

Notes sur les machines à calculer électroniques - Par René Perret - 1958

Le document original de ce cours universitaire grenoblois daté de 1958 est disponible à ACONIT, Association pour un conservatoire de l'informatique et de la télématique, Grenoble, sous la fiche d'inventaire numérotée **18549**.

Pour la description du document original, voir la table des matières, en XVIII chapitres, fournie dans le PDF sommaire.

Le présent PDF recopie le chapitre « I – INTRODUCTION » :

- les pages 1 à 7 pour avec 1. – Définitions, 2. – Intérêt, 3. – Historique,
- les pages de 7 à 9 pour 4. – Organisation générale, les pages de 10 à 11 pour 5. – Structure des organes principaux,
- les pages de 11 à 12 pour 6. – Point de vue de l'utilisateur,
- et les pages 12 à 13 pour 7. – Plan de l'exposé.

Cette introduction fournit aussi une bibliographie de 11 références, situées en bas des pages 3 à 6, complémentaire de la bibliographie générale de la page 150.

Pour utiliser cet article, mentionnez IMAG l'Institut de Mathématiques Appliquées de Grenoble, ainsi que la Base de Données ACONIT n° 18549.

Il est rappelé que la loi sur les droits d'auteur n'autorise que les reproductions partielles de documents à titre individuel et pour des motifs de recherche.

Fiche rédigée le 31/7/2018 par Jean Ricodeau.

Pour utiliser cet article, mentionnez les références IMAG - Université de Grenoble, ainsi que ACONIT n° **18549**.

I - INTRODUCTION

-:-

1. - DEFINITIONS. -

Les machines à calculer électroniques dont nous nous occupons sont, alternativement, qualifiées de digitales, arithmétiques, à programme, automatiques,..... Elles sont digitales car toutes les informations qu'elles manipulent sont représentées de façon discrète par des tensions ou des intensités électriques discontinues, et, en ce qui concerne les circuits de calcul, elles transposent sur le plan de l'électronique les principes des machines à calculer de bureau. Elles sont arithmétiques car elles sont capables d'effectuer directement seulement les opérations élémentaires. Le plus souvent leur possibilité est limitée à l'addition algébrique. Nous verrons quels artifices sont utilisés pour leur faire effectuer des opérations bien entendu beaucoup plus complexes. Elles sont à programme car la suite des opérations d'un problème donné est fixé préalablement par un programme qui leur est communiqué au début du problème et qu'elles conservent pendant toute la durée du calcul. Durant cette dernière, l'opérateur n'intervient pas, c'est pourquoi elles sont automatiques. Cette dernière qualité, jointe à l'utilisation de l'électronique, donne une grande rapidité d'exécution à la machine.

2. - INTERET. -

Quelques chiffres donnent une idée du développement de cette technique. Il existe actuellement mille fois plus de machines à calculer du type précédemment défini, qu'il y a dix ans. C'est à dire qu'au lendemain de la guerre, cette technique était encore au stade des prototypes. On prévoit une progression dans le rapport de un à cent pour les dix prochaines années. Indiquons encore qu'en 1956, aux Etats-Unis, environ 50 000 personnes travaillaient à la construction

et à l'utilisation des calculateurs électroniques. Notons en particulier qu'à cette date il existait une centaine de grands calculateurs dans ce pays. Nous qualifions ainsi des appareils d'un prix de revient voisin d'un milliard de francs. Plusieurs centaines de calculateurs moyens (prix de revient d'une cinquantaine de millions) étaient également en service aux U.S.A. à ce moment.

Ces machines sont utilisées dans trois domaines principaux : le calcul scientifique, le "data processing", les contrôles à commandes numériques.

1°) Une connaissance toujours plus poussée des matériaux et des phénomènes conduit à des calculs de plus en plus élaborés dans les techniques traditionnelles ou de développement récent.

Ces calculs, souvent très longs et fastidieux ne peuvent être effectués rapidement et sûrement que par de tels auxiliaires de calcul. Indiquons quelques-uns de ces domaines :

- les systèmes d'équations linéaires et la recherche d'optima intéressent en particulier l'étude des réseaux et, plus généralement, la recherche opérationnelle ;
- les équations caractéristiques dont les solutions conditionnent la stabilité des systèmes considérés ;
- les phénomènes vibratoires, et, plus généralement, l'étude des systèmes font appel à l'analyse harmonique (servomécanismes) ;
- les équations aux dérivées partielles concernent la plupart des études de champs (physique nucléaire, aérodynamique) ;
- les probabilités sont utiles pour l'étude de phénomènes que l'on connaît seulement statistiquement (économie, biologie) ;
- les calculs intégral et différentiel sont utilisés dans la plupart des techniques.

Il existe aussi des possibilités diverses d'utilisation pour les calculateurs. Une des plus prometteuse est leur application à la traduction automatique d'un langage dans un autre.

Enfin, indiquons que les calculateurs présentent l'intérêt d'obliger leur utilisateur à poser de façon quantitative précise les problèmes.

2°) "Data processing" se traduit par "manipulation d'information". Il s'agit de l'ensemble des applications où l'activité de classement est prépondérante et où seulement des opérations arithmétiques extrêmement simples risquent d'intervenir.

L'exemple classique est celui du recensement qui a conduit, à la fin du siècle dernier, à l'invention de la carte perforée, encore très utilisée aujourd'hui. La mise à jour des comptes particuliers dans les banques, et, plus généralement, la comptabilité d'une grande entreprise, constituent des applications de choix.

Signalons encore, dans le même ordre d'idée, que les 35 000 réservations journalières de la compagnie United Airlines à NEW-YORK sont enregistrées et classées par un calculateur.

3°) Les contrôles à commande numérique se développent de jour en jour. Dans ce cas, il s'agit de calculateurs spéciaux qui effectuent toujours le même type d'opération. Dans les machines-outils, on est amené ainsi à commander les déplacements d'un outil à partir d'un programme interprété par un calculateur. Un calculateur peut aussi être intercalé dans une chaîne de guidage pour déterminer la trajectoire convenable de l'engin guidé.

3. - HISTORIQUE. -

On peut se demander pourquoi, entre les deux guerres, aucune tentative n'ait été faite en vue de construire une machine à calculer électronique. Le tube électronique existe depuis le début du siècle, le basculeur depuis 1918. Les éléments technologiques qui devaient constituer l'ENIAC (1) étaient donc disponibles. D'autre part, l'astronomie et la physique étaient d'importants clients en puissance. La première raison qui vient à l'esprit est que la technologie des tubes électroniques était telle que l'on pouvait prévoir, pour un ensemble de 3 000 tubes, une panne toutes les demi-heures.

(1) ENIAC - Electrical Numerical Integrator and Automatic Computer
(ECKERT et MAUCHLEY, Université de Pennsylvanie).

Même avec des tris et des tests systématiques, on ne pouvait avoir une confiance suffisante dans cette technologie. C'est ainsi que le Dr AIKEN (2) projeta en 1937 la construction de MARK I, sous la forme d'une machine à relais mécaniques qui devait être terminée en 1944. Simultanément, les nécessités de la guerre provoquèrent la construction, par ECKERT et MAUCHLEY (1) de l'ENIAC, mise en service en 1945. L'électronique pénétrait brutalement dans ce domaine, puisque, avec ses 18 300 tubes électroniques (100 KW de puissance), l'ENIAC reste encore la calculatrice la plus compliquée produite à ce jour. Si, du point de vue de la conception générale, c'est une erreur de considérer l'ENIAC comme l'ancêtre des calculatrices actuelles, elle eut le mérite de poser le problème de la technologie sous deux formes : la difficulté d'entretenir un ensemble aussi considérable de tubes en bon état de marche, et la nécessité d'y trouver des mémoires constituées par autre chose que des basculeurs à tubes.

En 1948, un mémoire de BURKS, GOLDSTINE et VON NEUMANN (3) vient fixer, de façon précise, la constitution d'une machine à calculer "universelle". Cette dernière est divisée, du point de vue technologique, en trois parties essentielles :

- 1) Les organes d'entrée et de sortie, qui permettent à l'opérateur humain de communiquer avec la machine ;
- 2) La mémoire, qui est susceptible d'emmagasinier une grande quantité d'informations ;
- 3) Les organes de contrôle et de calcul, qui doivent accomplir les fonctions logiques nécessaires à l'évolution du calcul.

Le calcul digital, par sa nature même, exige un certain codage des nombres utilisés. Il peut paraître curieux que la technologie à tubes se soit bornée au codage binaire, et qu'aucun essai

(2) MARK I, II, III, IV - Computation Laboratory of Harvard University (H. AIKEN)

(3) BURKS, GOLDSTINE, VON NEUMANN - "Preliminary Discussion of the logical design of an Electronic Computing Instrument" (Institute for Advanced Study, Princeton, 1947).

de codage tertiaire, par exemple, n'ait été effectué. Il ne semble pas que la technologie ait prohibé un tel code. Toujours est-il que le codage binaire permettait l'utilisation de l'algèbre de la logique, imaginée il y a une centaine d'années par BOOLE, STIBITZ (4), ALEXANDER (5), SHANNON (6), AIKEN, et le laboratoire de calcul de HARVARD ont approfondi ces questions. Les années 1949 et 1950 voient apparaître trois types de mémoires intéressants :

- la ligne à retard à mercure, développée pendant la guerre pour ses utilisations dans la technique du radar ;
- la mémoire électrostatique, mise au point par WILLIAMS (7) et FORRESTER (8) ;
- le tambour magnétique, étudié par BOOTH (9) en particulier.

On était, désormais, en possession des éléments de construction d'une calculatrice universelle. L'EDSAC (10) est alors mise en service par le Dr WILKES. Peu de calculatrices utiliseront encore exclusivement des tubes pour leur technologie; signalons cependant MARK III.

En effet, les progrès de la métallurgie du germanium devaient permettre, en 1950, la fabrication d'éléments semi-conducteurs, redresseurs d'excellente qualité. D'autre part, la technologie à redresseurs s'accommode tout à fait du fonctionnement "Tout ou Rien". Depuis cette date, les calculatrices sont, pour la plupart, basées

-
- (4) STIBITZ - BELL TELEPHONE Laboratories, Murray Hill (New-Jersey)
 - (5) ALEXANDER - National Bureau of Standards, Washington
 - (6) SHANNON - "Synthesis of two terminal switching circuits", Bell Syst. Tech. Journ. vol. 28 janvier 1949.
 - (7) WILLIAMS - Université de Manchester
 - (8) FORRESTER - Massachusetts Institute of Technology
 - (9) BOOTH - Birkbeck College - Université de Londres
 - (10) EDSAC - "Electronic Delay Storage Automatic Computer" (Université de Cambridge).

sur une technologie à redresseurs qui utilise les tubes uniquement pour l'amplification et la remise en forme des impulsions.

Le progrès essentiel, au point de vue technologique, depuis cette date, concerne l'utilisation des tores magnétiques (RAJCHMAN (11) et FORRESTER (8) comme organes de mémoire. Enfin, les transistors jouent un rôle qui ne peut que croître dans l'avenir. Ils n'équipent encore que de grandes machines expérimentales.

Nous citons, ci-dessous, dans l'ordre chronologique, quelques réalisations remarquables qui ont suivi l'EDSAC :

SEAC (Standards Eastern Automatic Computer, National Bureau of Standards)

WHIRLWIND (M.I.T.),

UNIVAC (Universal Automatic Computer, ECKERT et MAUCHLEY, Remington-Rand),

EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer, VON NEUMANN, Université de Pennsylvanie)

MARK IV (Computation Laboratory of Harvard University)

EDPM série 700 (Electronic Data Processing Machine, International Business Machines),

CUBA (Calculatrice Universelle Binaire de l'Armement, Société d'Electronique et d'Automatisme),

TXO (Lincoln Laboratory M.I.T.)

Il est important de noter que UNIVAC et EDPM série 700 ont été réalisées à plusieurs dizaines d'exemplaires aux ETATS-UNIS.

Un autre fait important de cette période est l'apparition sur les marchés de calculateurs de dimensions plus restreintes, donc de prix moins élevé. En FRANCE, trois types de calculatrices

(11) RAJCHMAN - Massachusetts Institute of Technology

universelles existent actuellement :

GAMMA 3 B (BULL)

CAB (S.E.A.) (Calculatrice Arithmétique Binaire)

I.B.M. 650 (I.B.M.)

Elles comportent toutes une mémoire principale à tambour magnétique.

4. - ORGANISATION GENERALE. -

Afin de nous rendre compte des principales opérations nécessitées par un calcul numérique, nous choisissons un exemple simple.

Supposons que l'on veuille calculer le logarithme népérien de $\frac{1}{1-x}$ ($0 < x < 1$) par la formule :

$$L \frac{1}{1-x} = \frac{x}{1} + \frac{x^2}{2} + \dots + \frac{x^k}{k} + \frac{x^{k+1}}{k+1} + \dots$$

On pose :

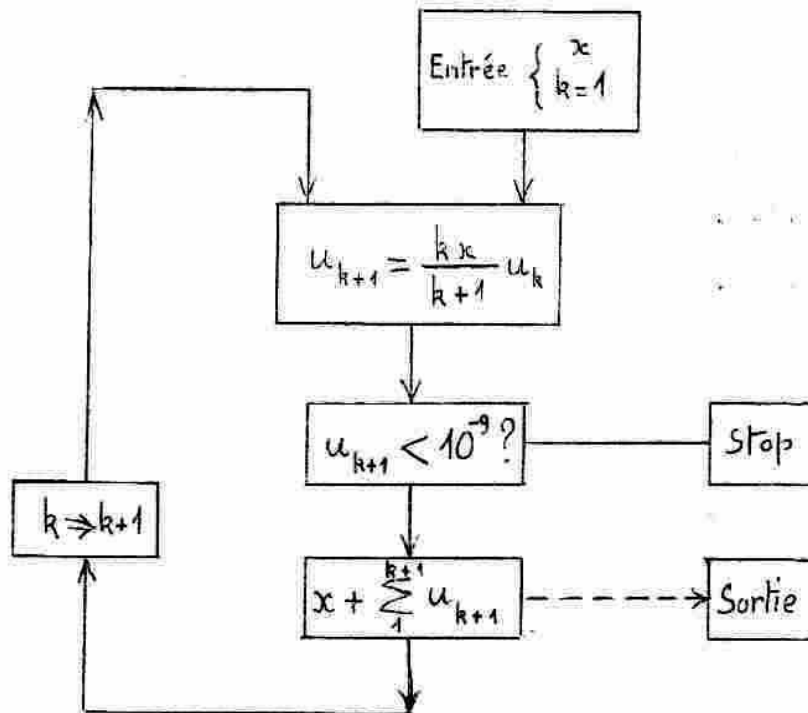
$$u_k = \frac{x^k}{k} \quad \text{et on convient d'arrêter le calcul au rang}$$

n tel que u_n soit inférieur à un milliardième (10^{-9}). On fait pratiquement le calcul de proche en proche, en passant de l'ordre k à l'ordre $k+1$ par la formule de récurrence :

$$u_{k+1} = \frac{k x}{k+1} u_k$$

On commence avec $k = 1$.

On établit ainsi un "organigramme" de calcul (figure 1).



- Figure 1 -

Ce schéma de calcul suffit à suggérer les organes principaux d'un calculateur automatique. Ce dernier doit être apte à réaliser :

1^o) les opérations arithmétiques, ce qui nécessite :

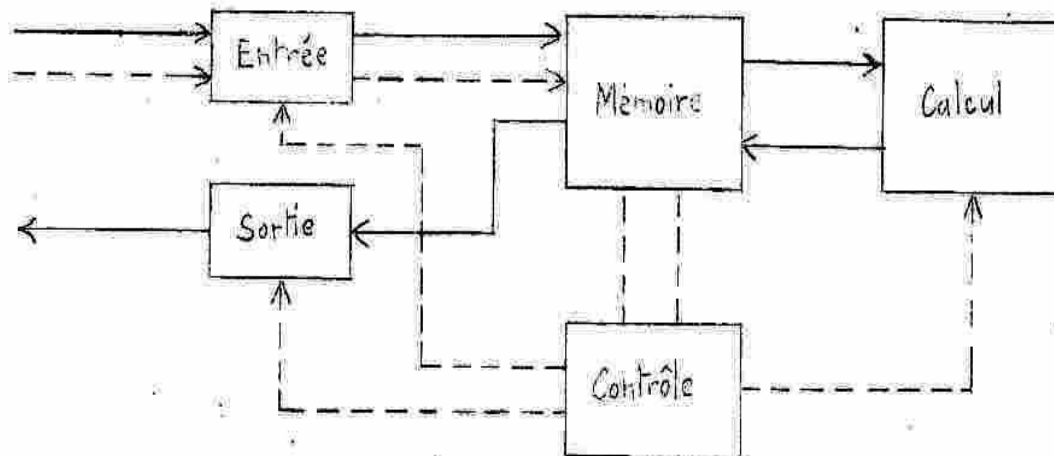
- a) un organe de calcul proprement dit qui doit pouvoir effectuer les opérations élémentaires. Il joue le rôle de la machine de bureau lors du calcul manuel.
- b) un organe de mémoire qui enregistre tous les résultats intermédiaires. Pour un calcul manuel, cette mémoire est constituée par le papier dont dispose l'opérateur.

2^o) L'enchaînement du calcul nécessite que l'on fournisse, préalablement, à la machine, le programme du calcul. Ce programme, conservé également dans une mémoire interne, dirigera ensuite le fonctionnement par l'intermédiaire de l'organe de contrôle. Dans le calcul habituel, cet enchaînement est assuré par l'opérateur lui-même. On peut déjà se douter que le calculateur automatique est particulièrement intéressant pour les programmes bouclés tel que

celui indiqué plus haut. En effet, un parcours de la boucle correspond au même programme. Seules, les grandeurs numériques changent. Le programme d'un tel calcul est donc très court.

3°) Pour des raisons de structure physique, les organes du calculateur fonctionnent par "Tout ou Rien", alors que l'homme utilise dix symboles différents de nombres. En outre, la machine utilise des impulsions électriques. Ces différentes raisons nécessitent donc la présence d'organes d'entrée et de sortie qui permettent la communication du calculateur avec l'extérieur.

De ces considérations, on peut déduire le schéma général d'un calculateur (figure 2).



- Figure 2 -

Les traits pleins de la figure 2 représentent les chemins de circulation des nombres, les tirets concernent la circulation des ordres issus du programme. Nous qualifierons la représentation physique des nombres ou des ordres d'information.

52 - STRUCTURE DES ORGANES PRINCIPAUX. -

L'organigramme de la figure 1 permet encore de préciser la constitution des organes principaux du calculateur. . .

1°) Mémoire. -

Nous devons disposer de plusieurs types de mémoires.

- a) une mémoire rapide, immédiatement accessible, pour les manipulations effectuées au cours d'une opération arithmétique élémentaire. C'est, en particulier, le cas des reports.
Ce type de mémoire existe dans les machines de bureau. Sa première réalisation fut l'oeuvre de PASCAL.
- b) une mémoire moyenne, accessible à chaque parcours de la boucle de calcul, pour conserver les résultats partiels.
- c) une mémoire lente, accessible à la fin du calcul pour recueillir les résultats.

Cette hiérarchie des mémoires doit être établie à cause des prix de revient, une mémoire étant d'autant plus chère qu'elle est rapidement accessible.

2°) Calcul. -

Cet organe peut être plus ou moins développé, mais doit comporter au moins un additionneur algébrique. Mais, il est possible par exemple d'utiliser, en plus de l'additionneur, un multiplieur qui permettra de gagner un temps appréciable lors des multiplications. Mais ces dernières peuvent évidemment être exécutées par une suite d'additions.

On se trouve toujours devant le compromis vitesse-complexité, dont la solution conditionne étroitement le prix de revient. Ce dernier dépend, en définitive, essentiellement de la vitesse. Une petite machine à calculer peut effectuer le même travail qu'une grande mais moins rapidement.

3°) Contrôle. -

La figure 1 indique les trois types principaux d'ordres que l'organe de contrôle doit pouvoir interpréter :

- a) les opérations fondamentales arithmétiques,
- b) les transferts de nombres entre la mémoire et l'organe de calcul, l'entrée et la sortie,
- c) les tests qui correspondent à une opération intellectuelle de décision lorsqu'une condition est remplie.

Le code de la machine est constitué par l'ensemble des ordres susceptibles d'être interprétés par l'organe de contrôle. Pratiquement, pour traiter un problème, on le formule à l'aide des opérations élémentaires que peut effectuer la machine. Lorsque cette formulation est achevée, on écrit le programme qui lui correspond. On introduit alors programme et données dans la machine, qui doit alors pouvoir interpréter séquentiellement la suite des ordres.

6. - POINT DE VUE DE L'UTILISATEUR. -

Ce dernier considère toujours, pour des raisons évidentes, trois paramètres essentiels : la sécurité, la vitesse et le prix.

1°) Sécurité. -

Elle constitue un impératif absolu. On l'améliore en jouant sur la logique interne et grâce à la technologie.

a) Logique. On peut :

- minimiser le nombre d'éléments destinés à la réalisation d'une fonction logique donnée,
- décomposer les opérations arithmétiques en un plus grand nombre d'opérations élémentaires, ce qui diminue le nombre d'organes, donc le risque de panne, mais augmente la durée du calcul.
- utiliser des codes numériques spéciaux, susceptibles de détecter dans une certaine mesure, les erreurs dues au matériel.

b) Technologie.

L'amélioration de la qualité des matériaux de base fournit évidemment un fonctionnement plus sûr. Un grand progrès a été ainsi marqué par la substitution des semi-conducteurs et des ferrites aux tubes et aux relais.

2°) Vitesse. -

Il est probable que, pendant longtemps, la vitesse des machines sera encore trop lente pour résoudre certains problèmes. Pour augmenter la vitesse, on peut jouer sur la :

a) logique.

En augmentant le nombre des circuits, ce qui permet d'effectuer plusieurs opérations simultanément, mais ce qui implique des matériaux d'une haute sécurité.

b) technologie.

En accroissant la fréquence de récurrence des opérations logiques élémentaires.

3°) Prix. -

Nous nous bornerons à deux remarques à ce sujet.

- a) La construction en série est bien adaptée aux calculateurs qui utilisent un grand nombre de circuits élémentaires identiques ;
- b) Les petits calculateurs présentent un intérêt semblable à celui des grands. Si bien que ces auxiliaires de calcul sont à la portée de beaucoup d'entreprises.

7. - PLAN DE L'EXPOSE. -

L'élaboration d'un calculateur fait appel à deux types principaux de préoccupations :

- 1°) le choix d'une technologie de base. Celle-ci doit fournir les matériaux destinés à la réalisation, d'une part des fonctions logiques élémentaires, d'autre part des cellules de mémoires.

Nous commencerons ainsi à étudier la structure fine de la machine. Nous donnerons d'abord un court préambule sur l'algèbre de BOOLE, car nous aurons très souvent l'occasion de nous y référer ensuite.

2°) le choix d'une logique constitution, qui doit réunir les éléments technologiques en vue de l'accomplissement des différentes fonctions demandées à la machine. Cette réunion pose des problèmes à différents stades successifs, de complexité croissante :

- a) les circuits élémentaires,
- b) les fonctions logiques élaborées (cas de l'additionneur par exemple),
- c) l'organisation d'ensemble du calculateur.

Les circuits élémentaires seront étudiés comme application directe de la technologie. L'étude de la structure générale constituera la deuxième partie de l'exposé.