Chapitre 8

Enregistrement des programmes à rupture de séquence

Nous avons vu comment mettre en œuvre, à la main, un programme sur un calculateur électro-mécanique ou électronique grâce à un pupitre de commande. Une première amélioration a été apportée à ce modèle de calculateur en prévoyant la mise en place d'un programme en dur, ce qui évite d'indiquer à la main à chaque fois la suite d'instructions à effectuer. Puis nous avons vu, dans le chapitre précédent, comment enregistrer un premier type de programmes : les suites d'instructions élémentaires.

Nous allons voir maintenant ce qu'il en est des ruptures de séquence, dont nous avons vu toute l'importance lors de la modélisation des ordinateurs.

8.1 Codage et décodage des ruptures de s'équence

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment enregistrer un programme simple et comment le faire exécuter. Cependant les programmes simples ne permettent pas de calculer toutes les fonctions calculables. Nous avons vu l'intérêt des ruptures de séquence pour pouvoir calculer plus de fonctions. Nous avons même vu que, en fait, cela suffit pour obtenir toutes les fonctions calculables possibles. Il faut donc maintenant mettre en place la rupture de séquence pour les programmes enregistrés.

8.1.1 Codage de la rupture de séquence

Le plus difficile n'est évidemment pas le codage de la rupture de séquence : il suffit d'ajouter un nouveau type d'instructions.

Langage symbolique.- On ajoute un dixième type d'instructions : la rupture de séquence, indiquée sur la dernière ligne du tableau suivant.

Représentation	Signification	Explication du mnémonyme
ENT n	A := e_n	ENTrée
SOR n	s_n := A	SORtie
CHA n	A := r_n	CHArger
CHC n	A := $\overline{r_n}$	CHarger Complémentaire
RNG n	r_n := A	RaNGer
ZER	A := 0	ZÉRo
UNI	A := 1	UNIté
ADD n	A := A + r_n	ADDition
STO		STOP
RDS n	SI A = 0 ALORS q_n	Rupture De Séquence

Langage machine.- Le code opération de la rupture de séquence est, par exemple, spécifié par la dixième ligne du tableau suivant :

Mnémonyme	Opcode
ENT	0000
SOR	0001
CHA	0010
CHC	0011
RNG	0100
ZER	0101
UNI	0110
ADD	0111
STO	1000
RDS	1001

8.1.2 Décodage des ruptures de séquence

Pour permettre l'exécution des ruptures de séquence, on change légèrement la matrice de décodage des instructions vue lors du décodage des instructions primitives.

Nouvelle matrice de décodage.- Elle aura maintenant une entrée en plus (positive si l'accumulateur contient 0, nulle sinon) et $n + 2$ sorties de plus, notées `I1`, ..., `Im`, `AH` (cette dernière pour *Arrêt de l'Horloge*) et `I` (pour *Incrémentation*). Chaque entrée permet maintenant 3 sorties au plus (au lieu de 2) :

— Dans le cas des instructions primitives sauf l'instruction STOP, on a les sorties déjà vues pour les deux premières possibles et, de plus, la sortie `I` est à un.

— Dans le cas de l'instruction STOP, la seule sortie positive est `AH`.

— Dans le cas d'une rupture de séquence (`SI A = 0 ALLER_A` i_k) :

  — si le contenu de l'accumulateur est non nul, la seule sortie à un est `I` ;

  — sinon la seule sortie à un est `Ik`.

Action des nouvelles sorties.- La sortie `I` est reliée à l'incrémentation du PC. Si `I` est nul, l'état des sorties `I1`, ..., `Ip` place une nouvelle adresse dans le PC. Ainsi, dans tous les cas, au top suivant on trouve bien l'adresse désirée dans le PC.

La sortie `AH` déconnecte l'horloge et donc aucun top suivant n'arrivera dans le PC.

8.1.3 Déroulement d'un programme

On voit comment utiliser la machine que nous avons décrite :

1. On place le programme dans les registres d'instruction (par exemple du type registres à interrupteur).
2. On place les données dans les registres d'entrée (à interrupteurs également, par exemple).
3. On initialise le PC à un (grâce à un bouton spécial par exemple, qui peut aussi être déclenché à l'étape 4).
4. On appuie sur un bouton DÉPART (dont le rôle est de connecter l'horloge et donc d'envoyer des tops).
5. Le programme se déroule alors, comme nous l'avons vu, et s'il ne boucle pas (indéfiniment) il arrivera à un certain moment sur une instruction STOP, qui a pour effet de déconnecter l'horloge, d'une part, et d'autre part de faire clignoter une ampoule pour indiquer à l'utilisateur la fin du programme.
6. On peut alors aller chercher les résultats dans les registres de sortie (du type à ampoules, par exemple).

8.2 Historique

8.2.1 Notion de programme enregistré avec rupture de séquence (1945)

Le concept de programme séquentiel enregistré est dû à Eckert et Mauchly et celui de programme (Turing-complet) enregistré à von Neumann. Le fait que, d'une part, les concepts ne soient pas complètement séparés de la technologie à cette époque et une maladresse de Goldstine, d'autre part, rendent l'histoire un peu compliquée.

En 1944 John von Neumann, mathématicien déjà célèbre depuis longtemps, est consultant à Los Alamos et au BRL et professeur à l'*Institute of Advanced Study* de Princeton, dans le New Jersey. En tant que consultant à Los Alamos, von Neumann joue un rôle central dans le développement de la bombe atomique : il trouve comment modéliser mathématiquement une implosion et comment résoudre numériquement les équations en résultant, avec l'aide des perforateurs et des trieurs de cartes d'IBM.

En janvier 1944, von Neumann écrit à l'*Office of Scientific Research and Development* (OSRD) pour obtenir des informations sur les ressources en calculs du pays. L'OSRD est dirigé par Vannevar Bush et, bien qu'il connaisse tout sur l'ENIAC, l'agence lui répond en lui parlant de Aiken à Harvard, de Stibitz aux *Bell Labs* et de Wallace Eckert (sans lien avec le Eckert de la *Moore School*) au centre de calcul IBM à l'université de Columbia. Aucune de ces ressources ne peut lui être utile : la machine de Columbia est reliée à des tabulateurs de cartes perforées, la machine de Aiken est en construction et le *Complex Number Computer* de Stibitz ne peut travailler qu'avec des nombres complexes.

En dépit de ses relations avec le BRL, von Neumann n'apprend l'existence de l'ENIAC et de l'EDVAC que par hasard. Un jour d'août 1944, Goldstine attend le train à la gare d'Aberdeen pour retourner à Philadelphie :

> *lorsque vint von Neumann. Je n'avais jamais rencontré ce grand mathématicien avant cela mais j'en savais beaucoup sur lui bien sûr et je l'avais entendu en cours à plusieurs occasions. Ce fut avec beaucoup de témérité que j'approchais ce personnage célèbre dans le monde entier, je me présentais et une conversation commença. Heureusement pour moi, von Neumann était une personne chaleureuse et amicale qui faisait de son mieux pour que les gens se sentent bien en sa présence. La conversation tourna rapidement vers mon travail. Lorsqu'il devint clair pour von Neumann que j'étais concerné par le développement d'un calculateur électronique capable d'effectuer 333 multiplications par seconde, l'atmosphère de notre conversation changea d'une bonne humeur à quelque chose qui ressemblait à la soutenance orale d'un doctorat en mathématiques.*
>
> [Gol-72], p. 182

Goldstine invite von Neumann à venir voir l'ENIAC, alors en construction. Au cours de la visite que von Neumann effectue à la *Moore School*, le 7 septembre 1944, Eckert et Mauchly lui décrivent le projet de l'EDVAC :

> *Nous commençâmes par nos idées fondamentales : il y aura un seul dispositif de stockage (avec des emplacements adressables) pour tout l'EDVAC, qui contiendra à la fois les données et les instructions. Toutes les opérations arithmétiques nécessaires seront effectuées dans une seule unité arithmétique (contrairement à l'ENIAC). Bien sûr, il y aura des dispositifs pour les entrées et les sorties et ils seront pilotés par le module de contrôle tout comme les autres modules.*
>
> [von Neumann est fasciné par le travail de la *Moore School*.] *Comme un enfant avec un nouveau jouet, il ne pouvait pas rester en place.*

[Mau-79], p. 217

La *Moore School* invite VON NEUMANN à se joindre au projet EDVAC, l'adjonction d'un tel mathématicien pouvant donner un air de respectabilité à celui-ci à un moment où il connaît beaucoup de détracteurs (BUSH au MIT, AIKEN à Harvard et STIBITZ aux *Bell Labs*).

VON NEUMANN aide ECKERT, MAUCHLY et les autres ingénieurs de la *Moore School* à affiner leurs idées. Au printemps 1945, il propose d'écrire une analyse de la conception logique de l'EDVAC, résumant les idées de l'équipe et en y apportant ses propres lumières. Cette idée est bien accueillie. VON NEUMANN écrit une ébauche de 101 pages qu'il envoie à GOLDSTINE en juin. C'est un rapport préliminaire, contenant de nombreux blancs pour y placer les noms, les références croisées et les autres informations que VON NEUMANN a l'intention d'insérer lorsque ses collègues du projet EDVAC auront lu l'article et l'auront commenté.

C'est une analyse lucide et de main de maître de la structure et des opérations d'un calculateur : VON NEUMANN recommande la construction d'un calculateur fondé sur une unité de contrôle centrale qui doit orchestrer toutes les opérations, une unité processeur centrale qui doit piloter toutes les opérations arithmétiques et logiques et une mémoire à accès aléatoire en entrée et sortie qui doit stocker les programmes et les données de façon à ce que toute information soit entrée ou retirée directement (et non séquentiellement). Il recommende l'utilisation de la base deux et de l'algèbre de Boole.

Sans le porter à la connaissance d'ECKERT et de MAUCHLY, GOLDSTINE met une couverture sur le rapport de VON NEUMANN, en les indiquant tous les deux comme seuls auteurs, et le distribue sous le titre *First Draft of a Report on the EDVAC* [Von-45]. Trente-deux personnes de et hors de la *Moore School* sont destinaires du premier envoi et beaucoup d'autres en reçoivent des copies plus tard. L'acte de GOLDSTINE est assez incompréhensible mais, du coup, VON NEUMANN est alors considéré comme l'inventeur, et le seul inventeur, du calculateur à programme enregistré.

Les dissensions qui s'en suivent reportent à 1952 (sept ans plus tard !) la fin de la construction de l'EDVAC.

8.2.2 Construction du premier ordinateur (Angleterre, 1948)

von Neumann, respectant les habitudes et l'éthique scientifique, choisit de faire circuler le plus possible les plans de l'EDVAC. Il organise donc de nombreuses conférences dans lesquelles sont discutés les principes de l'ordinateur, devant des publics essentiellement composés, pour des raisons de sécurité (c'est le début de la guerre froide) de chercheurs américains, mais aussi anglais, l'Angleterre étant considérée comme un allié sûr. En particulier, l'*Army Ordnance Department* et l'*Office of Naval Research* sponsorisent une université d'été à la *Moore School* en 1946. Vingt institutions y participent : principalement des entreprises, des universités et des agences gouvernementales américaines mais aussi des alliés dont la Grande-Bretagne.

L'Angleterre de l'après-guerre est exsangue financièrement mais ses dirigeants veulent la doter rapidement d'un programme nucléaire militaire. Il faut donc être à la pointe du progrès en matière de grands calculateurs.

Outre Turing, un certain nombre de chercheurs anglais, mathématiciens pour la plupart, séjournent dans les universités américaines où l'on construit les derniers grands calculateurs. Trois d'entre eux, Womerseley, Wilkes et Newman, sont à l'origine des trois grands projets anglais. Deux d'entre eux voient véritablement le jour, dont le premier ordinateur au monde.

8.2.2.1 L'échec du projet ACE (1946)

John Ronald Womersley, membre du *National Physical Laboratory* (NPL), la plus grande agence de recherche anglaise, est convié très tôt, dès mars 1944, à venir voir l'ENIAC et le Harvard MARK 1. Il a accès, un peu plus tard, à une copie du rapport sur l'EDVAC de von Neumann, qu'il lui est permis de ramener en Angleterre.

De retour des États-Unis, et enthousiasmé par ce qu'il a vu, Womersley propose immédiatement à Turing de dresser les plans d'un ordinateur anglais, entièrement électronique. Ils connaissent bien les performances de cette technologie grâce à l'expérience des machines *Colossus*.

Turing conçoit les plans d'une machine extrêmement originale, mais assez complexe et coûteuse à réaliser, qui doit s'appeler **ACE** (pour *Automatic Computing Engine*, le dernier mot faisant référence à la machine de Babbage). Sur le plan technologique, elle doit avoir une mémoire de 204 000 bits et une cadence d'un million de pulsations par seconde, cinq fois plus que l'ENIAC. Sur le plan des principes de base, il s'agit d'un ordinateur du type EDVAC mais Turing, qui a le souci de l'innovation, veut que non seulement la machine dispose d'un programme enregistré mais qu'elle puisse également modifier en cours de traitement ses propres instructions.

Le projet ACE est annoncé avec beaucoup de publicité dans la presse. Le 7 novembre 1946, le *Daily Telegraph* écrit que les Anglais ont réalisé un « cerveau radio » (*radio brain*, en référence aux tubes à vide qui servent aussi dans les postes de radio) « *supérieur aux modèles américains* ».

Malheureusement, la machine est victime de l'indécision et de l'incompréhension de ses financeurs du Laboratoire national de physique, et seule une version à beaucoup plus petite échelle est construite sous le nom de **ACE pilot**, terminée en mai 1950, sans la participation de Turing qui a rejoint entretemps Max Newman à l'université de Manchester.

8.2.2.2 Le premier prototype (Mark 1 de Manchester, 1948)

Max Newman, professeur de mathématiques à l'université de Manchester, est assez familiarisé avec les travaux américains et est le premier lecteur, en 1936, de l'article de Turing puisqu'il est son directeur de thèse. Il a réalisé avec ce dernier la série de machines *Colossus*, qui ont servi à décrypter certains codes secrets utilisés par les Allemands pendant la Seconde Guerre mondiale (voir [Cop-06]).

Max Newman prend la direction de la conception d'une machine à l'université de Manchester, appelée **Mark 1**, mi 1946, soutenu par la *Royal Society*. Turing rejoint le projet en cours de réalisation. Le prototype est opérationnel en juin 1948. *Il s'agit du premier ordinateur à avoir jamais fonctionné dans le monde.*

Sa mémoire interne est conçue par F. C. Williams, ingénieur en chef du projet, à partir d'une technologie déjà utilisée pour générer les images de télévision et les images des écrans radars : les tubes à rayons cathodiques (CRT pour l'anglais *Cathode Ray Tube*). Les bits sont conservés sous forme de points (des impulsions chargées positivement ou négativement) visibles sur l'écran.

Dans l'architecture de la machine, un CRT spécial permet de visualiser le contenu des six autres mémoires CRT. Il s'agit de la première visualisation sur l'écran des données contenues en mémoire. L'avantage de cette technologie est qu'elle est à la fois disponible (grâce aux développement des radars), peu coûteuse, rapide et de dimension réduite. Chaque écran peut contenir 1 024 ou 2 048 bits. Mais elle a des inconvénients : de temps à autre une impulsion se perd ou se transforme ; les informations ne sont donc pas tout à fait fiables.

Turing conçoit, pour aider les *codeurs* (*coder* en anglais, *programmeurs* plus tard), un manuel comportant une sorte de code sténographique pour écrire les programmes, utilisant les touches d'un télétype : TC, par exemple, correspond à la suite de 0 et de 1 pour l'instruction d'addition.

8.2.2.3 Le premier ordinateur opérationnel (EDSAC, 1949)

Le deuxième ordinateur à être opérationnel, anglais également, est construit à l'université de Cambridge par Maurice WILKES mais, contrairement au Mark 1 de Manchester, il ne s'agit pas d'un prototype mais de la version finale.

Le professeur Maurice WILKES, directeur du laboratoire de calcul de l'université de Cambridge, suit, au cours de l'été 1946, les cours de la *Moore School* et connaît bien le rapport de VON NEUMANN.

Il construit un ordinateur, achevé en juin 1949, dénommé **EDSAC** (pour *Electronic Delay Storage Automatic Computer*, soit calculateur électronique automatique à mémoire à retard).

Comme son nom l'indique, la machine a une mémoire composée de lignes de mercure à retard (*mercury delay lines* en anglais), ou lignes à retard à ultrasons, inventés par ECKERT, comme nous l'avons vu. Les impulsions électroniques y circulent de la même façon qu'un écho dans un canyon, à cette différence près que, là où l'écho s'atténue avec le temps, un dispositif réactive ici l'impulsion régulièrement, lui permettant de se maintenir dans l'état initial. Elle comporte 4 000 tubes électroniques ; sa mémoire est constituée de 32 lignes à retard, chacune pouvant contenir 32 entiers de 17 chiffres décimaux.

Nous avons vu comment cet ordinateur est décrit dans [WR-50] dans le chapitre précédent puisqu'il s'agit également de la première description d'un calculateur à programme enregistré. Les changements pour la rupture de séquence sont minimes :

> *Jeu d'ordres de l'EDSAC*
>
> [...]
>
> *E n* *Si le nombre dans l'accumulateur est plus grand au sens large que zéro, exécuter la fois suivante l'ordre qui se trouve à l'emplacement n ; sinon procéder séquentiellement.*
>
> *G n* *Si le nombre dans l'accumulateur est plus petit au sens large que zéro, exécuter la fois suivante l'ordre qui se trouve à l'emplacement n ; sinon procéder séquentiellement.*
>
> [...]
>
> *La suite de contrôle*
>
> *Lorsque la machine est en fonction, les ordres sont exécutés automatiquement dans l'ordre dans lequel ils sont rangés dans la mémoire. La seule exception est lorsqu'un ordre conditionnel (E ou G) est rencontré et que la condition est satisfaite ; l'ordre suivant à exécuter est alors celui qui se trouve dans l'emplacement mémoire spécifié dans l'ordre conditionnel.*
>
> [...] *Lors d'un ordre conditionnel (lorsque la condition est satisfaite) on n'ajoute pas une unité* (au conteneur de contrôle de suite) *; à la place, le nombre du conteneur est remplacé par la partie numérique de l'ordre conditionnel.*
>
> [...] *Par exemple, durant l'étape II pour un ordre conditionnel, le conteneur d'ordre est relié au conteneur de contrôle de séquence à travers la porte montrée dans le diagramme et l'ordre en son entier est transferré d'un conteneur à l'autre. Lorsqu'il est dans le conteneur de contrôle de séquence, seule la partie numérique est utilisée, la partie fonctionnelle n'ayant pas d'intérêt.*
>
> [WR-50]

8.2.3 Le déploiement des ordinateurs

Nous venons de voir que le premier ordinateur a été réalisé en Angleterre en 1948. Très rapidement d'autres ordinateurs vont suivre.

8.2.3.1 Les premiers ordinateurs américains (1949)

Le BINAC (1949)

MAUCHLY revendique l'héritage de l'EDVAC en publiant à Harvard, en janvier 1947, un article intitulé *Préparation des problèmes pour les machines de type EDVAC* [Mau-47], dans lequel il insiste sur l'originalité de la conception de cette lignée de machines. Il y développe les points forts qui ont été mis en évidence dans le texte de VON NEUMANN : la nécessité d'une mémoire interne très étendue, le fait d'avoir à la fois un petit nombre d'instructions et d'opérations élémentaires, le fait de stocker en mémoire à la fois les instructions et les données. Le BINAC, puis le futur UNIVAC, s'inscrivent dans la droite ligne de ces principes.

L'une des étapes vers la construction de l'UNIVAC, par W. ECKERT et J. MAUCHLY, est la mise au point du **BINAC** (pour *BINary Automatic Computer*), financé par la *Northrop Aircraft Company* dont les dirigeants étaient intéressés par la notion de navigation assistée par ordinateur.

Cette machine est quatre fois plus rapide que son homologue anglais, l'EDSAC, et de plus petite taille que l'ENIAC. Elle contient 700 tubes électroniques et si chaque unité n'effectue que 3 500 additions par seconde (alors que l'ENIAC en effectue 5 000), elle effectue 1 000 multiplications par seconde (pour 333 seulement pour l'ENIAC). Elle possède une mémoire à ligne de retard de mercure d'une capacité de 512 mots de 31 bits. Cette machine est composée de deux processeurs identiques, qui effectent les opérations en parallèle et compare en permanence leurs résultats. Un écart entre les deux séries d'opérations entraîne l'arrêt du dispositif.

La première démonstration du BINAC a lieu en avril 1949 ; il fonctionne alors pendant 44 heures sans panne. La machine n'a cependant jamais bien fonctionné et certaines mauvaises langues prétendaient qu'elle fonctionnait quand il faisait beau, mais pas du tout les jours de pluie.

L'EDVAC (1951)

Après que le rapport de VON NEUMANN ait rendu célèbre le nom de l'EDVAC, il ne se trouva plus personne parmi ses concepteurs pour le réaliser. VON NEUMANN implante son propre projet à Princeton tandis qu'ECKERT et MAUCHLY quittent la *Moore School* pour se lancer dans la grande aventure industrielle.

L'EDVAC trouve néanmoins une équipe à la *Moore School* qui termine sa réalisation en 1951. Il devait fonctionner correctement puisqu'il resta en service jusqu'en décembre 1962.

L'IAS (1952)

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment VON NEUMANN conçut le projet IAS, opérationnel en 1952, qui inspire l'IBM 701, l'**ILLIAC** (*ILLInois Automatic Computer*) à l'université de l'Illinois à Urbana, le **JOHNIAC** (faisant référence au prénom de VON NEUMANN) construit par la Rand Corporation à Santa Monica en Californie et le **MANIAC** (*Mathematical Analyser, Numerator, Integrator, And Computer*) à Los Alamos.

8.2.3.2 La production en série (1951)

Jusqu'en 1951 les ordinateurs sont conçus et construits dans des universités, à un exemplaire unique, avec des financements militaires. À partir de 1951, les ordinateurs sont produits en plusieurs exemplaires, soit pour répondre à des projets militaires exigeant l'utilisation de plusieurs ordinateurs (le projet SAGE en particulier), soit pour une production commerciale.

UNIVAC 1 (1951)

Les concepteurs de l'ENIAC et de l'EDVAC, Eckert et Mauchly, croient au succès commercial des ordinateurs et, avant même la fin de la construction de l'EDVAC, quittent la *Moore School* pour se lancer dans les affaires.

Ils rencontrent un grand nombre de difficultés : conflits avec les membres les plus éminents de la communauté des constructeurs d'ordinateurs, banqueroutes, rachats de leur compagnie, difficultés techniques de mise au point, modèles intermédiaires fonctionnant mal, jusqu'aux ennuis de Mauchly avec la Commission des affaires antiaméricaines (chargée d'enquêter dans les années cinquante sur les « *atteintes à la sûreté de l'État* »). Mais, à force de volonté et d'acharnement, l'**UNIVAC 1** (*UNIVersal Automatic Computer*), destiné au marché civil, voit le jour en 1951.

Le bureau du recensement (*Census Bureau*) soutient largement le projet, d'une part à cause de ses besoins en matière de calcul, d'autre part grâce à sa tradition moderniste de soutien de la technologie depuis Hollerith.

Il s'agit d'un système complet avec des imprimantes à grande vitesse et des lecteurs de bandes magnétiques comme mémoire externe. C'est un ordinateur électronique basé sur le système décimal, donc occupant un certain volume (le processeur central est dix fois plus grand que celui de l'IAS, qui est binaire), et comprend 5 000 tubes électroniques. Son rythme de pulsation interne est de 2 250 000 états par seconde et il est capable d'additionner deux nombres de douze chiffres en 120 microsecondes (contre 200 microsecondes pour l'ENIAC).

Sa mémoire en est l'élément le plus remarquable : 12 000 chiffres ou caractères alphabétiques dans des lignes à retard et des millions sur bande magnétique. L'UNIVAC 1 peut activer 10 de ces bandes à la fois, ce qui convient parfaitement pour des usages de gestion.

En mars 1951, le premier UNIVAC est livré au *Census Bureau*. L'industrie en achètera 46. La chaîne de télévision CBS-TV utilise trois UNIVAC en 1952 pour prévoir le résultat des élections présidentielles et la victoire d'Eisenhower. Le programme est écrit en tenant compte des résultats des élections de 1944 et de 1948. À vingt et une heures, l'UNIVAC donne Eisenhower gagnant dans 43 états sur 48, avec une écrasante majorité des voix des « grands électeurs » (438 sur 532). Comme les prévisions donnent les deux candidats très proches l'un de l'autre, le programmeur croit qu'il y a une erreur et refait faire tous les calculs, perdant ainsi le bénéfice de la rapidité de prévision que l'ordinateur a permis. Les prévisions calculées en premier étaient justes et « Ike » l'emporte avec 442 voix de « grands électeurs ». Le commentateur de la CBS, Edward R. Murrow, fait alors la remarque suivante : « *L'ennui avec les machines, ce sont les hommes* ». Le succès de l'UNIVAC sert à convaincre que l'informatique civile constitue un marché bien réel.

Whirlwind (1951)

Le **Whirlwind** est construit entre 1946 et 1951 au Laboratoire de servomécanisme du MIT (*Massachusetts Intitute of Technologie*), grâce à un contrat du *Navy's Special Devices Center*, par une équipe dirigée par Jay FORRESTER.

Le projet est conçu en octobre 1944. À l'origine cette machine doit être une des pièces maîtresses d'un simulateur de vol et en même temps d'une machine destinée à tester des modèles aérodynamiques. Les simulateurs de vol d'alors ne sont guère performants et surtout, à chaque avion nouveau, il faut construire un nouveau simulateur.

La technologie développée doit permettre une quasi-simultanéïté des réponses du simulateur aux commandes données par le pilote, ce qu'on appellera plus tard réagir en **temps réel**. Il est prévu au départ d'utiliser une machine de type analogique mais FORRESTER découvre, fin 1945, l'ENIAC et le projet de l'EDVAC, qui promettent des temps de réponse plus courts.

Le laboratoire de FORRESTER devient le DCL (*Digital Computer Laboratory*). Les plans de ce nouvel ordinateur sont prêts en 1947. En 1948, l'ONR (*Office of Naval Research*) prend en charge le projet sous le nom de *Whirlwind* (*tourbillon* en anglais).

Le *Whirlwind* est au départ un calculateur dédié à une seule application mais ses développements ultérieurs en font un ordinateur, sur lequel plusieurs innovations d'importance sont effectuées (en particulier l'utilisation de mémoires à tores de ferrite, inventées par FORRESTER). En fait la machine peut servir aussi bien au contrôle de tir qu'à la poursuite radar ou à la commande numérique de machines-outils.

Cette machine contient 5 000 tubes électroniques et 11 000 diodes et multiplie deux nombres de 16 bits en 16 microsecondes. Elle se présente comme un énorme engin dont les différents éléments se répartissent dans une immense pièce comme les rayonnages d'une bibliothèque entre lesquels on peut circuler assez aisément. Au fond du corridor central, une grande salle de commande permet de diriger l'ensemble. Il s'agit de l'ordinateur le plus rapide du début des années cinquante. Il s'agit aussi du premier ordinateur utilisant des mots de 16 bits, qui constitue un des standards ultérieurs en la matière.

La mémoire consiste au début en 32 CRT. L'usage de ces tubes électroniques devient cependant rapidement un problème majeur dans un contexte où la machine doit être fiable en permanence, compte tenu de son usage militaire. Aussi sont-ils remplacés par une invention de FORRESTER, les tores magnétiques (dont nous avons parlé à propos de la mémoire), l'été 1953. Du coup, là où le temps de maintenance (pour l'entretien et les réparations) était de plusieurs heures par jour avec les tubes, il n'est plus que de deux heures par semaine, pour une vitesse d'opération qui a pu être doublée.

Le *Whirlwind* est construit en série pour constituer la base du système de défense aérienne des États-Unis, le système **SAGE** (*Semi-Automatic Ground Environment System*). Sa version pour le système SAGE s'appelle AN/FSQ 7 et 8.

Ferranti en Angleterre (1951) : le premier ordinateur commercial

Suite au succès du prototype Mark 1 de Manchester, le gouvernement britannique, voulant un ordinateur pour son projet de bombe atomique, demande à *Ferranti Ltd*, entreprise d'armes et d'électronique de Manchester, de construire un ordinateur fondé sur ce prototype. *Ferranti* commence à travailler en 1949 et le premier ordinateur commercial au monde, le **Ferranti Mark 1**, est installé dans le nouveau centre de calcul de Manchester en février 1951.

Aidé par le gouvernement britannique, *Ferranti* vend huit Mark 1 en quelques années. L'université de Toronto, voulant un ordinateur pour l'aider dans l'aménagement du canal Saint-Laurent, est le premier client de Ferranti. Plusieurs ordinateurs sont vendus au *British Atomic Weapons Research Establishment* et à d'autres agences gouvernementales.

Le réseau de défense continentale SAGE (1951)

La première raison pour faire passer la production du niveau artisanal (à un exemplaire à chaque fois) à la production industrielle est, encore une fois, liée à des raisons militaires.

Guerre froide

En août 1949, les Soviétiques font exploser une bombe atomique expérimentale. La situation entre les deux blocs, américain d'un côté, soviétique de l'autre, se tend immédiatement et le monde entre dans ce qui sera appelé la « *guerre froide* ». Pendant un demi-siècle, chacun des deux blocs vit dans l'angoisse d'une attaque nucléaire imminente de la part de l'autre.

En septembre 1949, le président américain Truman est informé du fait que les Soviétiques disposent d'une flotte de bombardiers à long rayon d'action, capable de traverser le pôle Nord et de venir lâcher des bombes atomiques sur les principales villes et installations stratégiques américaines. Les États-Unis n'ont pas oublier la rude leçon de Pearl Harbour où, en l'absence d'un réseau d'alerte suffisant, toute une flotte de navires de guerre a été anéantie par les Japonais. Or le système de défense antiaérienne est assez sommaire et très peu développé, de surcroît, sur les frontières nord. Des radars isolés permettent certes de visualiser d'éventuels avions ennemis, mais leur temps de réaction est très long et ils détectent mal les avions volant à basse altitude. Si un avion ennemi est malgré tout repéré, il faut encore prévenir le contrôle aérien qui envoie des chasseurs intercepter leur cible... s'ils la trouvent dans le vaste ciel.

L'*US Air Force* confie à un comité, nommé *Air Defense System Engineering Committee*, le soin d'étudier un système de défense antiaérien adapté à la nouvelle situation. Le rapport du Comité, rendu en octobre 1950, conclut, d'une part, à la nécessité de renforcer considérablement les batteries de défense déjà en place et, d'autre part, de développer en Amérique du Nord (Canada inclus) un réseau de défense automatisé grâce à des ordinateurs. Ce projet est très onéreux mais la défense des États-Unis n'a pas de prix.

SAGE

Le système **SAGE** (*Semi-Automatic Ground Environment*) est un dispositif complexe dont le centre nerveux est constitué d'ordinateurs qui scrutent et analysent l'environnement grâce à des radars, qui organisent et commandent la riposte en dirigeant les chasseurs vers leur cible.

En décembre 1950, à peine quelques semaines après le rapport de la commission, l'Air Force demande au MIT, qui développe alors le *Whirlwind*, seul ordinateur qui fonctionne en temps réel, de créer un centre de recherche pour établir les plans d'un tel réseau de défense. Le MIT disposera d'autant de crédits que nécessaire.

Le 20 avril 1951, un premier test a lieu avec un avion qui fait inopinément irruption dans le ciel du Massachusetts. Repéré par un radar d'alerte, il apparaît sous la forme d'un point brillant sur les écrans du *Whirlwind*, avec la mention « T », pour *Target* (cible). Un avion intercepteur, dont le point sur le radar est accompagné d'un « F », pour *Fighter* (intercepteur), est alors dirigé vers la cible. L'ordinateur calcule la trajectoire d'interception à partir de la position des deux avions et guide automatiquement l'intercepteur sur la cible, malgré les changements de direction de celle-ci. Les trois essais du jour sont parfaitement réussis. Lors des essais suivants, l'ordinateur du MIT gère le vol de 48 avions simultanément.

De nombreuses innovations sont réalisées dans le cadre de la mise au point du système SAGE. Chaque ordinateur est relié à une centaine d'opérateurs disposant de consoles de visualisation, de claviers ou de dispositifs d'entrée-sortie à cartes perforées. L'équivalent du **crayon optique** est inventé pour l'occasion. Les ordinateurs sont reliés entre eux par des lignes téléphoniques.

Le réseau SAGE s'intègre dans un plan de défense général où l'Amérique du Nord est divisée en vingt-trois secteurs aériens. Chaque secteur a un centre de coordination à l'épreuve des bombes où un *Whirlwind*, entre-temps devenu AN/FSQ7, doit traiter toutes les informations nécessaires. Chaque centre est un véritable blockhaus fermé, doté de ses propres installations de repos et muni de l'air conditionné et de ses propres générateurs électriques.

Pour des raisons de sécurité, il ne faut pas qu'une quelconque panne puisse rendre le système aveugle ou muet. Chaque centre dispose donc de deux ordinateurs, l'un toujours prêt à prendre la relève de l'autre en cas de défaillance. En plus de ces vingt-trois secteurs, trois centres de coordination existent à l'échelon du pays, plus un centre d'essai, le *Lincoln Laboratory*, où s'effectuent les recherches.

Fin 1952, le *Lincoln Laboratory* s'adresse à IBM pour mettre en chantier la production en série des ordinateurs du réseau SAGE (plus d'une cinquantaine d'exemplaires). Il faut attendre juillet 1958 pour que le premier centre SAGE soit opérationnel à la base McGuire de l'Air Force, dans le New Jersey. Chaque ordinateur pèse 275 tonnes, contient 60 000 tubes électroniques et consomme 750 kWh d'électricité. Il est relié à cinquante écrans, communique avec une centaine de radars et peut prendre en charge 400 avions. Le taux moyen de panne est de moins de quatre heures par an.

La fiabilité du système n'a (heureusement) jamais été vérifiée lors d'une attaque réelle. On pense maintenant que l'explosion d'une bombe atomique en atmosphère près d'un centre SAGE aurait probablement endommagé gravement l'électronique du système. Le dernier centre fut fermé en janvier 1984.

Entrée en jeu d'IBM (1953)

Comme nous venons de le voir ci-dessus à propos du projet SAGE, IBM est invité à analyser le *Whirlwind* afin d'en produire industriellement un certain nombre d'exemplaires pour la défense nationale. La compagnie s'en inspire directement, ainsi que des plans de VON NEUMANN, qui a été entre-temps engagé comme consultant, pour concevoir ses premiers ordinateurs commerciaux, civils et militaires.

Les premiers ordinateurs IBM, l'**IBM 701**, ordinateur scientifique à usage militaire, et son jumeau l'**IBM 702**, destiné à un usage civil de gestion, s'inspirent directement des plans de la machine IAS. IBM 701 IBM 702

Construit à l'aide de tubes electrostatiques dits « tubes de Williams », l'IBM 701 effectue 16 000 additions ou 2 000 multiplications par seconde, en binaire. L'IBM 701 est mis au point pendant la guerre de Corée, en réponse à un appel d'offres du ministère de la Défense. Le premier exemplaire est présenté le 7 avril 1953 (sous le nom de *Defense Calculator*) et 19 machines sont commercialisées. Le premier exemplaire va à Los Alamos et 18 vont dans des entreprises travaillant pour l'armée ou l'aviation (Boeing, Douglas, Lockheed, etc.).

L'IBM 702, quant à lui, fonctionne en décimal et est commercialisé en septembre 1953 pour répondre à la demande type d'une entreprise ayant besoin d'un accès rapide à un grand volume d'informations (comme un centre de sécurité sociale). Une quinzaine d'exemplaires sont vendus.

L'**IBM 650**, qui connaît un immense succès commercial à partir du milieu des années cinquante, est le premier ordinateur IBM utilisant des **tambours** comme mémoire de masse. Il est doté ultérieurement de **bandes magnétiques**, puis d'une mémoire à tores de ferrite. Son tambour contient 150 000 bits d'information et tourne à 12 500 tours par minute. Cette machine, de dimension moyenne, est vendue à plus de 1 500 exemplaires dans le monde. À l'origine, il s'agit d'une machine scientifique mais, comme elle utilise largement les cartes perforées, système bien connu de nombreux gestionnaires, la machine a en fait une grande diffusion dans les entreprises. IBM 650

Le **NORC** (*Naval Ordnance Research Calculator*) est un ordinateur spécial construit pour la marine par IBM, qui a engagé VON NEUMANN comme conseiller pour l'occasion. C'est ce dernier qui le présente le 2 décembre 1954. NORC

L'**IBM 704**, commercialisé en 1954 (les premiers exemplaires étant livrés en décembre 1955), est conçu par Gene AMDAHL. Il a une mémoire, énorme pour l'époque, de 32 768 mots de 36 bits dans la version de 1957. Il s'agit du premier ordinateur IBM utilisant les tores de ferrite, conçues pour le *Whirlwind*. Il ne tombe en panne que tous les huit jours et fonctionne trois fois plus vite que le modèle 701. IBM 704

L'**IBM 705**, apparu en 1955, comporte plusieurs lecteurs de bandes magnétiques qui en font une remarquable machine de gestion. 175 exemplaires sont vendus (le Pentagone en possède 28 en 1962). Elle est remplacée par l'**IBM 7070** qui n'a guère de succès, et par l'**IBM 7080**, version transistorisée du 705, qui est vendu à 80 exemplaires malgré son prix élevé. Le 7080 peut lire les programmes du 705, ce qui explique sans doute en partie son succès et inaugure la **politique de compatibilité** des modèles chez un même constructeur.

L'**IBM 709**, livré en 1958, est le descendant direct du 704 et le dernier ordinateur à tubes électroniques d'IBM. IBM 709

BIZMAC de RCA (1958)

Le **BIZMAC**, présenté à son époque comme l'ordinateur le plus puissant du monde, est mis au point par la compagnie RCA qui le destine à la gestion : il s'agit d'un système doté d'un ordinateur central auquel sont connectés simultanément 200 lecteurs de bandes magnétiques. Un réseau d'ordinateurs satellites gère les lecteurs de bandes. Il possède une petite mémoire à tores de ferrite et des tambours magnétiques. Commercialisé en 1958, il n'a guère de succès.

Les ordinateurs en France (1952)

Le **CUBA** (*Calculateur Universel Binaire pour l'Armement*) est livré en 1952 par la *Société d'Électronique et d'Automatisme* (SEA), créée par F. H. Raymond dans le cadre d'une commande du *Laboratoire de calcul de l'armement* dirigé par l'ingénieur général Nicolau.

La société des machines *Bull* lance, en 1950, une série de calculateurs électroniques : Le **Gamma 2**, calculateur à lignes de retard en 1951, suivi du **Gamma 3**, en 1952, qui est vendu à 1 000 exemplaires. Elle présente en 1958 son premier ordinateur, le **Gamma ET** (*Gamma Extension Tambour*). Il utilise des lignes à retard pour la mémoire centrale et des tambours pour la mémoire auxiliaire qui peut stocker 800 000 bits d'information.

Les **CAB** (*Calculatrices Arithmétiques Binaires*) constituent une série de machines issues du CUBA et du SEAC. Le CAB 2000, machine scientifique, est annoncée en 1954. le modèle suivant, le CAB 2022, possède une mémoire rapide à tores de ferrite. Le CAB 3000 est commercialisé en 1958.

8.3 Bibliographie

[Big-80] Bigelow, Julian, *Computer Development at the Institute for Advanced Study*, in [Met-80], 1980, pp. 291–310.

[BN-71] Bell, C. Gordon, Newell, Allen, **Computer Structures : Readings and Examples**, McGraw-Hill, 1971, XIX + 668 p. Disponible sous forme électronique :

`http://research.microsoft.com/users/gbell/Computer_Structures_`
`_Readings_and_Examples/contents.html`

[Cop-06] Copeland, B. Jack and alii, **Colossus : The Secrets of Bletchley Park's Codebreaking Computers**, Oxford University Press, 2006, xvi + 462 p.

[Lav-80] Lavington, Simon, **Early British Computers**, Digital Press, Bedford, Mass., 1980.

[Mau-47] Mauchly, John W., **Preparation of Problems for ADVAC-Type Machines**, 1947. Reproduit in [Ran-82], pp. 393–397.

[Met-80] Metropolis, N. and Howlett, J. and Rota, Gian-Carlo, eds, **A History of Computing in the Twentieth Century**, Academic Press, 1980.

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

[Wil-53] Wilkinson, J. H., *The Pilot ACE*, **Automatic Digital Computation**, National Physical Laboratory, Teddington, England, mars 1953, pp. 5–14. Reproduit dans [BN-71], pp. 193–199.