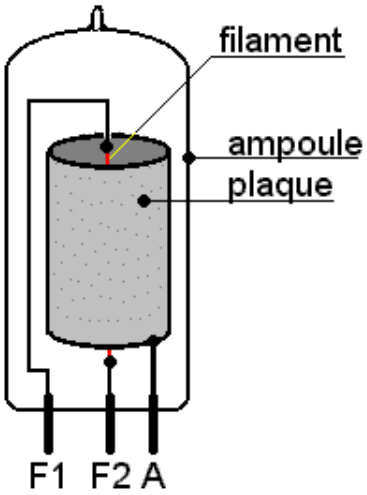

FIGURE 4.7 – Principe de la diode

- L'**anode** ou **plaque** est un cylindre de tôle mince, reliée à la broche A.
- La **cathode**, reliée aux broches F1 et F2, est constituée d'un filament chauffé à blanc. Elle est chargée d'émettre des électrons.

Le nuage d'électrons qui se forme autour de la cathode constitue une charge négative (la *charge d'espace*) qui repousse les électrons qui voudraient s'échapper de la cathode.

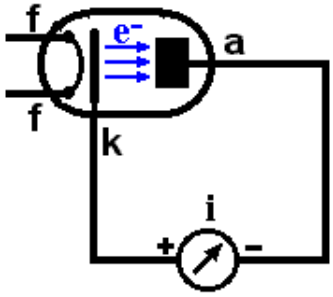

FIGURE 4.8 – Très faible passage de courant

Comme le schématise la figure 4.8, une vingtaine de secondes après que le filament a été mis sous tension, la cathode est chaude et commence à émettre des électrons dont certains traversent

l'espace cathode-anode. On peut mettre en évidence le phénomène en branchant un microampèremètre entre la cathode et l'anode. Un courant de quelques centaines de microampères peut être mesuré.

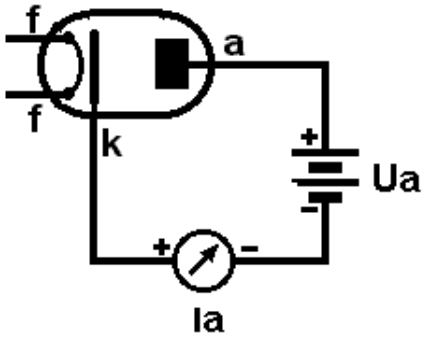

FIGURE 4.9 – Passage de courant

Ce très faible courant augmente de façon importante pour atteindre plusieurs dizaines ou centaines de milliampères lorsque l'on applique sur l'anode un potentiel positif suffisant à l'aide d'une source de courant continu, comme le montre le schéma 4.9. L'effet se fait sentir à partir de quelques volts.

Si l'on inverse la polarité du générateur de courant continu `Ua`, l'anode devenue négative par rapport à la cathode repousse tous les électrons et plus aucun courant ne passe.

Une diode est symbolisée de la façon indiquée à la figure 4.10 (2/1).

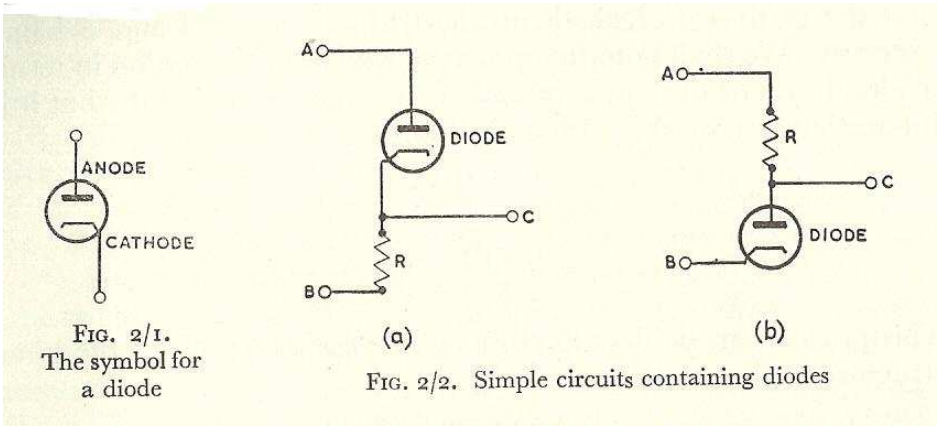

FIGURE 4.10 – Une diode ([Bow-53], p. 40)

4.2.1.3 La triode

Entre la cathode et l'anode de la diode à vide s'établit un courant d'électrons dont l'intensité dépend (entre autres) de la température de la cathode et de la différence de potentiel entre l'anode et la cathode. Dans le cas de la **triode**, une **grille** est placée entre la cathode et l'anode, donc sur le trajet des électrons, comme le montre le schéma 4.11.

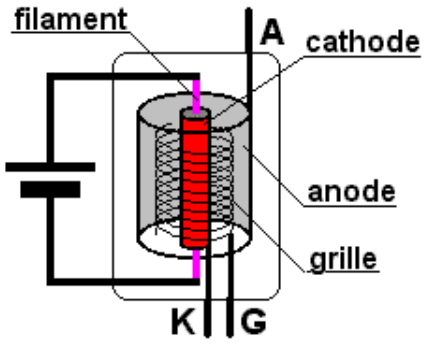

FIGURE 4.11 – Principe de la triode

Lorsque la grille est à un potentiel négatif par rapport à la cathode, elle établit une barrière qui réduit d'autant plus le flux d'électrons qu'elle est négative. La puissance nécessaire pour modifier la tension de la grille est très faible par rapport à la variation de tension anode provoquée par la variation de la tension grille, d'où les facultés amplificatrices de la triode.

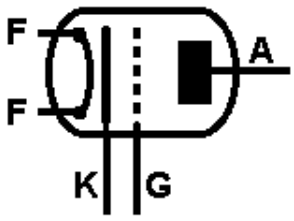

FIGURE 4.12 – Symbole de la triode

Une triode est représentée comme indiqué à la figure 4.12, où `FF` représente les deux broches du filament, `K` la broche de la cathode, `G` la broche de la grille et `A` la broche de l'anode.

4.2.2 Réalisation des portes logiques à l'aide des lampes électroniques

4.2.2.1 Train d'impulsions

La figure 4.13 montre la façon dont on utilise la logique négative : les circuits sont maintenus à un niveau haut (H comme *Hight*), qui représente 0, et on envoie des impulsions négatives, c'est-à-dire un niveau bas (L comme *Low*), qui représente 1.

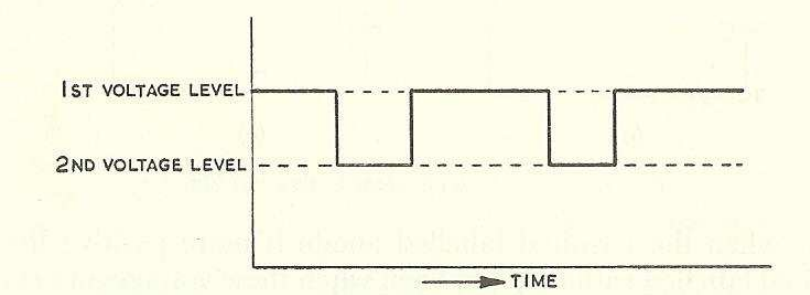

FIG. 2/6. A series of negative-going pulses

FIGURE 4.13 – Train d'impulsions négatives ([Bow-53], p. 42)

4.2.2.2 Réalisation d'une porte ET

La figure 4.14 montre comment réaliser une porte ET à l'aide de deux diodes (et d'une résistance) en logique négative : si 1 ou 2 ont un niveau haut (représentant 0) alors 3 a également un niveau haut (représentant 0) ; par contre si 1 et 2 ont un niveau bas, alors aucun courant ne passe et 3 a une tension basse (représentant 1).

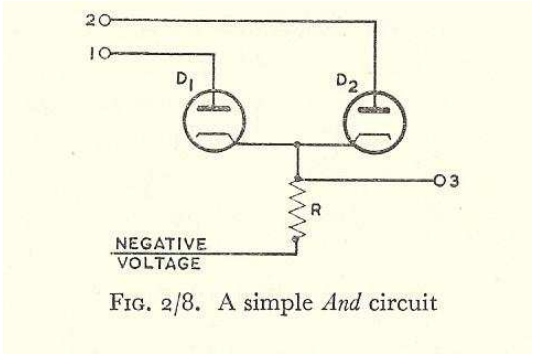

FIG. 2/8. A simple *And* circuit

FIGURE 4.14 – Réalisation d'une porte ET avec deux diodes ([Bow-53], p. 43)

4.2.2.3 Réalisation d'une porte OU

La figure 4.15 montre comment réaliser une porte OU à l'aide de deux diodes (et d'une résistance) en logique négative : si 1 ou 2 ont une tension basse (représentant 1) alors 3 a également

une tension basse (représentant 1) ; par contre si 1 et 2 ont une tension haute, aucun courant ne passe et 3 a une tension haute (représentant 0).

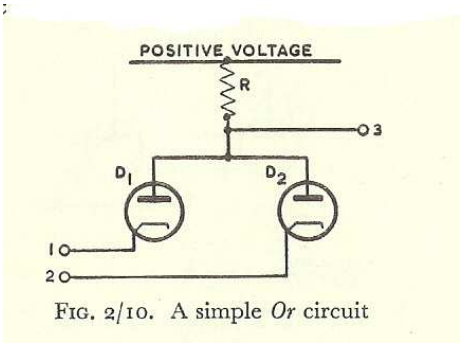

FIG. 2/10. A simple *Or* circuit

FIGURE 4.15 – Réalisation d'une porte OU avec deux diodes ([Bow-53], p. 44)

4.2.2.4 Réalisation d'un inverseur

La figure 4.16 (a) montre comment réaliser un inverseur à l'aide de deux triodes (et d'une résistance) en logique négative :

- Si 1 a une tension basse (représentant 1) alors le courant ne peut pas passer à travers V_1. Il ne passe donc pas non plus à travers V_2. Ainsi 2 a une tension haute, représentant 0.
- Si 1 a une tension haute (représentant 0) alors le courant peut passer à travers V_1. L'impulsion standard à un niveau haut passe donc à travers V_1 et donc le courant passe à travers V_2. Ainsi 2 a une tension haute, représentant 0.

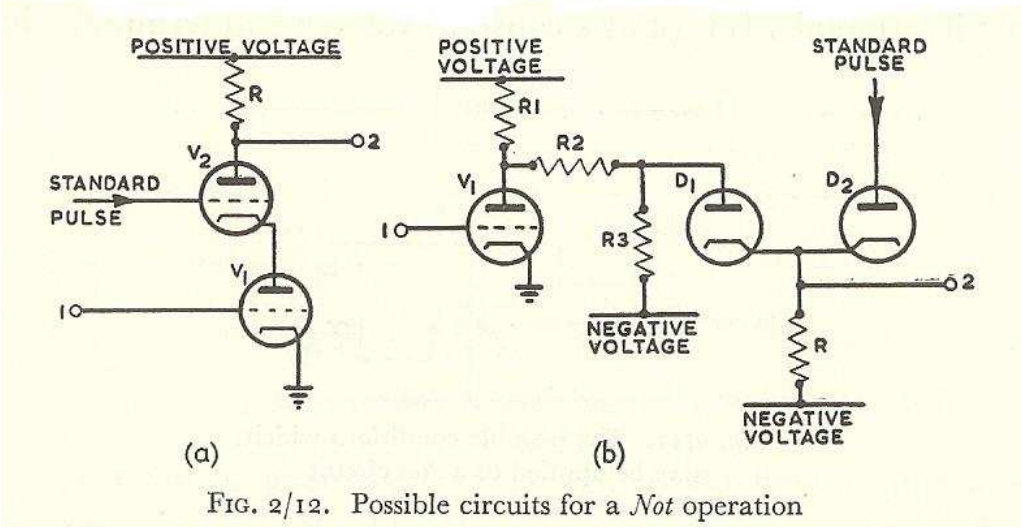

FIG. 2/12. Possible circuits for a *Not* operation

FIGURE 4.16 – Réalisation d'un inverseur avec une deux triodes ([Bow-53], p. 46)

4.3 Les circuits à éléments semi-conducteurs discrets

4.3.1 Les circuits à transistors

4.3.1.1 Comportement d'un transistor

Un **transistor** possède trois bornes, appelées **émetteur**, **base** et **collecteur** pour un transistor bipolaire et **source**, **barrière** (*gate* en anglais) et **drain** pour un transistor à effet de champ (**FET** pour l'anglais *Field Effect Transistor*). La figure 4.17(a) montre un transistor (à effet de champ) dans un circuit élémentaire comprenant une source de courant de tension V_{cc}, une résistance R_c et le transistor relié par ses bornes drain et source. La résistance, appelée **charge** (*load* en anglais), sert d'une part à éviter un court-circuit, car nous verrons que le transistor se comporte comme une résistance nulle dans certains cas, et d'autre part à faire varier la tension V_{ds}. Il faut considérer qu'il y a une seconde source de courant entre la barrière et la source de tension V_{bs}.

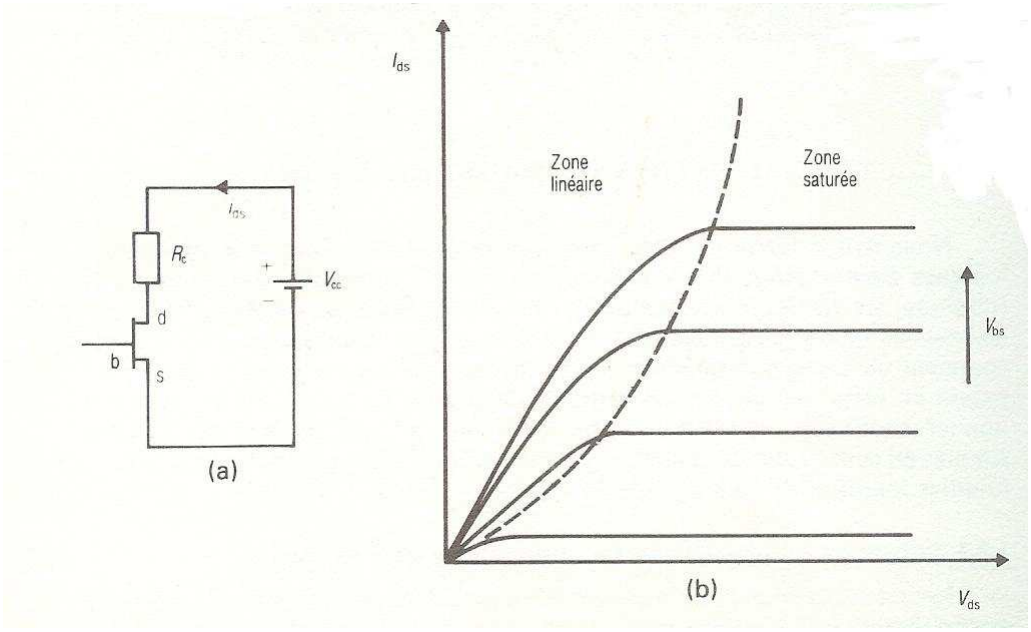

FIGURE 4.17 – Courbes caractéristiques d'un transistor

Déterminons le comportement du transistor, plus exactement de l'intensité I_{ds} (que l'on peut mesurer à l'aide d'un ampèremètre) entre le drain et la source en fonction des tensions V_{cc} et V_{bs}. La figure 4.17(b) montre l'allure de la courbe $I_{ds} = f(V_{ds})$ pour quatre valeurs de V_{bs} :

- Pour $V_{bs} = 0$ on a $I_{ds} = 0$, autrement dit le transistor se comporte comme une résistance nulle. On dit qu'il est « éteint » (*off* en anglais).
- Appliquons des tensions V_{bs} positives. Il existe une **tension de seuil** V_s au-delà de laquelle un courant passe entre la source et le drain. On dit que le transistor **s'allume** (*is on* en anglais).
- Il existe une **tension de saturation** V_{sat} telle qu'on a une zone presque linéaire pour V_{ds} compris entre V_s et V_{sat}. Cette zone permet d'utiliser le transistor comme amplificateur, ce qui ne nous intéresse pas pour les circuits de commutation.

– Lorsque V_{ds} dépasse la tension de saturation V_{sat}, l'intensité reste à une valeur constante. On dit que le transistor est **saturé**.

4.3.1.2 Utilisation d'un transistor comme inverseur

La figure 4.18 montre l'utilisation d'un transistor dans un circuit pour réaliser un inverseur (une porte NON) : les tensions ont pour référence la borne source du transistor ; la tension d'entrée V_{in} est appliquée à la barrière ; la tension de sortie V_{out} est prise sur le drain. Dans ces conditions :

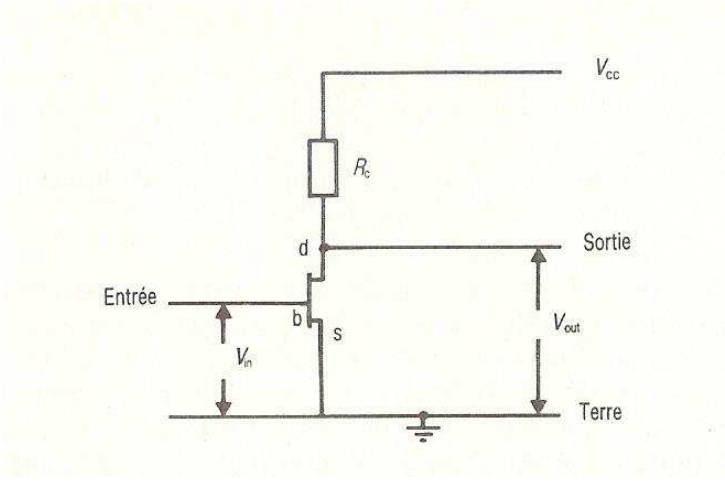

FIGURE 4.18 – Utilisation d'un transistor comme inverseur

– Si $V_{in} = 0$ alors le transistor est éteint donc $V_{ds} = 0$ et $V_{out} = V_{cc}$, considéré comme 1.
– Si $V_{in} = V_{cc}$ (avec $V_{cc} > V_s$) alors le transistor est allumé donc $i_{ds} > 0$ et $V_{out} < V_{cc}$, valeur que l'on pourra considérer comme nulle ou tout au moins comme niveau bas.

À un niveau bas correspond un niveau haut et à un niveau haut correspond un niveau bas, on a donc bien un inverseur.

4.3.1.3 Utilisation de deux transistors pour réaliser une porte NAND

La figure 4.19 nous montre comment réaliser une porte NAND dont les entrées sont A et B et la sortie Z. L'alimentation et les câblages ont été supprimés pour plus de clarté :

– Si A = B = 0 alors les deux transistors sont éteints, ce qui fait qu'aucun courant ne parcourt la chaîne qui comprend la charge et les deux transistors. Dans ces conditions la sortie Z est à la tension d'alimentation V_{cc}, c'est-à-dire Z = 1.
– Un raisonnement analogue s'applique pour A = 0, B = 1 et A = 1, B = 0.
– C'est seulement dans le cas où A = B = 1 que les deux transistors sont allumés et qu'un courant peut passer. Dans ce cas Z est très faible, considéré comme 0.

La fonction Z = f(A, B) représente donc bien une porte NAND.

4.3.1.4 Utilisation de deux transistors pour réaliser une porte NOR

La figure 4.20 nous montre comment réaliser une porte NOR dont les entrées sont A et B et la sortie Z. L'alimentation et les câblages ont été supprimés pour plus de clarté :

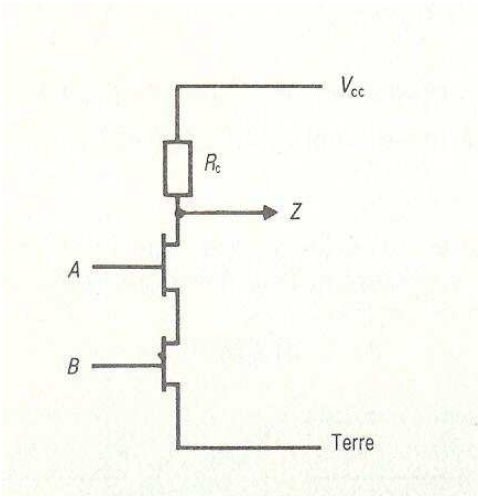

FIGURE 4.19 – Utilisation de deux transistors comme porte NAND

– Si A = B = 0 alors les deux transistors sont éteints, ce qui fait qu'aucun courant ne parcourt la chaîne qui comprend la charge et les deux transistors. Dans ces conditions la sortie Z est à la tension d'alimentation V_{cc}, c'est-à-dire Z = 1.

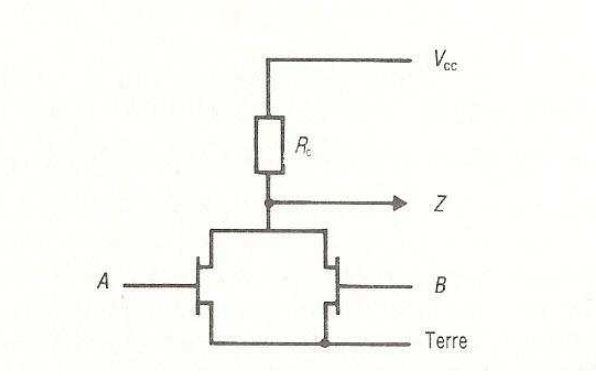

FIGURE 4.20 – Utilisation de deux transistors comme porte NOR

– Par contre si A = 1 ou B = 1 alors l'un des deux transistors au moins est allumé et un courant peut passer. Dans ce cas Z est très faible, considéré comme 0.

La fonction Z = f(A, B) représente donc bien une porte NOR.

4.3.1.5 Famille logique TRL

Les premiers circuits combinatoires à transistors semi-conducteurs utilisaient des **composants discrets**, c'est-à-dire qu'un transistor se présentait sous la forme de la figure 4.21. Les premiers transistors étaient rares ; on en utilisait donc un minimum pour un maximum de résistances, relativement bon marché quant à elles. C'était des circuits **TRL** (*Transistor Resistor Logic*).

FIGURE 4.21 – Présentation des transistors à l'utilisateur

4.3.2 Les circuits à transistors et diodes semi-conductrices

4.3.2.1 Les diodes semi-conductrices

Comme pour les lampes électroniques appelées diodes, une **diode semi-conductrice** est un composant électronique à base de semi-conducteurs qui ne laisse passer le courant que dans une seule direction, dont le symbole est montré à la figure 4.22(a).

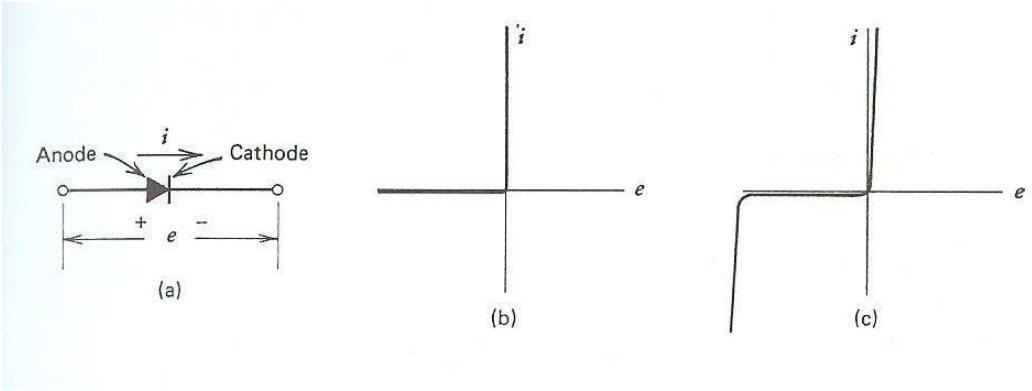

FIGURE 4.22 – Symbole et caractéristiques d'une diode semi-conductrice

Une diode idéale offre une résistance nulle pour un courant de l'anode à la cathode et une résistance infinie de la cathode à l'anode, c'est-à-dire qu'on a le comportement de la figure 4.22(b). Dans la réalité on a un comportement proche de celui représenté à la figure 4.22(c).

4.3.2.2 Réalisation des portes ET et OU avec des diodes

Comme pour les lampes diodes, les diodes semi-conductrices permettent de réaliser des portes ET et OU comme montré à la figure 4.23, où une tension de 1 à 10 V représente le niveau 1 et une tension proche de 0 V le niveau 0 (logique positive) : e_0, e_1 et e_2 sont les tensions aux bornes

Z, A et B respectivement.

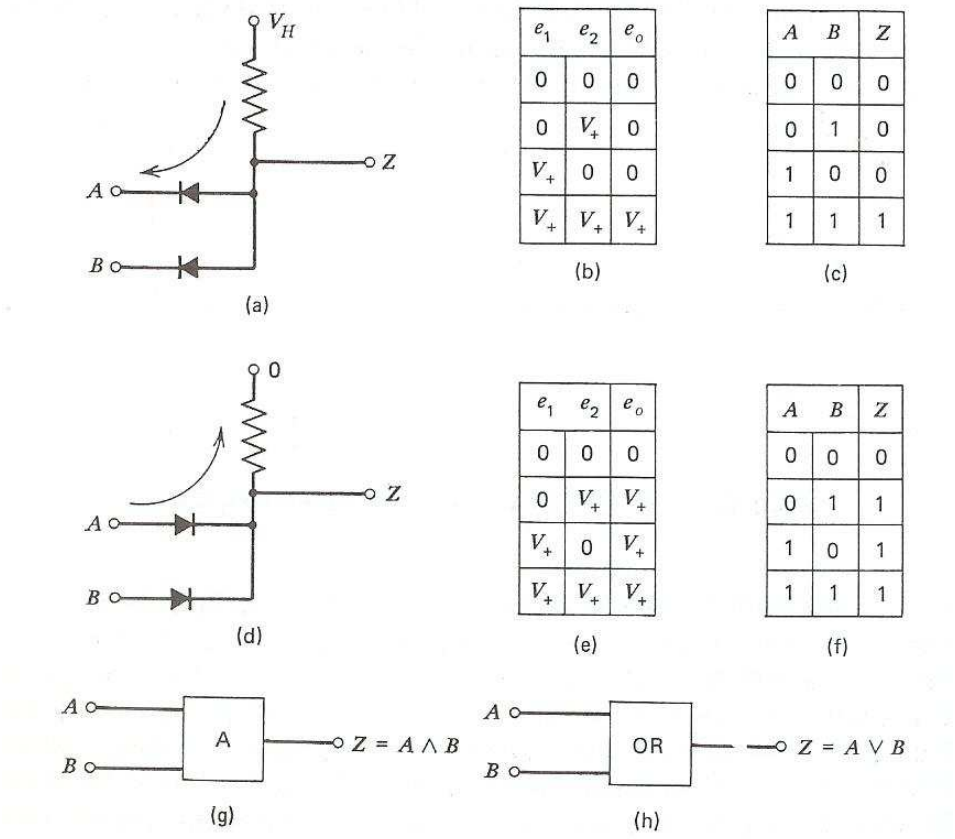

FIGURE 4.23 – Réalisation des portes ET et OU avec des diodes semi-conductrices

4.3.2.3 Famille DTL

L'inverseur ne peut pas être réalisé avec des diodes mais si on utilise les diodes pour les portes ET et OU et les transistors pour les inverseurs, on obtient un circuit dit **DTL** (*Diode Transistor Logic*).

4.4 Utilisation des circuits intégrés

4.4.1 Notion de circuit intégré

4.4.1.1 Notion de circuit intégré

Les transistors et les diodes semi-conductrices sont constitués de matériaux semi-conducteurs dont l'élément essentiel est une plaque semi-conductrice. Pourquoi ne pas placer plusieurs transistors et diodes sur une telle plaque ? Telle est l'idée à la base des **circuits intégrés** (**CI** ou **IC** pour l'anglais *Integrated Circuit*). Il est alors possible de réaliser une fonction logique, plus ou moins compliquée, sur une même **puce** (*chip* en anglais) comme on les appelle, en référence à la couleur et à la taille de ces circuits intégrés.

FIGURE 4.24 – Aspect d'une puce électronique

4.4.1.2 Présentation matérielle des circuits intégrés

Un circuit intégré proprement dit se présente sous la forme d'une puce comme le montre la figure 4.24.

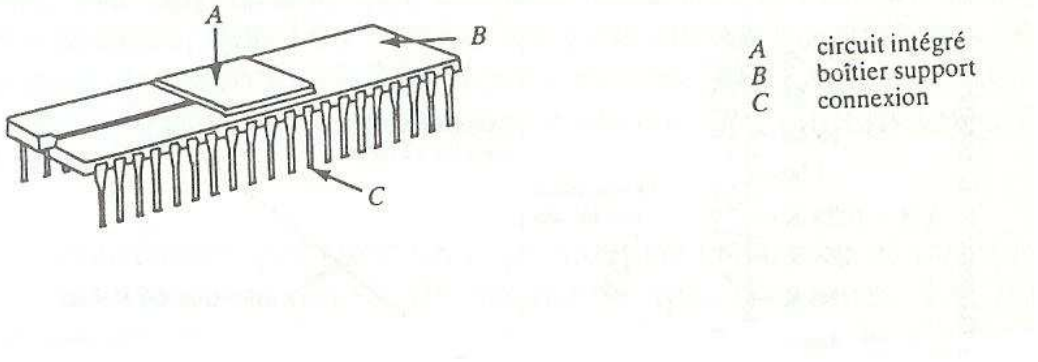

FIGURE 4.25 – Boîtier de circuit intégré avec des broches DIL

L'utilisation d'un si petit composant avec de si nombreux points à relier (les éléments discrets

doivent être reliés au circuit par deux soudures dans le cas des résistances ou trois dans le cas des transistors alors que les circuits intégrés ont beaucoup plus de points d'entrée et de sortie) a conduit à empaqueter la puce dans un boîtier d'où sortent, pour les premiers circuits intégrés, 14 broches (1964), puis 24 broches (1968), 28 (1971), 40 (1974), 64 (1980) et beaucoup plus, le plus souvent disposées suivant deux rangées parallèles (**DIL** pour *Dual In Line*), comme le montre la figure 4.25.

La fonction du circuit intégré est indiquée par un schéma du type de celui de la figure 4.26.

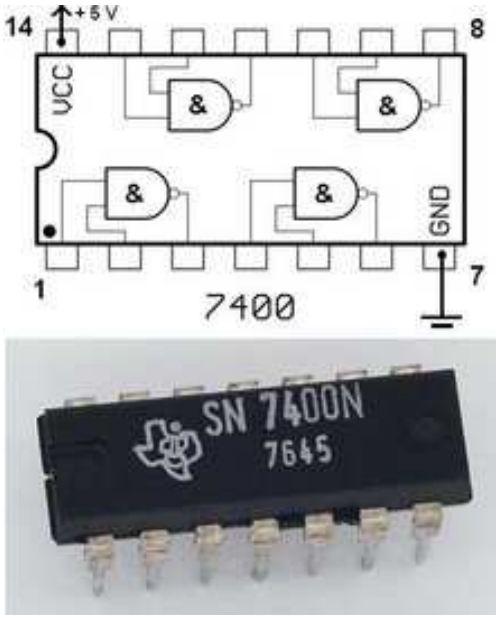

FIGURE 4.26 – Schéma fonctionnel du circuit intégré SN7400 ([TI-73], p. 62)

4.4.1.3 Les familles logiques

Les circuits intégrés ayant en commun certaines caractéristiques appartiennent à la même **famille logique** (*logic family* en anglais). D'un point de vue pratique, on peut connecter entre eux des circuits d'une même famille.

Nous avons vu que l'utilisation d'éléments discrets a conduit aux circuits TRL et DTL. Les premiers circuits intégrés ont été réalisés à l'aide des résistances et de transistors. Pour les distinguer des circuits TRL à éléments discrets, on les a appelés circuits **RTL** (*Resistor Transistor Logic*). Mais la réalisation de résistances sur des circuits intégrés est plus difficile que celle des transistors ; on a donc été conduit à les remplacer par des transistors et à minimiser le nombre de résistances. C'est ainsi que sont apparus les circuits intégrés **TTL** (*Transistor Transistor Logic*).

Il est quelquefois nécessaire de connecter des éléments logiques n'appartenant pas à la même famille logique. Il faut alors prévoir une **interface** entre les éléments, qui traduit les signaux de sortie d'une famille en signaux d'entrée nécessaires pour l'autre famille. Certaines familles peuvent être connectées sans interface, on parle alors de **familles compatibles**.

4.4.1.4 Caractéristiques

Considérons les caractéristiques d'une porte idéale :

- Dans tous les systèmes à logique positive, le niveau 0 est représenté par 0 V et le niveau 1 par une tension positive de l'ordre de 5 V.
  Si on visualise la sortie d'une porte sur un oscilloscope, on se rend compte que la différence de potentiel n'est pas constante mais résulte de la superposition d'une composante continue (disons 5 V) et de fluctuations aléatoires (appelées **bruit**, *noise* en anglais) de plusieurs centaines de millivolts.
  Les niveaux logiques doivent donc correspondre, non pas à deux tensions déterminées, mais à des plages de tensions, aussi larges que possible et qui ne doivent évidemment pas se recouvrir. Il doit y avoir une **marge de sécurité** ou **marge de bruit** (*noise margin* en anglais) autour de la tension choisie.
- Chaque porte doit dissiper le moins d'énergie possible, voire pas du tout dans le cas idéal. En effet l'énergie dissipée chauffe les circuits, ce qui nécessite d'adjoindre aux circuits des ventilateurs ou, dans des cas extrêmes, des refroidissements par eau. De plus la fiabilité baisse lorsque la température s'élève. En outre si un système a besoin de courants importants, il a besoin d'alimentations coûteuses et encombrantes.

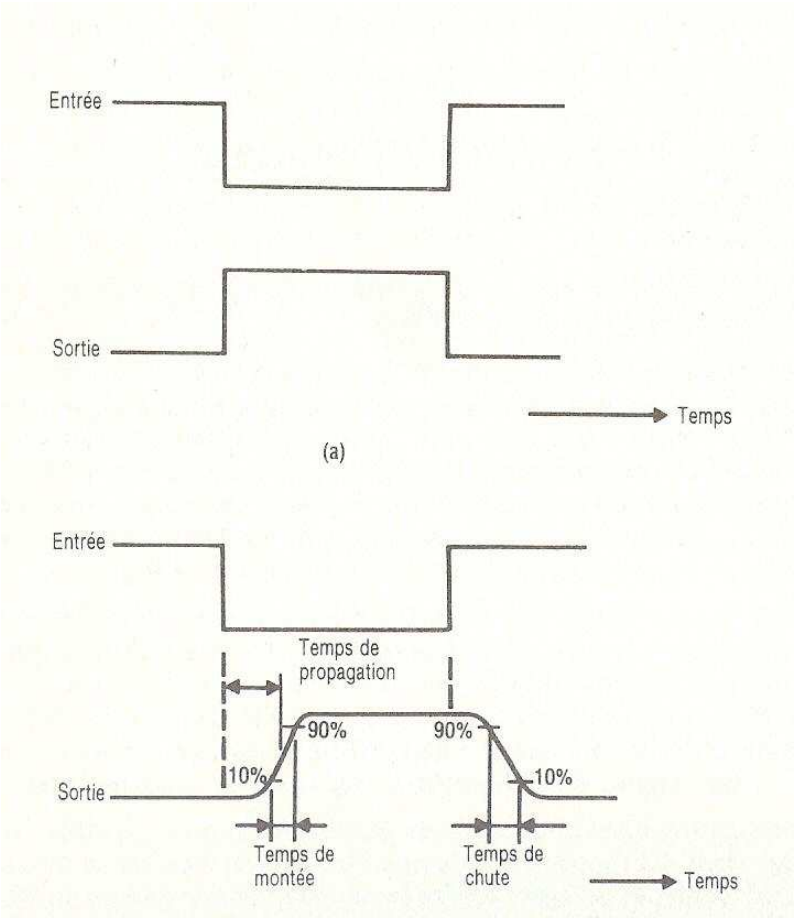

FIGURE 4.27 – Durée de propagation à travers une porte

- La propagation à travers une porte doit être la plus rapide possible, instantanée dans le cas idéal. La figure 4.27a montre les signaux d'entrée et de sortie d'une porte NON idéale et la figure 4.27b ceux observés sur une porte NON réelle. Sur la première figure il n'y a aucun retard entre la variation de tension d'entrée et celle de sortie : les changements sont instantanés. Dans les portes réelles, ils ne le sont pas.
  On appelle **temps de commutation** la durée du passage du niveau haut au niveau bas.
- On aimerait bien que la sortie d'une porte puisse être l'entrée d'un grand nombre de portes en parallèle, idéalement une infinité. Ceci n'est évidemment pas le cas. On appelle **sortance** (*fan-out* en anglais) le nombre d'entrées que l'on peut relier à une sortie.

Les caractéristiques d'une famille logique concernent d'abord les tensions :

- V_{IHmin} (pour *Input High MINimum*) est la tension d'entrée minimale que l'élément logique doit recevoir pour qu'elle soit interprétée comme un niveau logique haut.
- V_{ILmax} (pour *Input Low MAXimum*) est la tension d'entrée maximale que l'élément logique doit recevoir pour qu'elle soit interprétée comme un niveau logique bas.
- V_{OHmin} (pour *Output High MINimum*) est la tension de sortie minimale que l'élément logique doit renvoyer pour qu'elle soit interprétée comme un niveau logique haut.
- V_{OLmax} (pour *Output Low MAXimum*) est la tension de sortie maximale que l'élément logique doit renvoyer pour qu'elle soit interprétée comme un niveau logique bas.

Ces tensions permettent de calculer les marges de bruit :

$$margin_{low} = V_{ILmax} - V_{OLmax}$$

$$margin_{high} = V_{OHmin} - V_{IHmin}$$

pour une sortance de 1.

Les caractéristiques d'une famille logique concernent également les intensités :

- I_{IHmax} (pour *Input High MAXimum*) est l'intensité d'entrée maximale que l'élément logique peut recevoir lorsqu'un niveau logique haut est appliqué.
- I_{ILmax} (pour *Input Low MAXimum*) est l'intensité d'entrée maximale que l'élément logique peut recevoir lorsqu'un niveau logique bas est appliqué.
- I_{OH} (pour *Output High*) est l'intensité de sortie que l'élément logique renvoie pour un niveau logique haut.
- I_{OL} (pour *Output Low*) est l'intensité de sortie que l'élément logique renvoie pour un niveau logique bas.
- I_{OS} (pour *Output Shorted*) est l'intensité de sortie pour un niveau logique haut que l'élément logique renvoie lorsqu'une entrée et une sortie sont reliées.

Les intensités d'entrée sont positives et les intensités de sortie négatives.

Ces intensités permettent de calculer la sortance lorsque celle-ci n'est pas explicitement donnée. Traditionnellement, on définit la sortance comme :

$$sortance = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

où I_{out} est le courant que peut fournir ou absorber la porte, I_{in} le courant absorbé ou fourni par une entrée.

Par exemple pour un circuit TTL on a :

$$I_{IH} = 40\mu A, \;\; I_{IL} = 1.6\mu A$$

$$I_{0H} = -400\mu A, \;\; I_{OL} = -16\mu A$$

d'où une sortance de 10.

Sigle	Nom	Nombre	Année	Circuit typique
	éléments discrets	1	1948	transistor
SSI	Small Scale Integration	< 100	1964	porte logique
MSI	Medium Scale Integration	100 à 1 000	1968	registre
LSI	Large Scale Integration	1 000 à 100 000	1971	mémoire
VLSI	Very LSI	100 000 à 1 000 000	1975	microprocesseur
ULSI	Ultra LSI	$> 1\ 000\ 000$	1982	

4.4.2 Utilisation des circuits intégrés pour les circuits combinatoires

4.5 Historique

Nous avons illustré le principe de réalisation des circuits combinatoires dans le chapitre précédent par la technologie des relais. Ce n'est évidemment pas la seule technologie possible et, bien sûr, pas celle qui est utilisée de nos jours. Passons en revue les technologies utilisées.

Aucune des technologies n'a été conçue pour la réalisation des circuits combinatoires, ni même des calculateurs. Pour chaque technologie, nous rappellerons son origine puis l'application aux calculateurs, plus particulièrement ici à la réalisation des circuits combinatoires.

4.5.1 Les circuits mécaniques

Les seuls calculateurs mécaniques sont ceux de Charles Babbage (conçu mais pas réalisé) vers 1830 et de Konrad Zuse dans les années 1930. Bien que Zuse ait affirmé en 1980 (dans le texte cité au chapitre précédent) qu'il appliquait la théorie des circuits combinatoires à la réalisation de ses calculateurs, il ne nous reste pas de document pour expliquer comment il faisait et la reconstitution à partir des matériaux restants n'est pas une tâche suffisamment exaltante pour qu'elle soit réalisée. Nous ne dirons donc rien sur cette technologie.

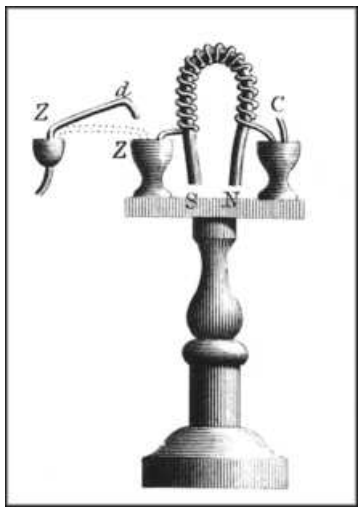

Figure 4.28 – Le premier électro-aimant, inventé par Sturgeon in 1824. Dessin de l'article de 1824 dans *British Royal Society of Arts, Manufactures, and Commerce*. Il y a 18 tours de fil de cuivre (non isolé).

4.5.2 Les circuits électromécaniques

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, George Stibitz a par contre utilisé les relais utilisés pour l'industrie téléphonique pour réaliser un demi-additionneur en 1937. Cette technologie a été utilisée pendant une longue période pour la réalisation de calculateurs.

4.5.2.1 Origine des relais

Nous pouvons considérer, pour ce qui nous intéresse, la technologie des relais electromécaniques comme une technologie bien au point dans les années 1920 lorsqu'elle est utilisée pour

réaliser des calculateurs. Pour les plus curieux, il est intéressant d'en connaître l'origine.

Vers 1830 nombre d'inventeurs et de savants cherchent à appliquer l'électricité aux procédés de transmission à distance dont les frères Chappe avaient été pionniers avec le télégraphe optique.

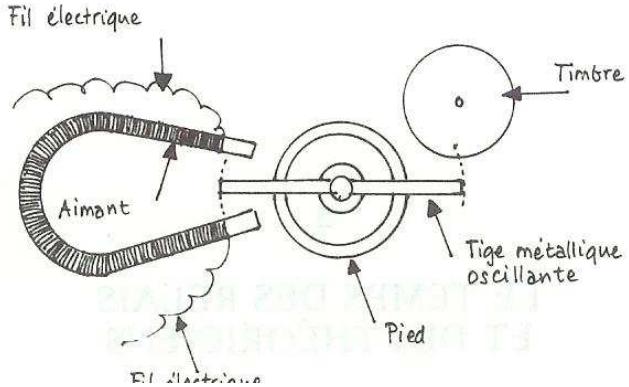

Figure 4.29 – Le premier relais électrique ([Lig-87], p. 184)

Le premier relais électrique est construit par l'inventeur américain Joseph Henry (1797–1878). Il commence par améliorer la technologie des élecro-aimants, inventés par l'anglais William Sturgeon (1783-1850) en 1824 (voir figure 4.28), en isolant les fils (de fer) du bobinage, ce qui lui permet d'obtenir en 1829 des électro-aimants d'une grande puissance de levage. Premier relais

Il décide en 1831 d'utiliser les électro-aimants pour des applications plus fines que le levage des poids. Entre les extrémités d'un fer à cheval en acier complètement bobiné de fil électrique isolé (figure 4.29), il place une petite tige métallique mobile, montée sur un support vertical ; le bout de cette tige est attirée par l'électro-aimant lorsque le courant électrique passe, puis revient en position intermédiaire dès que le courant est coupé. Lors du déplacement de cette tige, son extrémité opposée frappe sur le timbre d'une sonnette. Henry réussit à provoquer des tintements à une distance de 1,5 km.

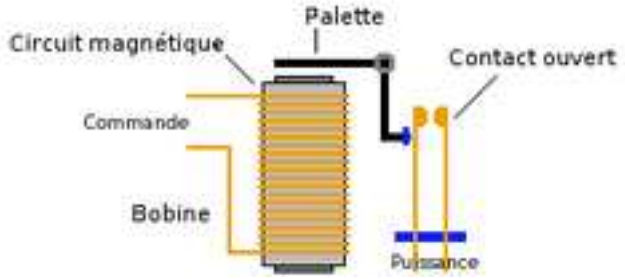

Figure 4.30 – Relais électromagnétique

La télégraphie électrique intéresse le peintre Samuel Morse (1791–1872). Dépourvu de formation scientifique, il s'adresse à L. D. Gale, professeur de sciences dans l'établissement où Morse enseigne la peinture, qui l'oriente vers Joseph Henry en 1837. Ce dernier explique à Morse que, Morse

du fait de la loi d'Ohm, aucune pile, si puissante soit-elle, ne peut envoyer un signal électrique au-delà d'une certaine distance. Une ligne télégraphique électrique doit donc être composée de segments autonomes, alimentés par leur propre pile, et reliés entre eux par des électro-aimants agissant comme des relais électriques. S'appuyant sur ces bases, MORSE réussit à mettre au point un télégraphe et prend un brevet à son nom en 1840 [Mor-40].

En 1843, après bien des déboires et plusieurs périodes de profond découragement, MORSE obtient la permission d'établir une ligne télégraphique de 60 kilomètres, entre Baltimore et Washington.

Un relais (figure 4.30) est composé principalement d'un électroaimant, qui lorsqu'il est alimenté, transmet une force à un système de commutation électrique : les contacts.

4.5.2.2 Utilisation des relais pour les circuits combinatoires

De nombreux projets de calculateurs électro-mécaniques utilisant des relais émergent entre 1920 et 1940, comme le montre le chapitre 4 de [Lig-87] (malheureusement sans bibliographie primaire). Nous n'en retiendrons que celui de Vannevar BUSH (1890–1974) qui va jouer un rôle indirect par la suite.

Vannevar Bush

Né à Everett (Massachussets) le 11 mars 1890, petit-fils d'un capitaine baleinier et fils d'un pasteur de foi « universaliste », Vanneva BUSH est animé toute sa vie par la croyance profonde que le Bien doit triompher du Mal, dans le monde comme dans chaque individu. Plongeur dans un restaurant pour payer ses études scientifiques à Tufts College, il obtient en 1913 un emploi aux laboratoires d'essais de *General Electric*. Il retourne ensuite à son collège pour y enseigner les mathématiques ; il étudie en même temps l'ingénierie mécanique à Harvard et au MIT et obtient son doctorat. À l'entrée en guerre des États-Unis, en 1917, il travaille pour l'*US Navy*, dans un laboratoire spécialisé dans l'étude des armes contre les sous-marins. Démobilisé, il dirige au MIT des recherches sur le transport de l'énergie électrique. Nommé professeur, il devient par la suite président de son institut.

BUSH installe dans le sous-sol de sa maison un atelier où il monte les dispositifs nouveaux qu'il imagine ; parmi ceux-ci, des instruments de calcul analogique. En 1925, avec l'aide de quelques autres universitaires, il construit sa première machine, mécanique mais mue par un moteur électrique, capable de résoudre des équations différentielles. En 1930, avec des fonds du MIT, il met au point un « analyseur différentiel » dont deux répliques sont construites : la première pour la *Moore School of Electrical Engineering* à l'université de Pennsylvanie ; la seconde pour le *Ballistic Research Laboratory* de l'*US Ordnance Dept.*, installé à Aberdeen dans le Maryland.

À partir de 1935, Vanneva BUSH lance le MIT dans la construction d'un grand calculateur hybride, partiellement dirigé par un programme sur ruban de papier perforé. Cette entreprise, associant de nombreux composants mécaniques, électriques (relais) et électroniques (lampes), très complexe et fort coûteuse (125 000 dollars) ne sera achevée qu'en 1942. L'état de guerre fait tenir sa réussite secrète.

En 1939, sa réputation lui vaut d'être nommé président de l'*Institut Carnegie*, à Washington. En 1940 F. D. ROOSEVELT, convaincu qu'une participation des États-Unis à la guerre est inévitable, crée une commission de savants, le « National Defense Research Committee », devenu ensuite l'« Office of Scientific Research and Development » et en confie la direction à Vannevar BUSH. Celui-ci organise magistralement la mobilisation intellectuelle de six mille scientifiques, s'assure l'appui de vingt-quatre mille techniciens et réussit leur bonne association avec les militaires dans deux mille projets divers impliquant un investissement de 125 millions de dollars par an. Le développement des radars tactiques et la réalisation de la bombe atomique sont les plus importants de ces projets.

Après la guerre, Bush fait admettre la nécessité d'un effort sans précédent en faveur de la recherche fondamentale. Un de ses rapports décide le Congrès américain à voter, en 1951, la loi dite « National Science Foundation ».

Entre-temps, Bush est retourné travailler dans le sous-sol de sa maison sur de nouvelles inventions jusqu'à ce qu'il décède le 28 juin 1974, à quatre-vingt-quatre ans, d'une crise cardiaque.

Claude Shannon

C'est son calculateur hybride qui nous intéresse ici. Cependant il en existe peu de détails. Par contre, nous avons vu au chapitre précédent comment Bush remarque Claude Shannon et comment ce dernier écrit l'un des articles théoriques fondamentaux sur l'analogie entre la commutation et l'algèbre de Boole.

George Stibitz

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment le premier additionneur utilisant des relais a été réalisé par George Stibitz, des laboratoires Bell, en 1937.

4.5.3 Les circuits à lampes électroniques

Les relais électromécaniques permettent donc de réaliser des circuits combinatoires. Nous en avons donc une implémentation, ce qui est suffisant d'un point de vue théorique. Cependant, si les calculs réalisés sont plus rapides qu'à la main et avec moins d'erreur, on n'en est pas encore aux calculateurs rapides nécessaires pour certaines applications : nous en verrons la nécessité poignante à propos de l'ENIAC. Pour améliorer la vitesse d'exécution, on pense à utiliser les lampes électroniques couramment utilisées alors dans les postes de radio. Là encore, on utilise une technologie alors bien au point, dont nous donnons l'origine pour les plus curieux.

4.5.3.1 Apparition des lampes électroniques

Émission thermoïonique

Une **émission thermoïonique**, terme introduit par Owen Richardson, est un flux d'électrons provenant d'un métal ou d'un oxyde métallique, qui est provoqué par les vibrations des atomes dues à l'énergie thermique lorsque ceux-ci parviennent à surmonter les forces électrostatiques qui les maintiennent près des noyaux atomiques.

Cet effet est rapporté par un certain nombre d'auteurs dès le XVIII^{e} siècle ([Ric-16], p. 2) et, en particulier, en 1873 par Frederick Guthrie en Grande-Bretagne : alors qu'il effectue un travail sur les objets chargés, il découvre qu'une sphère de fer chauffée au rouge et chargée négativement, perd sa charge ; il découvre aussi que cela ne se produit pas si la sphère possède une charge positive.

L'effet est redécouvert accidentellement en 1880 par Thomas Edison (1847–1931), qui vient d'inventer la lampe à incandescence (1878) alors qu'il essaye d'expliquer la rupture du filament et le noircissement du verre des lampes incandescentes. Edison construit une ampoule avec la surface interne recouverte d'une feuille d'étain. Quand il connecte la feuille au filament au travers d'un galvanomètre, en appliquant une tension négative à la feuille par rapport au filament, rien ne se passe. Mais, quand il augmente la tension de la feuille de manière à atteindre une tension positive par rapport au filament, une petite circulation de courant est détectée par le galvanomètre : ceci s'explique maintenant par le fait que des électrons sont émis par le filament chaud et attirés par la feuille, fermant ainsi le circuit. Cette unidirectionalité du courant est appelée **effet Edison** (ce terme étant parfois utilisé comme référence à l'effet thermoïonique lui-même). Bien qu'Edison ne voit pas d'application pour cet effet, il dépose un brevet en 1883, mais ne l'étudie plus.

Sir Owen Richardson (1879–1959) montre en 1901 que l'effet est dû à l'émission de particules négatives, mais ce n'est que plus tard qu'on saura qu'il s'agit d'électrons (identifiés dans le rayonnement cathodique en 1895 par Jean Perrin (1870-1942)). Owen Richardson continue à travailler sur l'émission thermoïonique et reçoit le prix Nobel [Ric-29] en 1929 au titre de 1928 « *pour son travail sur le phénomène thermoïonique et plus spécialement pour la découverte de la*

loi portant maintenant son nom ». L'équation de Richardson énonce que la densité J (en A/m^2) du courant émis dépend de la température suivant l'équation :

$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}}$$

où T est la température du métal (en Kelvin), W le travail de sortie du métal (en électron-volt), k la constante de Boltzmann et A_G la constante de Richardson.

Diode

En 1904 John Ambrose Fleming (1849–1945) étudie cet effet et met au point une diode (dénommée « valve ») destinée au redressement du courant alternatif et à la détection des ondes à haute fréquence [Fle-05]. Il introduit dans son brevet [Fle-05] la notion de « rectification » du courant (transformation de courant alternatif en courant continu pouvant être mesuré par les appareils usuels).

Richardson, puis Dushman, établissent la loi qui lie le courant de saturation à la température du filament. Irvin Langmuir (1881–1957) étudie la relation (valable seulement pour la partie courbe de la caractéristique) entre i_P et v_P.

Triode

En 1906 Lee de Forest (1873–1961) a l'idée d'ajouter une troisième électrode à la diode pour maîtriser le courant d'électrons circulant entre la cathode et l'anode [For-13]. La triode (« lampe audion ») est née et, avec elle, l'ère de l'électronique.

Tétrode et pentode

Walter Schottky (1886–1976) crée la première tétrode en 1915 en ajoutant encore une grille à la triode. La pentode et les autres lampes multigrilles apparaissent dans les années qui suivent. La forme des lampes évolue de l'ampoule sphérique ou ovale vers celle d'un tube cylindrique, mieux adapté à la fabrication en série.

4.5.3.2 Utilisation des lampes électroniques pour les circuits combinatoires

L'idée d'utiliser les lampes électroniques pour réaliser des circuits combinatoires est due indépendamment à l'allemand Helmut Schreyer et à l'américain John Atanasoff mais c'est avec l'ENIAC qu'elle connaîtra son premier succès.

Schreyer

Konrad Zuse a construit des calculateurs à partir des années 1936, en Allemagne, qu'il appellera plus tard Z1, Z2, Z3 et Z4. Nous le retrouverons plus tard à propos de la première machine contrôlée par ruban perforé mais il ne nous intéresse pas pour lui-même ici. La machine Z1 est mécanique, la machine Z2 utilise des relais. Zuse demande à Schreyer, thésard à cette époque, de tester les principes de la machine Z2 sur un petit modèle. Schreyer a l'idée d'utiliser des tubes électroniques au lieu de relais et montre sa machine à la *Technical University* de Berlin en 1938. Zuse n'utilise pas les tubes électroniques dans la version finale de la machine car il lui est impossible, dans le contexte de pré-guerre de l'époque, d'obtenir les 1 000 tubes nécessaires à la machine complète. Schreyer continue cependant à s'intéresser aux tubes électroniques, construit quelques circuits expérimentaux et utilise son expérience pour sa thèse soutenue en 1941, intitulée *Le relais à tube et les techniques de commutation* mais on ne possède pas beaucoup plus de détails.

Atanasoff

John V. Atanasoff hérite de sa passion pour les sciences de son père, ingénieur électricien qui émigre aux États-Unis à la fin des années 1880. Il vit en Floride, où son père travaille dans une mine de phosphate près de Lakeland. Atanasoff veut étudier la physique théorique mais le programme de l'université de Floride à Gainesville n'est pas particulièrement bon à cette époque, aussi se réoriente-t-il vers le génie électrique. Il suit ensuite un master en physique à l'université d'état de l'Iowa puis un doctorat à l'université du Wisconsin à Madison. Sa thèse porte sur les propriétés électriques de l'hélium. Il passe des semaines à résoudre des équations avec un calculateur de bureau. Il devient assistant professeur en mathématiques et en physique à l'université d'état de l'Iowa.

Il doit effectuer de nombreux calculs mais son intérêt pour le calcul électronique se développe seulement petit à petit. En 1937 il a une bonne idée du type de machine qu'il veut construire et il en donne tous les détails dans les deux années qui suivent. Sur la base de ce projet, il obtient 650 $ de l'université d'état de l'Iowa l'été 1939. En août ou septembre il embauche Clifford Berry et ils réalisent un prototype un ou deux mois plus tard, qui peut additionner et soustraire des nombres binaires de seize bits. C'est le premier calculateur à tubes électroniques de l'histoire.

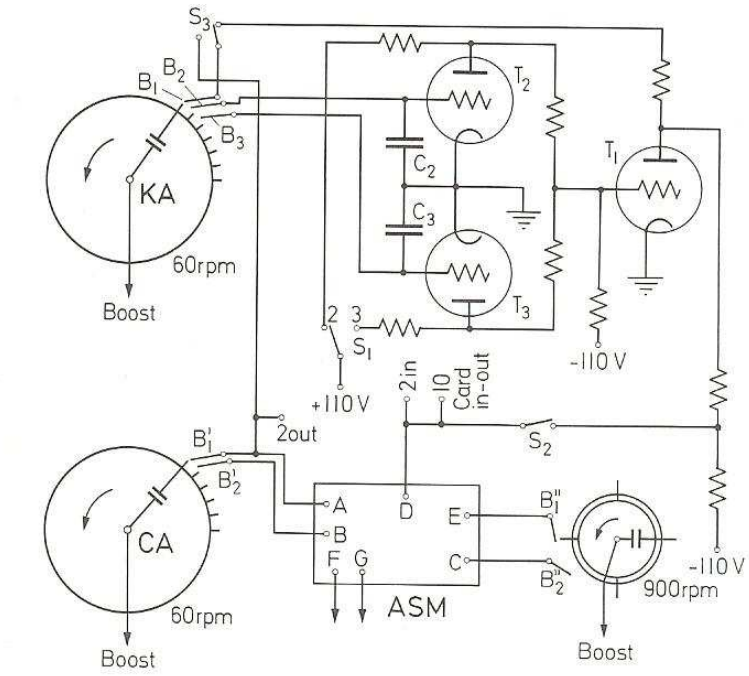

Figure 4.31 – Fig. 1 de [Ata-40]

C'est la partie qui nous intéresse ici. Cependant Atanasoff écrit un projet détaillé l'été 1940 [Ata-40], demandant 5 000 $. Il reçoit 1 500 $ de l'université d'état de l'Iowa, puis d'autres ressources. Atanasoff et Berry construisent leur nouvelle machine au printemps 1942, appelée un peu plus tard **ABC** pour *Atanasoff–Berry Computer*.

Deux figures du projet nous intéressent. La figure 4.31 nous montre la façon de décrire le circuit électronique. Le schéma électronique est donné. Nous n'en sommes pas encore à l'abstraction des circuits combinatoires avec des portes. La figure 4.32 nous donne la table correspondant à ce circuit : B, D, E et A, C correspondent aux points ainsi dénommés sur la figure 4.31 ; H signifie *Higher voltage* et L *Lowest voltage* ; H est donc représenté par 0 et L par 1 (nous préférerions le contraire de nos jours). La colonne *Addition* correspond à ce qu'on appelle de nos jours un étage d'additionneur.

Nous venons de voir que non seulement les premiers circuits combinatoires réalisés à l'aide de tubes électroniques sont conçus en 1937, mais également des calculateurs électroniques expérimentaux complets. Cependant la première réalisation qui connaîtra un véritable succès est l'ENIAC (voir lecture 1). ENIAC

4.5.4 Les circuits à transistors

L'ENIAC est une réalisation militaire et reste secrète jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale. Les calculateurs suivants sont presque tous électroniques. Cependant les calculateurs à lampes électroniques sont très encombrants et la durée de vie de chaque lampe très courte. On recherche donc une miniaturisation et une fiabilité accrues.

Numbers Presented	Corresponding Voltage	Addition F-high G-low	Subtraction F-low G-high
B D E	B D E	A C	A C
0 0 0	H H H	H H	H H
0 0 1	H H L	L H	L L
0 1 0	H L H		
0 1 1	H L L	H L	H L
1 0 0	L H H	L H	L H
1 0 1	L H L	H L	H H
1 1 0	L L H		
2 1 1	L L L	L L	L L

FIGURE 4.32 – Table dans [Ata-40]

4.5.4.1 Apparition des transistors

Le transistor est créé le 23 décembre 1947 aux laboratoires Bell par John BARDEEN et Walter BRATTAIN : il s'agit du *transistor à pointe*, difficile à déployer de façon industrielle. En 1951, William SHOCKLEY améliore celui-ci en créant le *transistor à jonction*, ou *transistor bipolaire*, qui en permet le développement industriel.

Un transistor se comporte comme une triode : au lieu d'une cathode et d'une anode, on a un *émetteur* et un *collecteur*; au lieu d'une grille, on a une *base*. Ils peuvent donc servir d'éléments de commutation, en plus petits et en plus fiables. Les constructeurs d'ordinateurs s'intéressent donc à ce nouveau composant.

4.5.4.2 Utilisation des transistors dans les circuits combinatoires

Les scientifiques du *Digital Computer Lab.* du MIT travaillent avec IBM en février 1956 pour développer un ordinateur transistorisé. Celui-ci est destiné à remplacer les ordinateurs à tubes électroniques du projet SAGE (voir plus loin) ; cependant les ordinateurs de ce projet sont déjà en construction et l'Air Force ne voit pas de raison de les remplacer.

Les premiers ordinateurs transistorisés apparaissent donc plus tard, en 1957 et 1958, produits par UNIVAC et Philco Corporation ([Aug-84], pp. 229–230).

4.5.5 Les circuits intégrés

4.5.5.1 Apparition des circuits intégrés

Les besoins

Le chapitre 8 de [Aug-84] est une très bonne introduction, que nous ne faisons que résumer ici, à l'étude des efforts du Département de la Défense américain, qui dépense plusieurs millions de dollars, à partir du début des années 1950, pour des programmes de recherche destinés à rendre les composants électroniques plus petits, plus fiables, moins chers et plus faciles à construire. Ceci est dû au fait que les bombardiers B-29 d'une part, les missiles *Minuteman* ensuite, contiennent de l'électronique embarquée.

Projet Tinkertoy

Le *projet Tinkertoy* commence en secret au *National Bureau of Standards* à la demande de la marine américaine. Son but premier est la standardisation et non pas la miniaturisation : on veut pouvoir remplacer rapidement des modules électroniques compacts, composés d'éléments discrets standardisés. Les éléments employés sont des tubes électroniques et non pas des transistors. Cependant le projet prend fin en 1953 sur un échec relatif.

Plan Micromodule

Quatre ans plus tard RCA (*Radio Corporation of America*), une des grandes entreprises de construction de tubes électroniques, fondée en 1919, prend en charge le *Plan Micromodule*, financé par l'*Army Signal Corps*. On utilise cette fois des transistors, des résistances et d'autres composants sur une plaque en céramique. Mais le projet prend fin en 1963, rendu obsolète par l'arrivée des circuits intégrés.

Idée

L'idée des circuits intégrés revient au britannique G. W. A. Dummer, qu'il exprime dans un colloque sur les composants électroniques en mai 1952 à Washington en lisant un article intitulé *Electronic Components in Great Britain* :

> *Avec l'arrivée des transistors et plus généralement les travaux sur les semi-conducteurs, il semble maintenant possible d'envisager des équipements électroniques contenus dans un même bloc sans connexions par des fils. Le bloc peut consister en couches de matériaux isolants, conducteurs, rectificateurs et amplificateurs, les fonctions électriques étant connectées directement en coupant des zones des diverses couches.*
>
> [Dum-78], p. 128

Rentré en Grande-Bretagne, Dummer essaye de mettre ses idées en pratique. Il présente un prototype en septembre 1957, à un congrès à Malvern, mais celui-ci ne fonctionne pas.

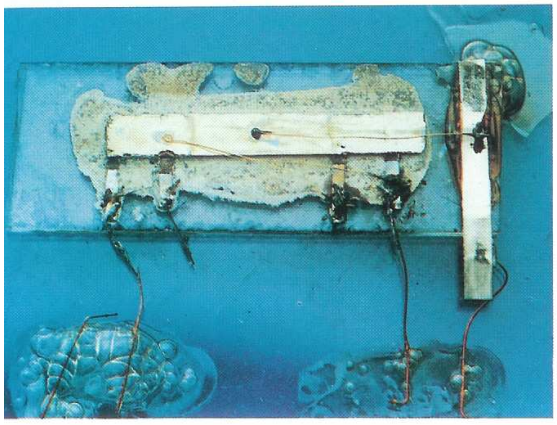

Figure 4.33 – Le premier prototype de circuit intégré ([Aug-84], p. 237)

Premier IC

Le premier prototype de circuit intégré (un composant fournissant un signal à une fréquence donnée, montré à la figure 4.33) est conçu l'été 1958 par Jack KILBY, ingénieur chez *Texas Instrument*. D'autres prototypes suivent rapidement, y compris une bascule, et un premier brevet est déposé le 6 février 1959. Un mois plus tard *Texas Instrument* annonce fièrement lors d'une convention industrielle à New-York « *le développement d'un circuit solide semi-conducteur pas plus grand qu'une tête d'allumette* ».

L'invention de KILBY est une avancée extraordinaire mais présentant encore des inconvénients : comme on le voit sur la figure, les différentes parties du circuit intégré sont reliées par des fils soudés à celles-ci, ce qui limite le nombre de parties et la fiabilité du tout ; il faut concevoir des éléments passifs (des résistances et des condensateurs) à partir de semi-conducteurs ; il faut pouvoir isoler les différentes parties les unes des autres.

KILBY résout les deux derniers problèmes mais pas le premier, ce qui en rend la production industrielle difficile.

Les transistors mesa

Avant d'aller plus loin faisons deux digressions sur l'évolution de la technologie des transistors. Les *Bell Labs* inventent le *transistor mesa* à la fin des années 1950, fabriqué en trois phases de photolithographie, gravure et diffusion (dopant chimiquement le semi-conducteur avec des impuretés). Cependant le transistor est sujet à des contaminations et les fils de connexion ont tendance à se détacher.

Les transistors planaires

Jean HOERNI, physicien né en Suisse, résout le problème à la toute fin de l'année 1958 en diffusant le plateau sur une tranche de silicium (appelée *wafer* en anglais puis plus tard *galette* en français). Le résultat est un transistor totalement plat.

IC planaire

Robert NOYCE résout le premier problème posé par les circuits intégrés de KILBY en concevant les circuits intégrés planaires.

Il grandit à Grinnell dans l'Iowa. Major en physique du Grinnell College, il est initié à la physique du solide par son professeur de physique, Grant GALE. Celui-ci, après avoir lu un article sur l'invention du transistor dans un journal l'été 1948, demande à John BARDEEN de lui en envoyer quelques exemplaires pour ses étudiants. Il devient ami avec lui. NOYCE décide de se spécialiser en physique du solide et va au MIT où, à sa grande surprise, peu de personnes ont entendu parler de transistor. Il soutient sa thèse en 1953 et va travailler chez *Philco*, à Philadelphie, qui a ouvert un département semi-conducteur. Mais il trouve que les dirigeants de cette entreprise ne sont pas intéressés par des recherches avancées. Il va donc chez *Shockley Semiconductor Laboratory*, une petite entreprise créée par l'un des co-inventeurs du transistor, située à Mountain View en Californie. Il y rencontre Jean HOERNI. Brillant chercheur, William SHOCKLEY était loin d'être un gestionnaire et un meneur d'hommes ; de plus il avait le sentiment d'une conspiration contre lui. L'été 1957, NOYCE, HOERNI et six autres scientifiques et ingénieurs quittent l'entreprise pour créer *Fairchild Semiconductor* à Palo Alto, financé par *The Fairchild Camera & Instrument Corporation* de New-York. C'est la seconde entreprise de semi-conducteurs, après celle de William SHOCKLEY, de ce qui sera appelée plus tard la *Silicon Valley*.

Contrairement à *Shockley Semiconductor Laboratory*, *Fairchild Semiconductor* se concentre sur les transistors au silicium, et non plus au germanium.

Kurt LEHOVEC, directeur de recherche de la *Sprague Electric Company* située à North Adams dans le Massachusetts, physicien né en Tchéquie et immigré aux États-Unis après la Seconde Guerre Mondiale, résout le problème de l'isolation électrique des composants l'un par rapport à l'autre grâce à une jonction pn qui ne permet à l'électricité que d'aller dans une sens. Il conçoit un circuit intégré améliorant celui de KILBY et obtient un brevet le 22 avril 1959.

Robert NOYCE pense au circuit intégré planaire dès janvier 1959 et dépose un brevet six mois plus tard.

Commercialisation

En 1961 *Fairchild* et *Texas Instrument* commercialisent les premiers circuits intégrés produits de façon industrielle. *Texas Instrument* propose des portes logiques OR et NOR. Un circuit in-

tégré vaut alors 50 $ par lot de mille, le double en petite quantité. Au début, seules la défense et la NASA peuvent s'en offrir (pour les ordinateurs de bord de la capsule Gemini).

On peut résumer l'invention des circuits intégrés de la façon indiquée dans le tableau ci-dessous :

1950–1953	Projet Tinkertoy	National Bureau of Standards
1957–1963	Plan Micromodule	RCA
1952	Idée des circuits intégrés	G. W. A. Dummer
1958	Premier circuit intégré	Jack Kilby
Janvier 1959	Transistor plat	Jean Hoerni
Avril 1959	Isolation par jonction pn	Kurt Lehovec
Fin 1959	Premier circuit intégré planaire	Robert Noyce
1961	Production industrielle	Fairchild et Tewas Instrument

4.5.5.2 Utilisation des circuits intégrés comme circuits de commutation

Au début, les circuits intégrés permettent de réaliser à la fois des circuits d'amplification et des circuits de commutation.

L'industrie informatique est également intéressée mais il faut d'abord éponger le passage des tubes électroniques aux transistors. La conception des ordinateurs utilisant des transistors ne conduit pas à des méthodes vraiment nouvelles puisque les tubes et les transistors ont les mêmes fonctionnalités. Il n'en est plus de même avec les circuits intégrés : il faut tout revoir depuis le début. C'est pour cela que les circuits intégrés seront, dans une première étape, utilisés dans un module indépendant, à savoir la mémoire vive, étape sur laquelle nous reviendrons à son heure.

Les circuits intégrés en tant que circuits combinatoires apparaissent dans des parties de deux ordinateurs de taille moyenne de *Burroughs* en 1966 (le B2500 et le B3500). Les premiers ordinateurs composés entièrement de circuits intégrés sont le CDC 7600 de *Control Data* et la série Century de NCR en 1968. IBM les utilise avec sa série System/370 au début des années 1970.

4.5.6 Lecture 1 : l'ENIAC

La balistique

En 1917, Oswald Veblen, d'origine norvégienne et professeur de mathématiques à l'Institut des études avancées (*Institute for Advanced Studies*) de Princeton, abandonne provisoirement son enseignement, du fait de l'entrée en guerre, pour diriger la section « Mathématiques » du Centre balistique de Sandy Hook. Grâce aux liens tissés avec d'innombrables universitaires, Veblen constitue une équipe de très haut niveau. Ce groupe fait de la balistique une science physique à part entière : les règles d'observation sont rationnalisées, les méthodes de calcul affinées, les équations différentielles de mouvement correctement formulées et les procédures pour la résolution de ces équations définies.

Le BRL

Compte tenu de l'importance croissante des recherches dans le domaine de la balistique, le Département du matériel de l'*US Army* (*Army's Ordnance Department*) se dote en 1935 d'un service de recherche spécialisé. Celui-ci devient en 1938 le Laboratoire de recherche balistique (*Ballistic Research Laboratory*, BRL) et s'installe à Abeerden dans l'état du Maryland. Son comité directeur est constitué de deux civils et de trois militaires. Son directeur scientifique est Oswald Veblen.

L'Analyseur différentiel

Comme nous l'avons vu ci-dessus, Vannevar Bush met au point en 1930 son analyseur différentiel. Celui-ci intéresse à la fois les mathématiciens de l'université de Pennsylvanie et les militaires du BRL. Bush exploite cette communauté d'intérêts et suscite des rencontres entre les responsables des deux organismes. On convient que l'école Moore d'ingénierie électrique (fondée

en 1926 à l'université de Pennsylvanie) et le Centre de balistique d'Aberdeen construiront chacun un exemplaire de l'analyseur Bush. Ces machines jumelles doivent permettre aux deux centres d'unir, éventuellement, leurs efforts. Un accord en ce sens est conclu vers la fin de 1934 et, une vingtaine de mois plus tard, les deux calculateurs sont achevés.

Calcul des besoins

L'une des activités principales du BRL est le calcul des tables de tir. Les tables de tir permettent de régler l'angle de tir en fonction de nombreux facteurs (type de projectile, situation de la cible, vitesse du vent, température, etc.). Ces tables sont longues et difficiles à établir même si on ne considère que deux facteurs (portée du projectile et altitude de la cible) : il faut calculer entre 2 000 et 4 000 trajectoires possibles pour chaque couple projectile–canon ; chaque trajectoire exige 750 multiplications de 10 chiffres.

En 1935 le colonel Hermann H. Zornig prend la tête du Laboratoire de recherches balistiques d'Aberdeen. Lui et ses collaborateurs cherchent à estimer la charge de travail représentée par 100 000 multiplications pour les machines électromécaniques existantes. Avec le multiplicateur IBM alors commercialisé, il faut sept secondes par multiplication. À raison de 86 400 secondes par journée, 100 000 multiplications représentent huit jours continus de travail. Pour réaliser une expérimentation complète, consistant en 75 hypothèses possibles, les calculs doivent durer six cents jours, soit vingt mois !

En 1940, lorsque le président Roosevelt a progressivement institué un état d'urgence national, le colonel Zornig décide de recenser et, si possible, de s'assurer de la disponibilité de tout le potentiel de calcul de cette région des États-Unis. À l'université de Pennsylvanie, toute proche, il obtient du doyen Harold Pender et du Pr J. Grist Brainerd l'assurance que l'analyseur différentiel de l'université sera mis au service de son organisme en cas de nécessité militaire.

En 1941, le colonel Leslie E. Simon prend la suite de Zornig à la tête du Centre d'Aberdeen. Avec son adjoint Paul N. Gillon, il consolide les liens existant entre le Centre Balistique, l'École Moore et IBM. Cette firme livre dans les deux mois qui suivent deux calculateurs électromécaniques spéciaux, « dopés » pour améliorer leurs performances. Puis Simon et Gillon rappellent le mathématicien exceptionnel de 1917, Oswald Veblen, et lui offrent le rôle de « conseiller scientifique en chef ». Le vieux professeur (soixante-trois ans) quitte une seconde fois sa chaire de Princeton et constitue une nouvelle équipe. Veblen et A. A. Bennett, un vétéran du groupe de 1917, recrutent sept jeunes mathématiciens, huit physiciens et deux astronomes ; ils complètent l'équipe avec un collègue de Veblen à l'IAS, Marston Morse, et suggérent comme conseiller à temps partiel un mathématicien hongrois fraîchement naturalisé, Johannes von Neumann.

En 1942, les États-Unis entrent en guerre. On se rend compte très vite à Aberdeen que les analyseurs différentiels sont incapables de tenir la cadence de travail attendue d'eux. Quant aux machines IBM, elles grignotent à peine la pile des tables à établir.

Il faut se résoudre à confier une partie des travaux à de jeunes diplômés, hommes et, plus souvent, femmes, pourvus de machines à calculer manuelles. Mais, là encore, on manque de personnel compétent en nombre suffisant. Il est décidé qu'une annexe du Laboratoire balistique (*computing substation*) soit établie hors de l'enceinte militaire du polygone, dans les locaux de l'École Moore. Un programme prioritaire de formation de civils requis est instauré : sous la direction du professeur Chambers, trois jeunes mathématiciennes, Adele K. Goldstine, Mildred Kramer et Mary Mauchly, organisent le recrutement et la formation d'une centaine de jeunes filles ou de jeunes femmes (les hommes sont mobilisés), puis les mettent au travail sur des machines à calculer de bureau réquisitionnées.

Dans le même temps, on cherche comment améliorer la productivité des deux analyseurs différentiels. C. Weygandt, de l'École Moore, anime ces recherches. Dans sa petite équipe, J. Presper Eckert se fait remarquer par ses qualités d'imagination et son esprit pratique. Les modifications qu'il suggère conduisent à une amélioration relative des performances, mais confirment les limitations inhérentes à la technologie analogique.

Dès 1943, la demande en tables de tir s'accroît dangereusement : la construction de guides pour les tirs de DCA ont plusieurs mois de retard. À l'été 1944 la situation devient sans espoir : le BRL produit quinze tables par semaine alors que la demande est de quarante.

John Mauchly

John MAUCHLY (prononcer Mauk-li), né à Cincinnati le 30 août 1907, est le fils du directeur du département de Magnétisme terrestre de la Carnegie Institution, dans le Maryland. Après des études à l'université John-Hopkins où il obtient en 1932 un doctorat de physique, il s'oriente d'abord vers la spectroscopie moléculaire et passe une année à John-Hopkins comme chercheur associé, travaillant pendant des heures sur un spectroscope, puis exploitant péniblement ses observations à l'aide d'une machine à calculer de bureau.

Fin 1932, en pleine dépression des États-Unis, il cherche un emploi. Il trouve un poste de professeur adjoint de physique à Ursinus College, établissement privé situé à 40 kilomètres de Philadelphie. Il y reste huit années qu'il trouve amères : Ursinus ne dispose pas d'équipements scientifiques comparables à ceux de John-Hopkins. Il doit renoncer à la spectrographie pour s'orienter vers les statistiques et la météorologie, deux activités qui le conduisent à se préoccuper de moyens de calcul rapide.

MAUCHLY pense qu'il est possible d'améliorer la précision des prévisions météorologiques en pratiquant des analyses statistiques systématiques. Avec l'accord de la *National Youth Administration*, un organisme créé par le *New Deal* de ROOSEVELT pour aider à l'emploi des jeunes désœuvrés durant la dépression, MAUCHLY se fait détacher une douzaine d'étudiants. Il entreprend de leur faire dépouiller toutes les observations atmosphériques détenues à la Carnegie Institution, pour essayer, statistiquement, d'établir une corrélation avec l'activité solaire. Il est vite évident qu'un tel travail, exécuté manuellement, n'aboutira jamais.

Le jeune professeur a entendu parler des dispositifs électroniques de comptage rapide des rayonnements cosmiques mis au point par des chercheurs anglais. Des circuits similaires peuvent-ils être utilisés dans une sorte de calculateur ultra-rapide ? Il bricole quelques circuits simples et conclut qu'il y a là une voie possible. Aussi, le 28 décembre 1940, lors d'une conférence sur les méthodes statistiques en météorologie faite devant l'Association américaine pour le développement des sciences, à Philadelphie, MAUCHLY évoque les possibilités offertes par l'électronique en matière de calcul.

ATANASOFF se trouve dans l'assistance. À la fin de la séance, il va trouver le conférencier, se présente, décrit les grandes lignes de son modèle expérimental et invite MAUCHLY à venir à Ames, en Iowa, pour voir sa machine. Les deux hommes restent en correspondance jusqu'à ce que, le 14 juin 1941, MAUCHLY se rende à Ames, où il passe cinq jours chez ATANASOFF. L'inventeur emmène son hôte dans son laboratoire, lui explique les principes de son calculateur encore en construction et lui communique le texte de son mémoire [Ata-40].

MAUCHLY construit plusieurs dispositifs expérimentaux mais se rend compte qu'il lui manque deux atouts maîtres : de solides connaissances en électronique appliquée et surtout de l'argent. Au début de juin 1941 il s'inscrit à un cours d'été de six semaines dispensé par l'université de Pennsylvanie. En effet, dans la perspective d'une guerre prochaine, l'armée des États-Unis a décidé de parrainer des cours de formation accélérée (*Emergency Science and Management Defense Training Course*) dans le but d'orienter des ingénieurs, des enseignants, des cadres de l'industrie que l'on pourra, par la suite, affecter à des fonctions militaires ou à des emplois dans les industries de défense. Sa demande d'inscription est acceptée et il peut suivre la session commençant le 23 juin 1941. Il passe de longues heures à discuter d'électronique avec l'un des jeunes instructeurs de la Moore Scholl, J. Prespert ECKERT. À l'issue de ce stage, les résultats de MAUCHLY sont si satisfaisants que la *Moore School*, qui a plusieurs postes vacants, lui offre un contrat d'instructeur à partir de septembre.

J. P. Eckert

J. P. ECKERT appartient à une famille de grands promoteurs immobiliers établis dans la région de Philadelphie. Dès l'âge de huit ans, l'enfant montre des dons étonnants pour l'électricité et

la radio : il monte son premier récepteur à galène sur le bout d'un crayon, dans l'emplacement prévu pour la gomme ; à douze ans, il fabrique un modèle réduit de bâteau télécommandé et bricole un récepteur radio à deux lampes ; à quatorze ans, il réalise des haut-parleurs et une chaîne musicale pour la classe de solfège de son collège.

ECKERT s'inscrit à l'université de Pennsylvanie, à Philadelphie. L'environnement est propice à sa passion pour l'électronique : dans les années qui précèdent la Seconde Guerre mondiale, la région de Philadelphie est le centre de gravité de l'industrie électrique et électronique américaine. La première station de télévision y est créée et, juste avant la guerre, ECKERT peut acheter l'un des premiers récepteurs expérimentaux, construits par RCA et vendus 60 dollars.

ECKERT se révèle l'un des plus brillants étudiants de la *Moore School*. Pendant les vacances d'été, il intervient comme conseiller auprès de firmes industrielles ou d'utilisateurs d'appareils électriques ou électroniques.

Le tandem

Nous avons vu que MAUCHLY et ECKERT se sont rencontrés lors d'un cours d'été à la *Moore School*. Malgré leur différence d'âge (douze ans), ils se lient d'une amitié solide. MAUCHLY essaye d'intéresser les directeurs de la *Moore School* à ses projets de calcul par l'électronique, mais nulle réaction favorable ne vient l'encourager. ECKERT, très sollicité par les problèmes concrets d'appareils industriels, de radio ou de télévision, ne se sent nullement attiré par le calcul automatique à grande vitesse mais il répond à MAUCHLY qu'une telle réalisation est possible : il sait par expérience que l'objection essentielle de l'époque, à savoir que les lampes à vide sont trop fragiles, tombe lorsqu'on conçoit des circuits évitant de pousser les lampes à leur pleine puissance. Féru de musique et d'orgues électroniques, il posséde l'un des *Novachord* à 170 lampes fabriqués par l'*Hammond Organ Company*, dont la vie paraît garantie lorsque les lampes travaillent à moins de 80 % de leur tension maximum.

Au début de 1942, connaissant par sa femme Mary, instructrice à l'annexe du BRL, la situation difficile des militaires d'Aberdeen, MAUCHLY comprend qu'il peut être possible de les amener à jouer les maîtres d'œuvres d'un calculateur.

Établissant la synthèse de tout ce qu'il a appris au cours de ses expérimentations personnelles, des informations recueillies auprès d'ATANASOFF, des avis d'ECKERT et d'autres scientifiques de sa connaissance, MAUCHLY entreprend de rédiger un mémorandum sur la possibilité de construire un calculateur décimal électronique : *The use of high speed vacuum tube devices for calculating* [Mau-42], cinq pages dictées et dactylographiées en août 1942. Sans entrer dans les détails techniques, MAUCHLY explique qu'il reposera entièrement sur des composants électroniques et travaillera avec un cycle de 100 000 impulsions par seconde. Avec la possibilité d'exécuter 1 000 multiplications par seconde, le calcul d'une trajectoire pourrait se faire en cent secondes au lieu des 15 à 30 minutes nécessaires avec l'analyseur différentiel.

L'original de ce mémorandum est adressé à J. G. BRAINERD, membre du Conseil de l'université de Pennsylvanie qui négocie tous les contrats conclus entre l'université et le gouvernement. Un papillon attaché à l'original demande que ce texte soit reproduit et que des exemplaires soient adressés aux personnes susceptibles d'être intéressées. MAUCHLY ne conserve aucun double ; sa secrétaire se borne à classer les feuillets sténo pris sous sa dictée.

BRAINERD l'annote : « *Intéressant. Il est possible que le manque de main d'œuvre puisse justifier un travail de développement de ce genre dans un avenir assez rapproché* ». Puis le document est classé, sans être reproduit ni avoir fait l'objet d'une circulation quelconque. On ne le retrouvera dans les dossiers de BRAINERD qu'une vingtaine d'année plus tard.

Goldstine

Herman Heine GOLDSTINE, fils d'un avocat israélite, est né à Chicago le 13 septembre 1913. En 1929, inscrit à l'université de sa ville natale, il prend les mathématiques comme discipline principale. Docteur en 1936, d'abord assistant de recherches à Chicago, il passe ensuite à l'université du Michigan comme professeur adjoint de mathématiques. En 1941, il épouse Adele KATZ, elle-même mathématicienne.

L'année suivante, GOLDSTINE est mobilisé comme lieutenant, rattaché à l'*Ordnance Dept.* de l'U.S. Army et affecté au Centre balistique du Maryland. En raison de sa formation mathématique, il est chargé de trouver les meilleurs moyens d'accélérer l'établissement des tables de tir nécessaires à l'armée.

En mars 1943, alors que la situation paraît de plus en plus désespérée au *Ballistic Research Laboratory*, le jeune lieutenant effectue l'une de ses visites périodiques au Centre annexe de calcul. Ce matin-là, GOLDSTINE échange quelques phrases avec le jeune homme chargé d'assurer la maintenance de l'analyseur différentiel. Il se plaint de la lenteur de l'avancement des calculs. Joe CHALIAPINE, son interlocuteur, a été l'élève de MAUCHLY à Ursinus College et connaît les projets de son ancien professeur : « *Je connais quelqu'un qui peut vous permettre d'aller mille fois plus vite. Si ça vous intéresse, allez donc voir M. John Mauchly, à l'étage au-dessus* ».

Abasourdi, GOLDSTINE se précipite dans le bureau de MAUCHLY. Celui-ci confirme l'information, décrit les grandes lignes de son projet et les performances prévisibles. « *Rédigez vite un mémoire* », demande GOLDSTINE.

MAUCHLY réplique que c'est fait depuis plusieurs mois et que le document se trouve dans les mains de J. G. BRAINERD. Le lieutenant rend visite à BRAINERD qui se souvient du texte, mais est incapable de le retrouver. MAUCHLY, informé, déclare qu'il ne possède pas de double. Il faut reconstituer le mémoradum, à partir des notes conservées par la sécrétaire. Lorsque GOLDSTINE peut enfin lire les cinq feuillets, il prend l'initiative de demander à la *Moore School* de soumettre au plus tôt une proposition de réalisation plus détaillée.

Proposition

Aussitôt la requête formulée par le lieutenant GOLDSTINE, BRAINERD, ECKERT et MAUCHLY se réunissent pour déterminer exactement ce que la proposition demandée à l'armée doit contenir. ECKERT et MAUCHLY préparent les chapitres techniques sous leurs deux volets : électronique et mathématique; BRAINERD rédige l'introduction et l'exposé général. Devant l'ampleur de la réalisation électronique, BRAINERD et MAUCHLY insistent pour obtenir une participation totale d'ECKERT qui, jusque-là, s'en est tenu à un rôle de conseiller dilettante.

Un premier texte, achevé le 2 avril, est aussitôt remis en chantier pour être amélioré. Un rendez-vous entre les universitaires et les militaires est convenu pour le 9 avril.

Le premier titre de la proposition est *rapport sur un analyseur différentiel électronique soumis au Ballistic Research Laboratory par la Moore School*. Le terme d'« analyseur différentiel » choque MAUCHLY qui proteste vivement : la machine envisagée est d'usage général et non limitée au seul traitement d'équations différentielles. On transige sur le terme ambigu d'« *Electronic Numerical Integrator* ».

Le 9 avril, en milieu de journée, GOLDSTINE, BRAINERD et MAUCHLY se rendent en voiture à Aberdeen. GOLDSTINE et BRAINERD sont reçus par un comité composé du colonel SIMON, directeur du BRL, de T. H. JOHNSON et d'Oswald VEBLEN, présents comme mathématiciens experts en balistique. GOLDSTINE, agissant comme rapporteur, énumère les caractéristiques et les performances attendues de la machine. Sa solide argumentation convainc les experts. Au terme de son exposé, Oswald VEBLEN repousse sa chaise, se lève et déclare : « *Simon, procurez à Goldstine les fonds nécessaires* ».

Après six semaines de conférences et de discussions de plus en plus serrées, un contrat est préparé le 17 mai. Le 31 mai, lors d'une réunion de travail entre le colonel P. N. GILLON, le Dr John THOMAS (physicien et expert), l'astronome L. E. CUNNINGHAM (conseiller scientifique), GOLDSTINE, BRAINERD, ECKERT et MAUCHLY, GILLON propose de préciser la dénomination de la machine (*Electronic Numerical Integrator*) en ajoutant « *and computer* », ce qui correspond mieux à la réalité : GILLON s'assure d'un argument si les coûts réels dépassent le budget autorisé. On en tire aussitôt l'acronyme **ENIAC**.

Le contrat est signé le 5 juin 1943. Le projet, classé « SECRET », ne doit alors être connu que sous la désignation opaque de « Projet PX ». Le coût de l'entreprise, estimé à 100 000

dollars dans la proposition initiale, est porté à 150 000 dollars avant la signature du contrat. L'université reçoit 61 700 dollars dès la signature ; les 88 300 dollars restants feront l'objet de versements échelonnés, en fonction de l'avancement des travaux. Le coût final atteindra 486 804 dollars. BRAINERD est nommé chef de projet, ECKERT ingénieur en chef, MAUCHLY (qui continue à dispenser son enseignement) conseiller principal et GOLDSTINE assure la liaison entre la *Moore School* et le BRL.

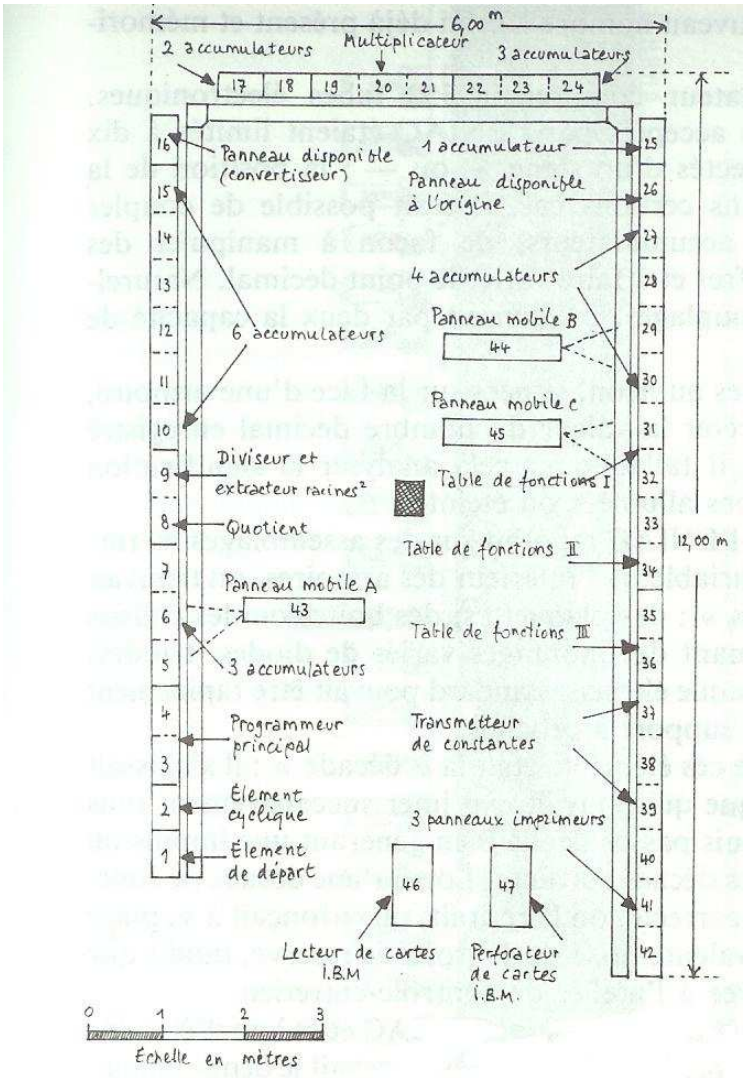

FIGURE 4.34 – Schéma général de l'ENIAC ([Lig-87], p. 321)

Dès le départ les relations sont excellentes et confiantes entre l'université et le Centre balistique mais des pressions extérieures interviennent pour torpiller le projet. Le *National Development Research Council*, l'organisme gouvernemental de tutelle scientifique, présidé par Vannevar BUSH, tente de s'opposer à la signature du contrat ENIAC car les dirigeants du NDRC, provenant

généralement du MIT, sont chauds partisans des techniques analogiques. Le colonel GILLON, avec l'appui de l'*Army Ordnance Dept.*, passe outre aux objections et impose la signature du contrat : « *Rien d'équivalent n'a été tenté jusqu'ici... et rien n'empêche d'autres centres de recherche de proposer d'autres solutions* ».

La construction

Trois jeunes diplômés de la *Moore School*, Kite T. SHARPLESS, Robert SHAW et Herman LUKOFF, sont incorporés à l'équipe en formation. Arthur W. BURKS, un philosophe logicien du Michigan qui a suivi les mêmes cours accélérés que MAUCHLY en 1942, est coopté. RCA détache l'un de ses meilleurs ingénieurs, Joseph CHEDAKER, pour assurer la construction matérielle de l'ENIAC, sous la supervision de Presper ECKERT. Une dizaine de techniciens et une vingtaine d'ouvriers spécialisés participent au projet qui occupe, au total, entre trente et cinquante personnes, selon les phases. Adele GOLDSTINE est chargée de constituer et de tenir à jour la documentation nécessaire à l'exploitation, l'entretien et la programmation de la machine.

La construction de l'ENIAC commence officiellement le 1^{er} juillet 1943 mais les travaux sont lancés dès le 31 mai. Fin décembre, le premier compteur électronique conçu par ECKERT est expérimenté. Il donne pleine satisfaction et on passe aussitôt à la fabrication des « accumulateurs » prototypes. Les deux premiers, achevés en juin 1944, travaillant à 200 000 impulsions par seconde, confirment les performances escomptées : 5 000 additions de dix chiffres à la seconde. Ce succès provoque une large extension du projet ENIAC : au lieu des quatre accumulateurs prévus, le BRL et la *Moore School* décident de porter le nombre de ces éléments à vingt ! La construction se poursuit jusqu'à l'automne 1945.

Description

L'ENIAC devient une énorme machine composée, pour l'essentiel, de 42 armoires de tôle d'acier peintes en noir ; chacune d'elles mesure 3 mètres de hauteur, 60 centimètres de large et 30 centimètres de profondeur ; leur face fait apparaître d'innombrables interrupteurs et lampes témoins. Dans le haut des panneaux circulent des conduits d'aération pour éliminer la chaleur dégagée par les lampes électroniques. Celles-ci, à l'origine, doivent être au nombre de 5 000 ; durant la construction, leur nombre croit sans cesse pour atteindre finalement 18 800. Deux gros moteurs Chrysler de 12 CV sont nécessaires pour faire fonctionner le système de ventilation. Chaque armoire est équipée d'un thermomètre et d'un humidificateur réglable à la main ; en outre un thermostat doit arrêter le fonctionnement de la machine tout entière lorsqu'une des armoires atteint la température de 48 ^{o}C.

En plus des quarante-deux armoires fixes, trois cabinets, plus larges, montés sur de grosses roulettes pour faciliter leurs déplacements, peuvent être connectés au reste de la machine, en des endroits différents mais bien définis, selon la nature du travail demandé. Un lecteur et un perforateur complètent le calculateur.

Accumulateur

Les « accumulateurs » constituent les principales cellules de travail de l'ENIAC. Un accumulateur peut :

- conserver (c'est-à-dire mémoriser) un nombre décimal,
- l'effacer,
- le transmettre à un autre accumulateur,
- ajouter un nouveau nombre à celui déjà présent et mémoriser ce dernier cumul.

Chaque accumulateur comporte 550 tubes électroniques. Les nombres traités par l'ENIAC comprennent dix chiffres décimaux et un signe. Dans certains cas il est possible de coupler provisoirement deux accumulateurs de façon à manipuler des nombres de vingt chiffres.

Cent petites lampes au néon, situées sur la face d'une armoire, permettent d'interpréter la valeur du nombre décimal enregistré dans l'accumulateur.

L'architecture de l'ENIAC est modulaire. À l'intérieur des armoires on trouve des « éléments à fiches » : des plaquettes, des boîtes ou des chassis en tôle d'acier, contenant des montages variés de diodes, triodes, condensateurs, etc. Chaque élément standard peut être rapidement engagé ou retiré d'un support à broches. Lorsqu'un module se révèle défectueux, on le remplace par un

module de réserve, puis on l'envoye à l'atelier d'entretien pour un diagnostic et une remise en état.

La machine, installée au rez-de-chaussée de l'un des bâtiments de la *Moore School*, pèse 30 tonnes, occupe 72 mètres carrés au sol, se développe en forme de U sur 12 mètres de longueur et 6 mètres de large et consomme 140 kilowatts.

Utilisation

Les premiers travaux de l'ENIAC sont exécutés en novembre 1945. Le calculateur arrive donc après la fin de la guerre qui a justifié son entreprise. Sur la suggestion de VON NEUMMANN, qui est consultant à la fois à Los Alamos et à la *Moore School*, on lui fait effectuer des calculs liés à la gestation de la future bombe à hydrogène, en particulier le modèle mathématique de l'explosion. Le programme démarre en novembre 1945 et en décembre 1945, à l'issue du traitement, révèle de nombreuses insuffisances dans les plans initiaux de la bombe H.

L'existence du calculateur est tenue secrète encore plusieurs mois après la fin du conflit. Puis l'inauguration officielle a lieu à l'université de Pennsylvanie, le 15 février 1946 : le calculateur calcule en vingt secondes la rajectoire d'un projectile qui met trente secondes pour parvenir à son objectif. La révélation tapageuse du calculateur électronique frappe l'imagination, aux États-Unis et en Europe. Le mythe du « cerveau électronique » va naître.

Déménagement

Dans le courant de 1946, l'armée, propriétaire de l'ENIAC, décide qu'il est temps de le transférer à Aberdeen. Le 30 juin, après la remise d'un *Manuel d'utilisation et d'entretien* en cinq volumes, rédigé par Adele GOLDSTINE et Harry HUSKEY, l'Armée réceptionne l'ENIAC et donne quitus à l'université de Pennsylvanie pour son contrat « Projet PX ». Le transfert est cependant retardé parce que les locaux nécessaires à Aberdeen ne sont pas prêts. L'ENIAC n'est déconnecté que le 9 novembre 1946. La *Moore School* doit faire abattre un pan de mur de ses locaux pour faciliter le déménagement des éléments. Le transport Philadelphie-Aberdeen, environ 125 kilomètres, se fait par convoi de camions. Ce déménagement coûte 100 000 dollars. Alors que le remontage commence, des modifications sont demandées à la *Moore School*, et l'ENIAC n'est remis sous tension que le 29 juillet 1947.

Les équipes de programmeurs formés par Adele GOLDSTINE suivent le calculateur dans le Maryland. L'ENIAC est utilisé pour la résolution d'équations différentielles, pour le calcul de pi à la millième décimale, pour des calculs balistiques, pour la conception de projectiles atomiques tactiques, pour les calculs nécesaires à la mise au point de la bombe à hydrogène, pour des recherches sur les rayons cosmiques, pour la réalisation de tunnels de souffleries supersoniques, etc.

La fin

L'ENIAC est retiré du service actif le 2 octobre 1955, à 23 h 45. Son démontage commence le lendemain matin. BURKS récupère quatre unités (deux accumulateurs et une partie du multiplicateur et du programmeur central) qui sont exposés à l'université du Michigan. Une plaque commémorative est apposée à l'entrée de la *Moore School*. La plus grande partie de calculateur est attribuée à la *Smithsonian Institution*, Washington DC, où elle est exposée en bonne place.

Divulgation

L'ENIAC, jusque-là tenu secret pour des raisons militaires, est présenté au public en 1946. Le 14 février 1946 le *New York Times* annonce l'inauguration d'« *une machine amusante qui applique la vitesse électronique pour la première fois à des tâches mathématiques jusqu'à présent trop difficiles et trop encombrantes pour obtenir une solution* ».

L'été 1946 une audience d'experts participe à une conférence à la *Moore School* sur le calcul. Le *National Bureau of Standards* est suffisamment convaincu pour commencer à construire ses propres calculateurs et le projet *Whirlwind* du *Massachusetts Institute of Technology* change de la technologie analogique à la technologie numérique.

4.6 Bibliographie

[Ata-40] Atanasoff, John V., **Computing machine for the solution of large systems of linear algebraic equations**, Iowa State College, Août 1940, non publié. Publié dans [Ran-82], pp. 315–335.

[Aug-84] Augarten, Stan, **Bit by bit : an illustrated history of computers**, Ticknor & Fields, New-York, 1984, IX + 324 p., ISBN 0-89919-268-8.

[Bow-53] Bowden, B. V., **Faster than thought : a symposium on digital computing machines**, Pitman, London, 1953, XIX + 416 p.

[Bus-31] Bush, V., *The Differential Analyser : A New Machine for Solving Differential Equations*, **Journal of the Franklin Institute**, vol. 212, 1931, pp. 447–488.

[Bus-36] Bush, V., *Instrumental Analysis*, **Bulletin of the American Mathematical Society**, vol. 42, 1936, pp. 649–669. Version électronique disponible sur :

`http://projecteuclid.org/DPubS?service=UI&version=1.0&verb=Display&handle=euclid.bams/1183499313`

[Dum-78] Dummer, G. W. A., **Electronic Inventions and Discoveries**, 2nd ed., Oxford University Press, 1978.

[Fle-05] Fleming, **Instrument for converting alternating currents into continuous currents**, British Patent, No. 803,684, 7 November, 1905, 7 p. Téléchargeable sur *GoogleBooks*.

[For-13] De Forest, *The audion detector and amplifier*, **Electrician**, Vol. LXXII, p. 285 (1913).

[Lig-87] Ligonnière, Robert, **Préhistoire et histoire des ordinateurs**, Robert Laffont, 1987, 356 p.

[Mau-42] Mauchly, John, **The use of high speed vacuum tube devices for calculating**, privately circulated memorandum, Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, August 1942. Publié dans [Ran-82], pp. 355–358.

[Mor-40] Morse, Samuel, *Improvement in the mode of communicating information by signals by the application of electro-magnetism*, United States Patent 1 647, June 20, 1840. Diverses version électroniques, par exemple :

`http://inventors.about.com/od/mstartinventors/ig/Samuel-Morse---Patent/`

[Ran-82] Randell, Brian, **The origins of Digital Computers**, Springer, 1984.

[Ric-16] Richardson, Owen W., **The emission of Electricity from Hot Bodies**, Longmans, 1916. Disponible en téléchargement :

`http://www.archive.org/details/emissionofelectr031395mbp`

[Ric-29] Richardson, Owen W., *Thermionic phenomena and the laws which govern them*, Nobel Lecture, December 12, 1929. Disponible en ligne :

`http://www.nobel.se/physics/laureates/1928/richardson-lecture.pdf`

[TI-73] Texas Instruments (The Engineering Staff of), **The TTL Data Book for Design Engineers**, Texas Instruments, 1973, 640 p.