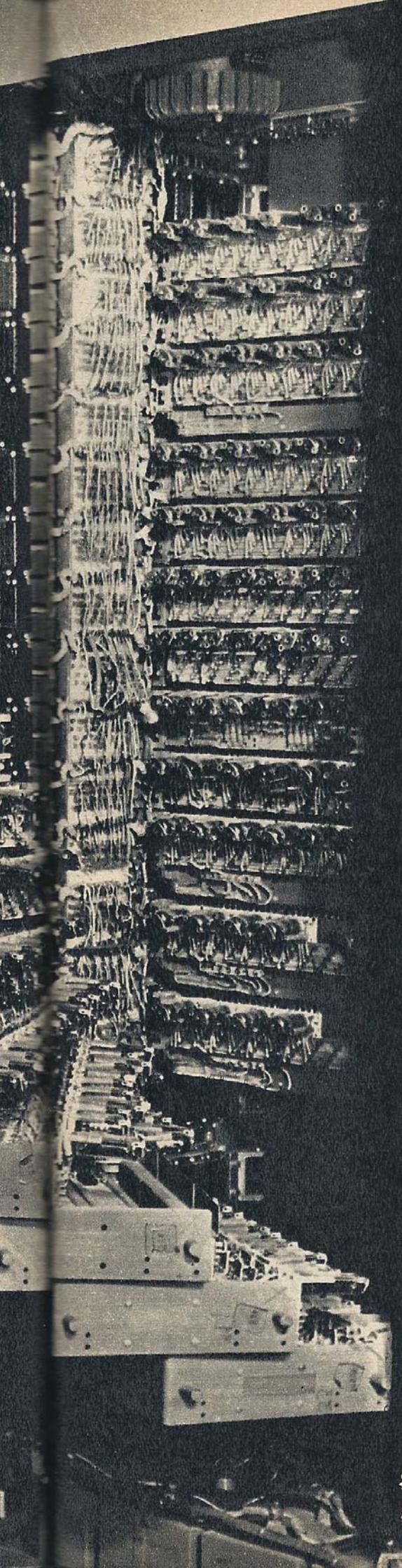


MACHINES A TRAITER L'INFORMATION



Machines ultra-rapides auxquelles on a appris à calculer et raisonner

L n'y a guère plus d'une quinzaine d'années que sont apparues pour la première fois dans la presse ces expressions surprenantes : « cerveaux électroniques », « machines qui pensent ».

Depuis lors, l'usage a quelque peu atténué l'anthropomorphisme outrancier de ces métaphores. Le mieux serait qu'elles disparaissent complètement et avec elles les dangereuses confusions qu'elles provoquent. Mais les spécialistes ne savent pas s'il faut les appeler *calculateurs* ou *calculatrices* électroniques. Pourquoi d'ailleurs vouloir garder la racine « calcul », quand le calcul n'est que l'une des nombreuses fonctions dont sont capables ces machines ? On a lancé récemment le nom « *ordinateur* » dont la fortune n'est pas universelle. Préférant à des termes trop neufs, inexacts ou désuets, une locution plus précise, la presse spécialisée emploie couramment des deux côtés de l'Atlantique l'expression « machine à traiter l'information » qui possède, à défaut d'élégance, le mérite de la rigueur.

Traiter l'information ? En quoi consiste ce traitement ? Quel est le produit fini ? Que fait l'électronique en cette affaire ?

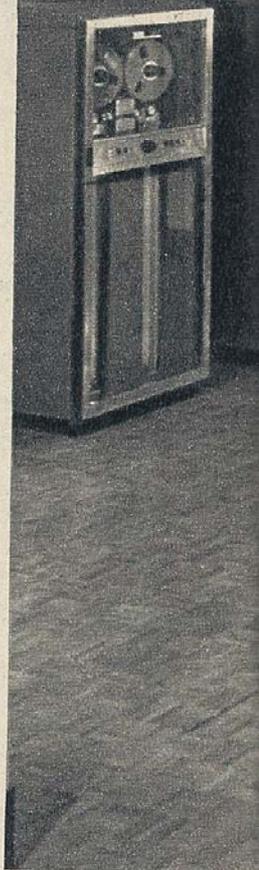
Et d'abord, que faut-il entendre par information ?

Pour nous, c'est le contenu des mots, des phrases, des nombres. Le théoricien dit qu'un message contient une certaine quantité d'information, et il l'évalue en la rattachant à une notion relative de la thermodynamique :

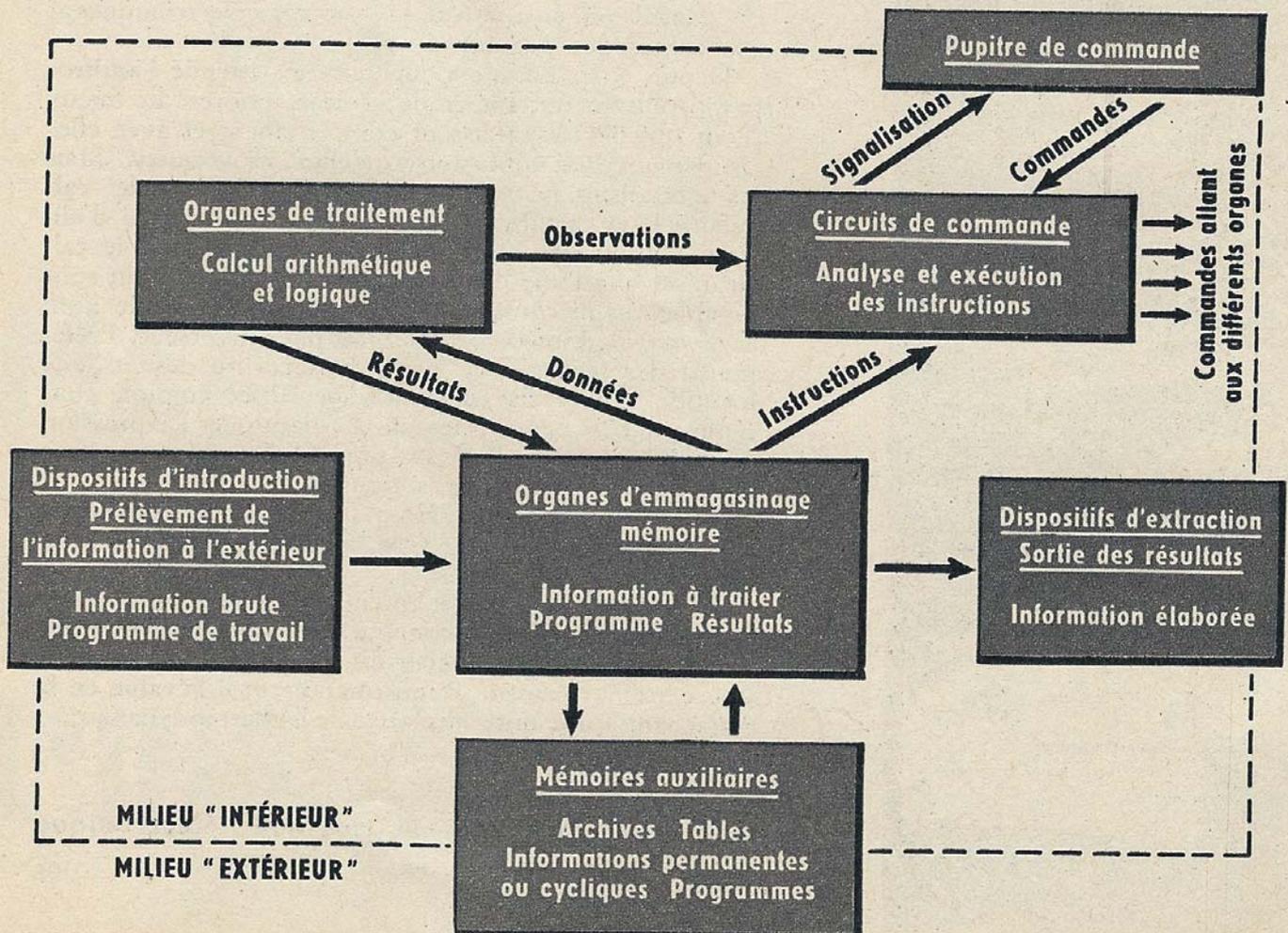
l'entropie. Nous ne le suivrons pas, et nous nous contenterons de l'intuition que nous pouvons en avoir. Un exemple va nous montrer comment un traitement approprié permet d'élaborer de nouvelles informations à partir d'informations brutes.

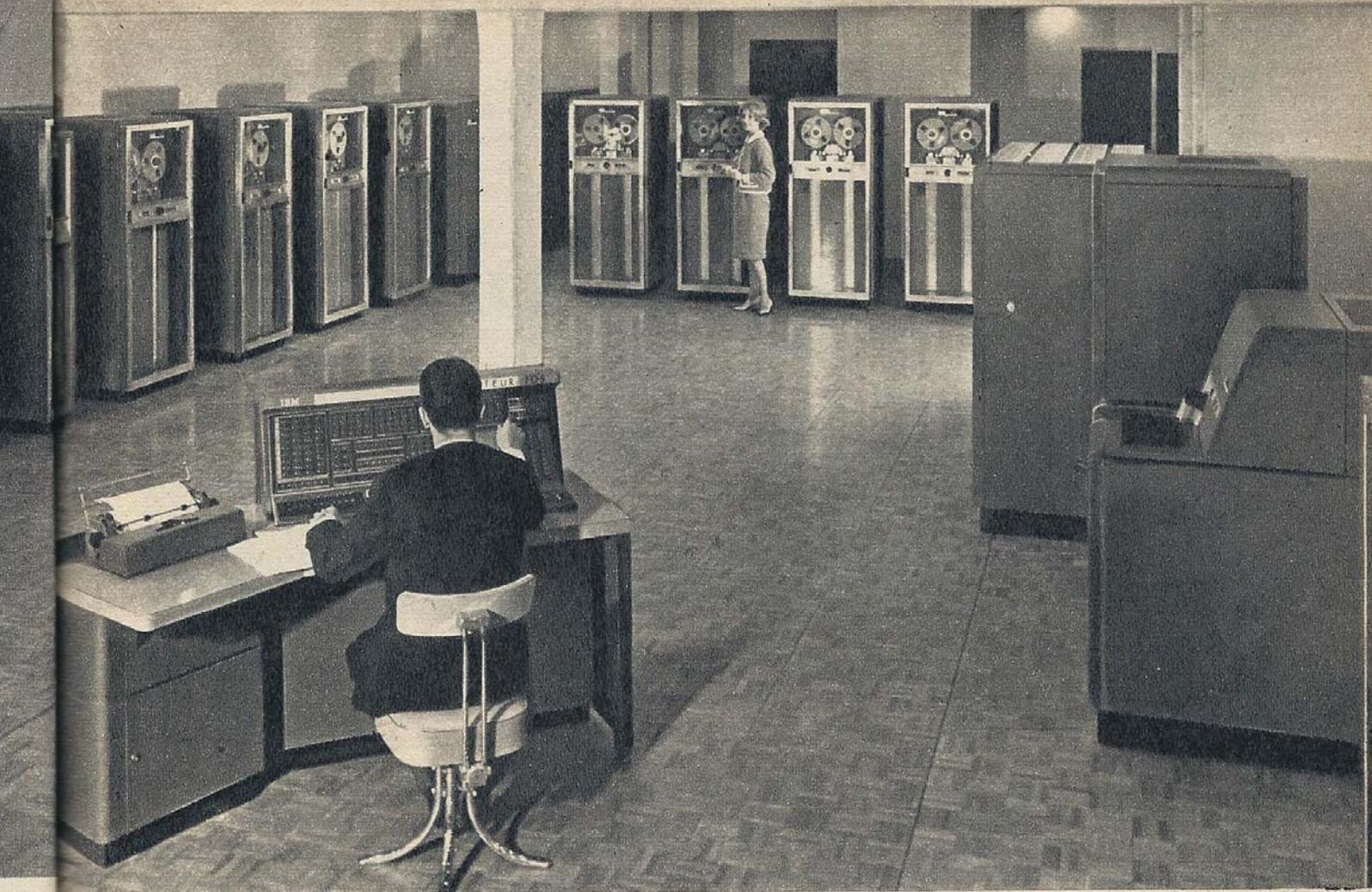
Prenons le cas du recensement : les renseignements fournis de façon anonyme par chaque individu sur lui-même sont consignés sur une fiche. L'ensemble des fiches réunies par les enquêteurs contient l'information brute. Sous cette forme, que peut-on tirer ? Sans moyens de traitement, rien. On pourra seulement reprendre au hasard telle ou telle fiche, apprenant ainsi qu'il existe à Paris un dessinateur de trente ans qui a trois enfants, ou à Nîmes un architecte célibataire de quarante ans. Nous n'avons que faire de ces renseignements. Mais si on classe ces fiches, si on les trie selon des critères définis : l'âge, la profession, la résidence..., si on les compte par catégories, si on fait des statistiques en un mot, on obtiendra la répartition de la population en population rurale ou urbaine, active ou super-active, et bien d'autres renseignements démographiques sur lesquels se pencheront avec intérêt les économistes. Ainsi le traitement d'informations brutes (les fiches individuelles) donne comme produit fini d'autres informations. Mais ce n'est pas tout :

Ordinateur IBM 705 en service au siège du Crédit Industriel et Commercial à Paris. Au centre, le pupitre de commande. A l'arrière-plan, 10 mémoires à ruban magnétique. A droite, une partie de l'unité centrale arithmétique et logique est suivi d'un lecteur de cartes perforées, d'une autre mémoire à ruban et d'une unité de contrôle.



Le traitement de l'information dans une machine numérique suit ce schéma fonctionnel. Le pointillé sépare les milieux «intérieur» et «extérieur». Certaines mémoires ont un support amovible (ruban magnétique, par exemple) et offrent une possibilité de communication supplémentaire entre les deux milieux,





ces résultats vont servir à leur tour de données de base aux industriels, aux commerçants. En confrontant les statistiques démographiques et leurs statistiques de vente, appliquant les méthodes scientifiques de la « recherche opérationnelle », le commerçant, l'industriel, vont déterminer dans quel sens et de quelle façon il est opportun de modifier les caractéristiques de leurs produits, leurs réseaux de distribution, pour étendre leur marché.

Tour à tour matière première, produit brut, produit fini, l'information arrive grâce à des traitements successifs à des formes de plus en plus élaborées, concentrées et, si l'on peut dire, efficaces.

Un autre exemple, la comptabilité, fait apparaître un aspect cyclique de l'information. Prenons le cas d'une « comptabilité matière » ; l'information de base se compose d'une part de l'ancien état des stocks, et d'autre part de tous les mouvements journaliers : sorties de pièces, retours, livraisons des fournisseurs. La comptabilité fournit comme résultat, d'une part les bons de réapprovisionnement, les ordres de relance des fournisseurs, d'autre part le nouvel état des stocks qui servira de base le lendemain, et ainsi de suite.

Une véritable usine

Déjà, sur ces bases, nous pouvons imaginer le « schéma fonctionnel » d'une machine à traiter l'information. Dans un ordre logique nous y trouverons :

- des dispositifs d'introduction de l'information ;
- des dispositifs de stockage ;
- des circuits de traitement ;
- des dispositifs de sortie ou d'extraction des résultats.

Les dispositifs d'introduction peuvent être très variés ; la carte perforée, la bande perforée sont les plus anciens ; la bande magnétique, le papier imprimé à l'encre magnétique sont plus récents ; et l'on cherche aujourd'hui à perfectionner et à simplifier des dispositifs permettant la lecture directe des caractères imprimés, et même manuscrits ! Le rôle de tous ces organes est de transmettre à la machine, dans son propre code, chaque lettre, chaque chiffre prélevé à l'extérieur. On « entre » ainsi dans la machine les données nouvelles, l'information brute, et aussi le programme de travail correspondant au traitement désiré.

constante avec le pupitre de commande d'où l'on dirige et contrôle le fonctionnement de la machine.

Tel est, dans ses grandes lignes, le schéma fonctionnel que l'on retrouve à quelques variantes près dans toutes les machines modernes. Nous avons opposé le milieu extérieur au milieu intérieur constitué par les circuits propres de la machine; la distinction est assez intuitive. Bien des différences existent entre les deux, à commencer par la représentation de l'information. Comment y sont représentés les nombres et l'alphabet ?

Deux grandes classes de machines

Quand il s'agit d'informations purement numériques, on peut songer à représenter les grandeurs (les nombres) apparaissant dans le calcul par des grandeurs analogues (tensions, courants, rotations...) variant de la même façon; les machines fonctionnant sur ce principe sont dites *analogiques*.

Nous nous bornerons à mentionner ici ce premier type de machines, sans entrer dans leur description. Ce n'est pas qu'il s'agisse de décider de leur infériorité intrinsèque par rapport aux machines de l'autre type, car il est des domaines où elles sont irremplaçables. Mais un calculateur analogique est en général construit en vue d'une classe d'applications déterminée et clairement limitée. Au contraire, les machines dites « numériques » peuvent traiter des problèmes extrêmement divers et il ne fait pas de doute qu'actuellement, ce sont elles qui semblent ouvrir la voie aux développements les plus audacieux, ce qui justifie la place que nous leur consacrons.

Dès que le volume des informations numériques augmente dans de grandes proportions, dès qu'on s'intéresse à des informations alphabétiques ou que l'on exige une précision accrue, les machines dites *numériques* s'imposent. Dans cette catégorie de machines, chaque caractère conserve son individualité; il est représenté par un code, ou combinaison de symboles plus simples. Tout le monde

TABLE D'ADDITION

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 10 \text{ report}$$

TABLE DE MULTIPLICATION

$$0 \times 0 = 0$$

$$0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 0 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

La simplicité de la numération binaire éclate ici à l'évidence. De quoi faire rêver tous les écoliers.

215 s'écrit

Binaire pur: -----11010111

Décimal codé:

0010	0001	0101
2	1	5
Centaines	Dizaine	Unités

Deux façons de « coder » un même nombre.

connaît, au moins de réputation, l'alphabet Morse dans lequel lettres et chiffres sont figurés par des combinaisons de traits et de points. Les machines qui nous intéressent utilisent des phénomènes ne présentant généralement que deux états stables définis. Par exemple, un contact est ouvert ou fermé, un courant passe ou ne passe pas, une matière magnétique est aimantée dans un sens ou dans l'autre. Il fallait donc chercher un mode d'expression par tout ou rien. Les machines arithmétiques ne connaissent que deux chiffres : le zéro (rien) et le un (tout), et elles ont tout d'abord travaillé en *numération binaire*.

Une numération millénaire

C'est assurément la plus simple qui se puisse imaginer. Dans la numération décimale, qui est la nôtre, quand nous avons compté jusqu'à neuf, nous énonçons ensuite une « dizaine », c'est-à-dire une unité de l'ordre suivant. De même, en binaire, nous écrivons : 1 pour un, 10 pour deux (une paire, une unité de l'ordre suivant), 11 pour trois (une paire et une unité), 100 pour quatre (une paire de paires, comme cent est une dizaine de dizaines), 101 pour cinq (une paire de paires et une unité), etc. Evidemment, l'énoncé des nombres binaires présente des difficultés de vocabulaire, mais elles n'arrêtent pas les machines.

Certaines calculent en numération binaire pure, c'est-à-dire que les nombres décimaux sont à leur introduction intégralement convertis en nombres binaires; et l'opération symétrique a lieu à la sortie. Mais pour des travaux comptables, ou des applications nécessitant le traitement de libellés alphabétiques, on préfère coder individuellement chaque caractère; par exemple, les chiffres de 0 à 9 seront représentés isolément par les combinaisons : 0000, 0001, 0010, ... 1001, et les lettres par les combinaisons 100001, 100010, 100011, 100100, ...

Comment l'adoption du système binaire, comment l'emploi des codes permettent-ils à la machine de calculer ?



Calculateur analogique répétitif de la SEA. D'un encombrement très réduit et d'une faible consommation, grâce à son équipement de transistors, il permet de résoudre un grand nombre de problèmes scientifiques, techniques et autres, dont les solutions sont observées sur un oscillographe à tube rémanent.

L'information introduite doit être emmagasinée dans le « milieu intérieur » de la machine pour rester disponible pendant toute la durée du traitement. Cette fonction est dévolue à des dispositifs que l'on appelle improprement « mémoires ». Mais le terme fait image et nous le garderons. La position privilégiée de cette mémoire dans le schéma fonctionnel lui vaut généralement d'être qualifiée de « centrale ».

Il arrive assez souvent que la capacité de stockage de la mémoire centrale soit insuffi-

sante. Elle est alors complétée par des mémoires de plus grande capacité, mais ayant un temps d'accès plus long, dans lesquelles on enregistre les informations permanentes (tables, barèmes) ou cycliques.

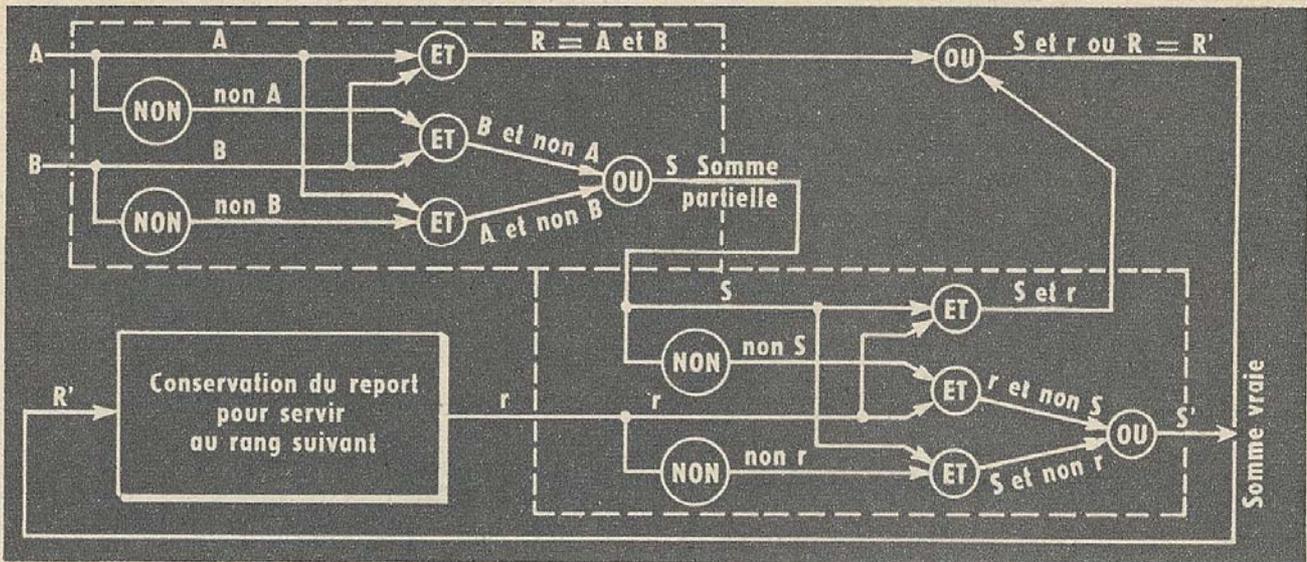
Les circuits de calcul, ou opérateurs, sont ceux où s'exécute véritablement le traitement de l'information. Ils sont généralement capables d'exécuter les quatre opérations arithmétiques, des comparaisons entre des nombres ou des libellés alphabétiques, et un certain nombre d'opérations logiques. Ils prélèvent dans la mémoire centrale les données sur lesquelles ils travaillent et y renvoient les résultats.

Les dispositifs de sortie ou d'extraction produisent à l'extérieur les informations élaborées par le traitement et qu'ils prennent dans la mémoire centrale. On trouve là des machines imprimantes, des perforateurs de cartes ou de bande, des traceurs de courbes automatiques, etc.

Enfin, des circuits de commande et d'interprétation du programme prélèvent les uns après les autres les « instructions » qui ont été enregistrées dans la mémoire centrale et les font exécuter en envoyant aux différents organes ou dispositifs de la machine des signaux de commande appropriés. Ces circuits reçoivent en outre des circuits opérateurs des informations qualitatives telles que le signe des nombres, les résultats de comparaisons... qui peuvent modifier le déroulement du programme. Ils sont par ailleurs en relation

0	_____	0
1	_____	1
2	_____	10
3	_____	11
4	_____	100
5	_____	101
6	_____	110
7	_____	111
8	_____	1 000
9	_____	1 001
10	_____	1 010
11	_____	1 011
12	_____	1 100
16	_____	10 000
32	_____	100 000
100	_____	1 100 100
1 000	_____	1 111 101 000

Un même nombre exige environ trois fois plus de chiffres en système binaire qu'en système décimal, mais on emploie seulement des 1 et des 0.



L'addition de deux chiffres binaires, opération arithmétique la plus simple, apparaît ici décomposée en fonctions logiques élémentaires : NON, ET, OU. Les deux rectangles en pointillé entourent deux groupements qui présentent exactement la même structure logique. Chacun d'eux constitue ce qu'on appelle un demi-additeur. La somme vraie apparaît et le report est mis en réserve pour servir au rang suivant.

L'addition ? Un problème de logique !

Prenons le cas de l'addition. Il y a si longtemps que nous savons la faire qu'elle nous paraît une opération simple. Ce n'est qu'une illusion : l'addition se décompose en plusieurs « opérations logiques » élémentaires qui s'expriment par les mots : NON, ET, OU. L'opération NON associe à une expression son contraire. L'opération ET associe à deux expressions une troisième qui n'est vraie que si les deux premières le sont simultanément. L'opération OU associe à deux expressions une troisième qui est vraie pourvu que l'une au moins des deux autres soit vraie.

Considérons la table d'addition binaire et deux termes à additionner, A et B. Nous dirons que l'on a « A » si A vaut 1 et « non A » si A vaut zéro, et de même pour les autres lettres. La table d'addition nous apprend :

— On a la somme « S » si l'on a : « A » ET « NON B », ou « NON A » ET « B ».

— On a le report « R » si l'on a : « A » ET « B » simultanément.

Mais cette somme n'est qu'une somme partielle, et le report n'est qu'un report partiel. Il faut ajouter le report qui peut provenir du rang précédent, donc recommencer une addition :

— On a la somme vraie « S' » si l'on a : « S » ET « NON r » OU « NON S » et « r ».

— On a le report « R' » si l'on a : « S » ET « r » ou « R ».

La figure ci-dessus donne le « schéma logique » d'un additionneur binaire complet

conforme à la théorie que nous venons d'en faire. Si l'on suppose maintenant que l'on envoie toutes les microsecondes à la place de A et B les chiffres successifs, zéros ou uns, de deux nombres binaires, on obtiendra en S', toutes les microsecondes, les chiffres successifs de leur somme.

Que le lecteur veuille bien nous pardonner l'aridité de ces raisonnements ; mais il nous a paru nécessaire de montrer avec un exemple comment les opérations demandées aux machines peuvent être analysées, réduites, décomposées en opérations logiques élémentaires.

La soustraction possède un schéma logique très voisin de celui de l'addition. La multiplication est une opération plus complexe, mais se ramène au fond à effectuer un très grand nombre d'additions.

Résumons-nous. Ce que l'on appelle « traitement de l'information » se ramène à des opérations simples : les opérations arithmétiques, addition, soustraction, multiplication, division ; des opérations de comparaisons ; des transmissions d'information d'un point à un autre d'une machine ; et c'est tout.

Ces opérations simples se ramènent elles-mêmes à des fonctions logiques élémentaires : ET, NON, OU. Les logiciens démontrent que ces trois fonctions sont suffisantes pour décomposer les raisonnements les plus compliqués. (On peut même se contenter de la fonction NON et de l'une des deux autres, mais le raisonnement prend alors un tour plus « alambiqué ».)

Maintenant seulement nous pouvons nous

tourner vers l'électronique et lui demander quels outils elle met à notre disposition pour faire de la logique.

Avant l'électronique: l'électromécanique

Le premier constituant sur lequel nous porterons notre attention n'a que des rapports lointains avec l'électronique, mais son examen est fort instructif car c'est un outil complet : c'est tout simplement le relais électromécanique.

Son principe est bien connu : un électroaimant attire, lorsqu'il est parcouru par un courant, une palette mobile qui actionne des contacts. Grâce à ce dispositif, un signal de peu d'énergie peut commander le passage d'un courant beaucoup plus intense. Un relais peut actionner deux sortes de contacts : il y a les contacts qui ne se ferment que lorsque le relais est excité; on les appelle contacts « travail »; il y a les contacts qui sont fermés lorsque le relais n'est pas excité, mais qui s'ouvrent dès qu'il est excité; on les appelle contacts « repos ». Or cette deuxième catégorie de contacts réalise la fonction logique NON. Si on excite la bobine d'un relais par un signal A, un contact repos laissera passer un courant tant que l'on n'aura pas A, et ne laissera plus rien passer dans le cas contraire. C'est bien la fonction « NON A ». Poursuivons : mettons en série, l'un derrière l'autre, les contacts travail de deux relais excités l'un par A l'autre par B. Le courant ne peut passer à travers les contacts que si A et B sont présents à la fois. C'est ainsi que nous avons réalisé la fonction « ET ». Mettons maintenant les deux contacts travail en parallèle, l'un à côté de l'autre. Le cou-

A LA MAIN

357
× 243

1071
1428
714

86751

PAR LA MACHINE

357 ---- 1 fois
+ 357 ---- 2 fois
+ 357 ---- 3 fois
décalage + 3 570 --- 1 fois
+ 3 570 --- 2 fois
+ 3 570 --- 3 fois
+ 3 570 --- 4 fois
décalage + 35 700 -- 1 fois
+ 35 700 -- 2 fois

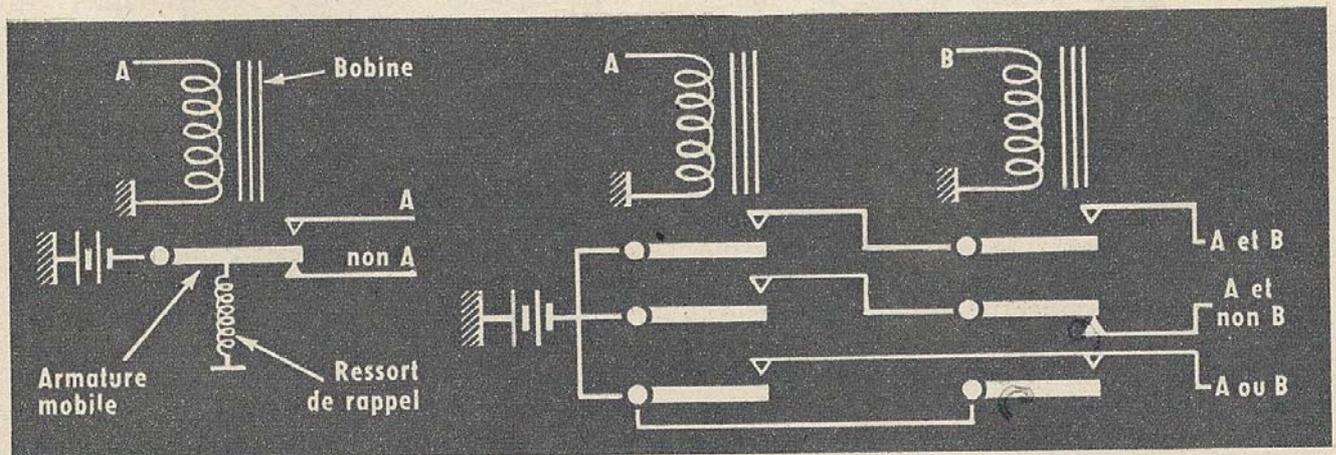
= 86 751 -- 243 fois

La multiplication est ramenée ici à une série d'additions. Les machines les plus rapides opèrent parfois différemment; certaines utilisent même la table de Pythagore, avec des circuits complexes.

rant passera pourvu que A ou B soit présent.

Le courant qui traverse les contacts ou les combinaisons de contacts des relais « fait donc de la logique » ! Il peut à son tour aller exciter les bobines d'autres relais, ce qui permet de combiner entre elles les fonctions logiques; on peut même commander le courant excitant la bobine d'un relais par les propres contacts de ce relais : on obtient ainsi, avec un branchement correct, un circuit à maintien possédant une propriété très intéressante : c'est qu'il « se souvient »; il reste dans l'état où on l'a mis jusqu'à ce qu'on décide le contraire; il conserve une information élémentaire; il constitue ce que les logiciens appellent « une mémoire unitaire ». On dira, par exemple, qu'il conserve un 1 s'il est excité et un 0 s'il ne l'est pas.

C'est la raison pour laquelle il est possible de construire des machines uniquement avec des relais, sans autres servitudes que les ali-



Le relais électromagnétique peut assurer les fonctions logiques. A gauche, la fonction NON à l'aide d'un contact « repos ». A droite, chacun des relais excités par A ou B actionne les contacts placés sous lui. On voit comment des combinaisons appropriées de contacts peuvent réaliser des fonctions logiques diverses.

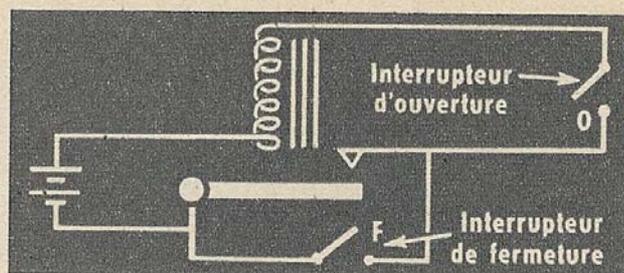
mentations en courant et les dispositifs d'introduction ou d'extraction. C'est une technique de construction sûre, économique, bien au point. On fabrique aujourd'hui des relais de types très divers, adaptés à toutes les fonctions que l'on peut leur confier; on en fait qui fonctionnent en une milliseconde et même moins, c'est-à-dire qu'il faut à peine une milliseconde à la palette pour passer de la position travail à la position repos ou vice versa. Malgré tout, ces performances ne permettent pas des vitesses de calcul très élevées; aussi cette technique reste-t-elle limitée aux machines de petite taille qui ne sont pas les moins nombreuses ni les moins utiles.

Mais aucun frein ne pouvait retenir l'imagination des utilisateurs, et le volume des problèmes posés a très vite dépassé les possibilités de l'électromécanique. Très vite il a fallu se tourner vers l'électronique qui mettait à la disposition des créateurs de machines une technique éprouvée : les tubes.

Où l'électronique apparaît pour de bon

Dès 1945 fonctionnait aux U.S.A. une machine entièrement équipée de tubes : l'ENIAC, qui n'en comptait pas moins de 18 000. Comme le relais, le tube à vide est un outil logique complet. Un tel tube est, on le sait, essentiellement constitué d'une « anode » (positive) par où arrive le courant, d'une « cathode » par où il repart, et d'une ou plusieurs « grilles » qui en commandent le débit. On sait aussi que, dans un tel tube, le courant ne passe pas lorsque la grille de commande est négative, tandis qu'il passe, et même est amplifié, lorsqu'elle est positive. La fonction logique dont la réalisation est la plus immédiate est la fonction « ET ». Supposons en effet que l'on ait placé dans un tube deux grilles de commande : le courant ne pourra passer de l'anode à la cathode que si les grilles sont positives l'une ET l'autre. Prenons maintenant un tube à une seule grille, une triode, et insérons une résistance dans la connexion d'anode; si le potentiel de la grille est négatif, aucun courant ne traverse le tube, et l'anode est à un potentiel élevé; au contraire, si le potentiel de la grille est élevé, un courant traverse le tube et produit dans la résistance une chute de tension qui abaisse le potentiel de l'anode; les signaux apparaissant sur la grille et sur l'anode sont bien le contraire l'un de l'autre; on a réalisé ainsi la fonction « NON ». Mettons enfin deux triodes en parallèle comme sur la figure page 117, et nous avons la fonction « OU ».

Pour que le parallèle avec les relais soit



Une mémoire à relais. O étant fermé, la palette se soulève quand F se ferme; et reste, même F rouvert, jusqu'à ce que O coupe le courant. Les deux états du circuit peuvent représenter 0 et 1.

complet, il faut encore trouver l'équivalent du circuit à maintien, du circuit « mémoire ». Or un tel circuit est connu depuis longtemps. Prenons deux triodes et relierions en croix la grille de l'une à l'anode de l'autre; nous réalisons un circuit qui possède deux états stables dans lesquels l'un des tubes laisse passer un courant et pas l'autre. On dit que l'un est bloqué pendant que l'autre est passant. Il suffit d'envoyer un signal sur l'une des grilles pour rendre passant le tube correspondant. Un tel circuit est appelé « bascule ». Voilà donc la fonction « mémoire » qui nous manquait. Nous avons tous les composants des circuits logiques des machines.

Tandis que les relais électromécaniques demandaient un temps de l'ordre de quelques millisecondes pour changer d'état, les tubes électroniques changent d'état en quelques fractions de microsecondes. Ils sont donc de 1 000 à 10 000 fois plus rapides. L'emploi des tubes présente encore d'autres avantages. Les circuits dans lesquels est transmise l'information ne sont pas parfaits : ils dissipent l'énergie des signaux qu'ils transmettent. Aussi faut-il redonner de l'énergie à ces signaux, les amplifier; or nous avons vu que les tubes sont capables d'amplifier les courants. On gagne donc sur deux tableaux : on fait de la logique avec les signaux, et on les amplifie avec les mêmes organes.

Malheureusement les tubes électroniques ne sont pas sans reproches; la puissance dissipée par le chauffage des cathodes est considérable et entraîne la nécessité d'installations de ventilation importantes. La dimension des tubes ne peut pas être largement diminuée sans nuire à leurs qualités. L'encombrement des tubes et des servitudes d'alimentations et de refroidissement impose la taille des machines : les distances à parcourir étant plus grandes, les temps de parcours s'allongent, donc la rapidité de travail diminue. Mais, surtout, la durée de vie des tubes est trop brève, même pour les meilleurs.

Admettons que la durée de vie moyenne des tubes soit de 5 000 heures. Cela signifie qu'au bout de 5 000 heures de fonctionnement un tube n'a plus qu'une chance sur deux d'être encore en vie. Si de tels tubes sont montés sur un récepteur radio qui n'en compte que 5 ou 6, on peut raisonnablement s'attendre à 1 000 heures au moins de fonctionnement sans panne. C'est acceptable. Mais sur une machine qui en comporte 5 000, cela peut faire une panne toutes les heures, ce qui est inadmissible.

En fait, nos chiffres sont trop pessimistes. Il faut bien dire que l'on a construit des machines à tubes qui ont donné satisfaction. Elles fonctionnent toujours, et l'on en construit encore. Mais la durée de vie des tubes est l'un des facteurs qui limitent leur emploi dans les machines à calculer électroniques. Celles-ci plafonneraient dans des voies sans issues si, discrets mais efficaces, les semi-conducteurs n'avaient pas fait leur apparition.

Les semi-conducteurs

La première application des semi-conducteurs (du germanium, d'abord, puis du silicium) fut la diode, ou redresseur, ainsi appelée parce qu'elle ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Jusqu'ici, les redresseurs connus présentaient de sérieux inconvénients pour l'usage que nous voulons en faire : les uns ne peuvent fonctionner qu'à basse fré-

quence, les autres, des tubes à vide, se prêtent aux reproches du paragraphe précédent; tous sont relativement encombrants.

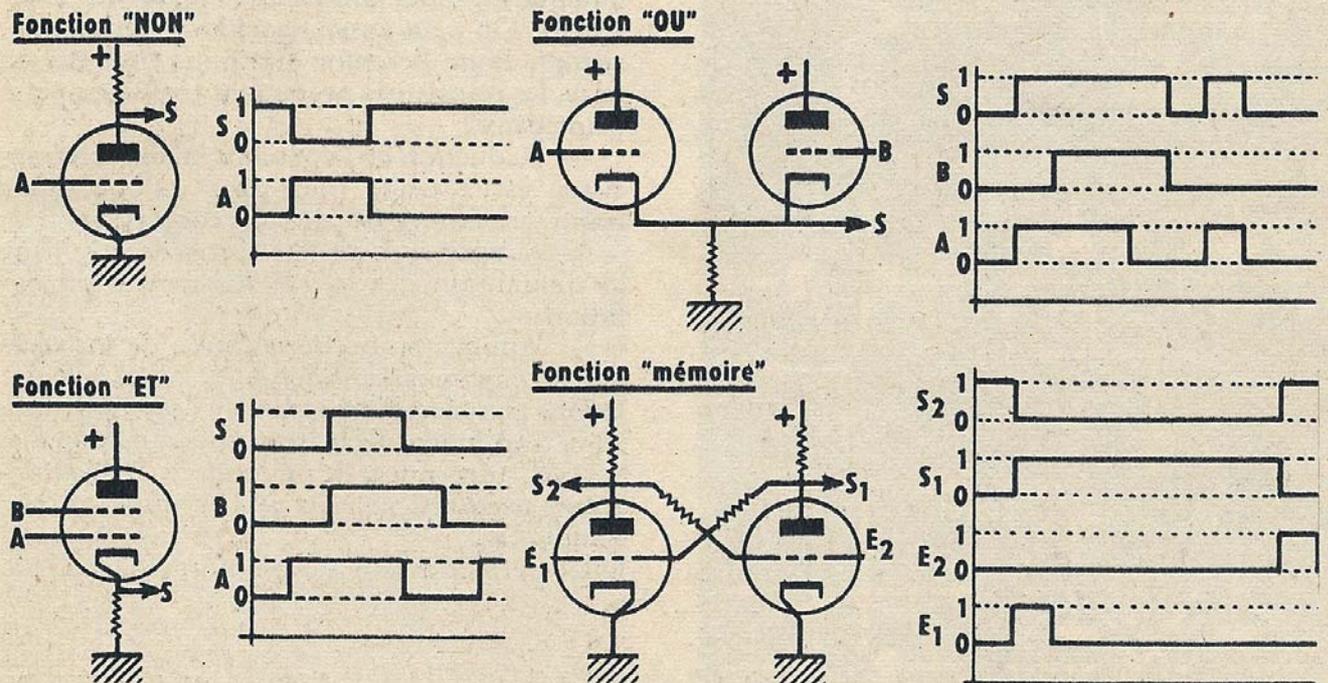
La diode au germanium s'est révélée d'emblée capable de travailler aux fréquences les plus élevées employées dans les calculateurs et elle présente un encombrement considérablement réduit.

Comment fait-on de la logique avec des diodes ? C'est ce que montre la figure page 118. Le premier schéma répond à la définition de la fonction « OU »; on a S si l'on a A OU B. Le deuxième réalise la fonction « ET ».

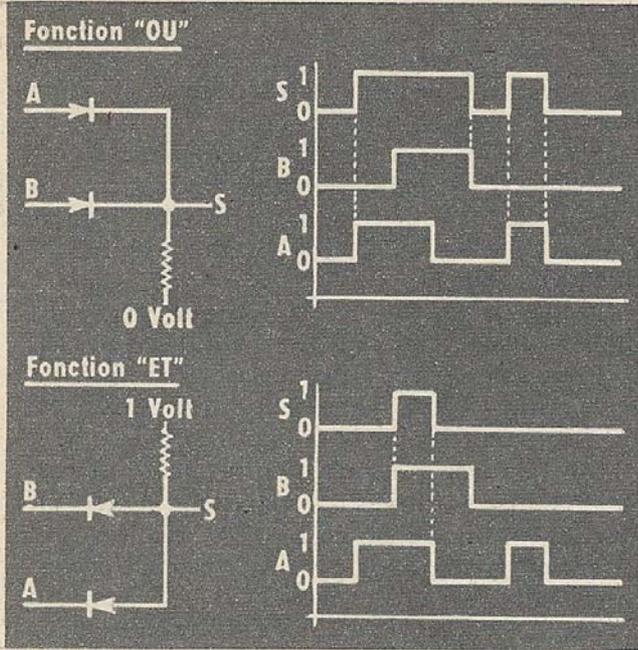
Remarquons que rien n'empêche de mettre plus de deux diodes en parallèle. C'est un moyen commode et élégant de réaliser des fonctions portant sur plus de deux variables. Ainsi peut-on avoir A ET B ET C... ou encore A OU B OU C... ; il était relativement plus difficile de multiplier le nombre de grilles de commande dans les tubes.

Autre remarque : on peut « empiler » les circuits à diodes; le point de sortie de l'un est tout simplement relié à l'entrée de l'autre. On réalise ainsi de véritables réseaux logiques à diodes matérialisant des raisonnements complexes avec une grande souplesse.

Deux inconvénients subsistent au passif des diodes. D'abord, elles sont incapables de réaliser à elles seules la fonction « NON ». Ensuite elles ne sont pas parfaites, donc elles dissipent l'énergie des signaux transmis, et sont incapables de les amplifier. Qu'à cela



Les tubes à vide, suivant leur montage, assurent les fonctions logiques élémentaires. Les diagrammes montrent les signaux de sortie obtenus en fonction des signaux d'entrée. On convient que le niveau inférieur des tensions représente le 0, et le niveau supérieur le 1. Le circuit mémoire est appelé « bascule ».



← Deux circuits à diodes assurant par des montages très simples les fonctions logiques élémentaires OU et ET. Le courant ne peut passer que dans le sens indiqué par les flèches qui figurent les diodes.

ne tienne ! on les associe avec des tubes. Aux diodes on confie les fonctions logiques, la commutation; aux tubes la fonction d'amplification qui va de pair avec la fonction logique « NON ». C'est un assez heureux compromis grâce auquel on a pu construire des machines à calculer électroniques en série. L'accroissement de sécurité dû à l'emploi des diodes au germanium a permis à ces machines, en France du moins, de sortir des laboratoires. Mais les semi-conducteurs n'avaient pas dit leur dernier mot.

Le transistor

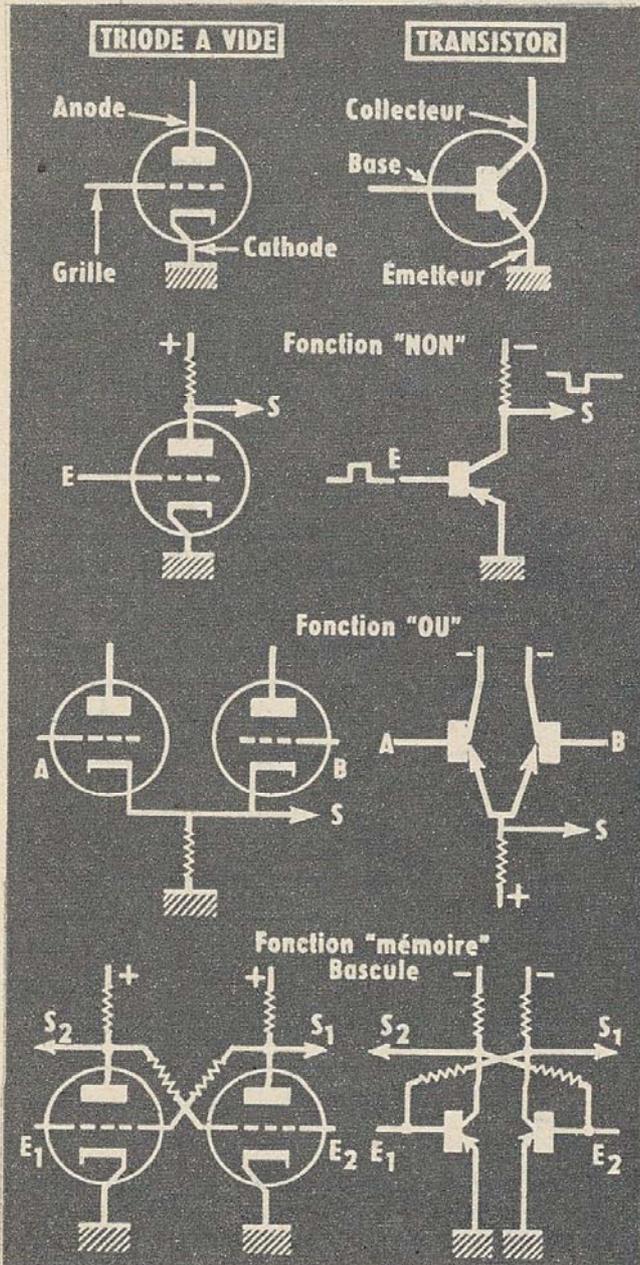
L'apparition du transistor marque l'avènement définitif des semi-conducteurs. L'amplification n'est plus désormais l'apanage des tubes à vide car le transistor est un amplificateur. Comme une triode, un transistor a trois électrodes qui n'ont pas les mêmes noms, mais remplissent les mêmes fonctions : l'« émetteur » peut jouer le rôle de la cathode, le « collecteur » celui de l'anode, la « base » celui de la grille. Ce que nous avons dit des propriétés logiques des tubes à vide s'applique donc aussi aux transistors. On peut faire des circuits logiques uniquement avec des transistors. On peut aussi associer diodes et transistors. Pour l'emploi que nous voulons en faire, les transistors présentent trois avantages principaux :

— Réduction de l'encombrement : un transistor est à peine plus gros qu'une diode (pour les faibles puissances tout au moins).

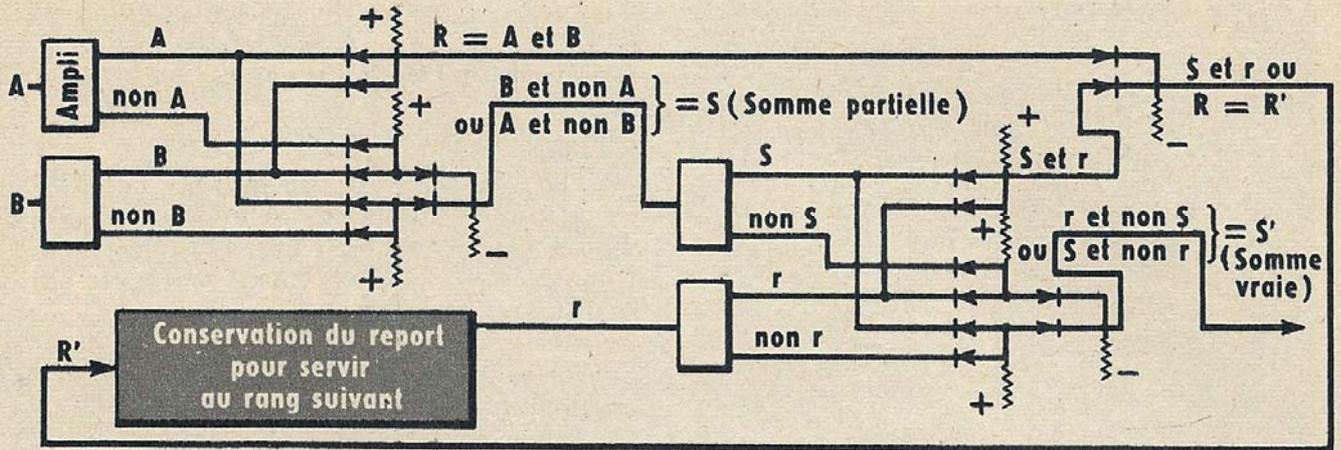
— Suppression de la tension de chauffage et diminution des autres tensions d'alimentation.

— Augmentation de la durée de vie dans des proportions considérables. Nous n'avancerons pas de chiffres précis : les transistors sont trop jeunes ! Un constructeur interrogé sur ce sujet pourrait répondre : « Un transistor usé ? Je ne sais pas à quoi ça ressemble ! »

Ce dernier avantage prime tous les autres.



← Tubes et transistors ont des organes qui jouent des rôles semblables : cathode et émetteur, anode et collecteur, grille de commande et base. Le sens des tensions est inversé dans le cas des transistors.



Réalisé avec des diodes, on retrouve ici l'additeur dont on a vu le schéma logique page 114. Les rectangles symbolisent les amplificateurs qui sont chargés de fournir le signal d'entrée amplifié et son complément.

Il est significatif de noter que les plus grosses machines qui sortent aujourd'hui ou vont sortir dans un proche avenir sont entièrement équipées de transistors. La légèreté des pièces détachées, leur faible encombrement, les basses températures de fonctionnement favorisent l'emploi poussé de la technique des circuits imprimés; donc la fabrication des machines à calculer s'automatise de plus en plus. Il y aurait beaucoup à dire sur cette automatisation. Actuellement déjà, les ingénieurs dessinent les schémas logiques; mais leurs schémas sont aussitôt transcrits et enregistrés dans d'autres machines à calculer qui déterminent elles-mêmes les schémas réels, et vont jusqu'à fournir le dessin des circuits imprimés à utiliser; il n'y a rien d'extraordinaire en cela. La machine applique sim-

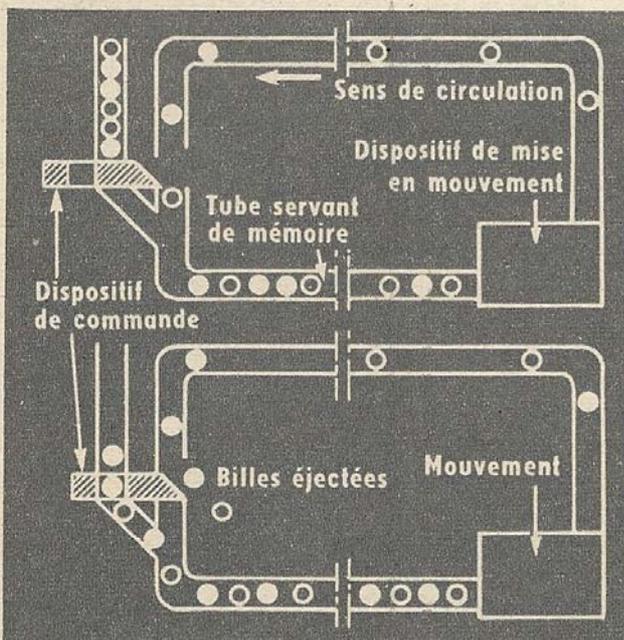
plement les méthodes de travail que l'homme aurait appliquées et qu'il lui a imposées. Mais nous n'en sommes pas encore à la machine qui se fabrique elle-même. Il y a toujours de nombreux cas particuliers, de nombreux points critiques où l'intervention de l'homme peut seule sauver la situation et rétablir l'ordre.

Nous arrêterons ici notre tour d'horizon des techniques utilisées jusqu'à cette date dans les circuits logiques des machines à calculer. Il nous faut examiner à présent une fonction essentielle : la mémoire.

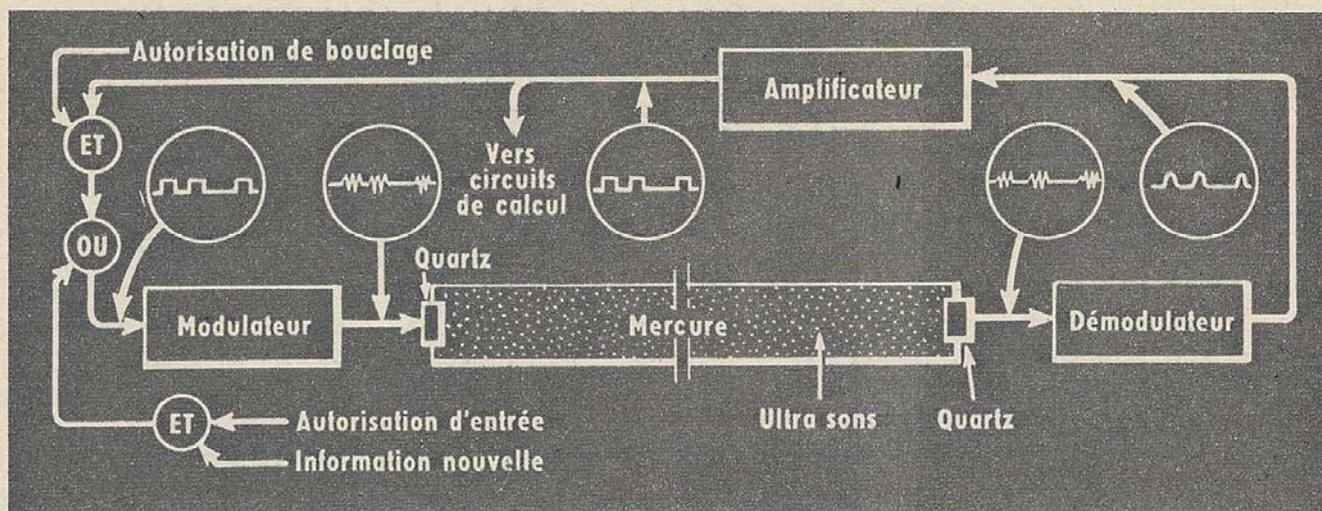
Les mémoires

On a dit que les machines à calculer étaient douées de mémoire. C'est un regrettable abus de langage. Une machine n'a pas plus de mémoire qu'un tableau noir ou un magnétophone. Cette expression est passée dans les mœurs, et faute d'un terme spécifique, nous la garderons; mais qu'on ne s'y méprenne pas : la mémoire de la machine est tout simplement un dispositif d'enregistrement dans lequel on peut « inscrire » les informations codées pour les « relire » plus tard et les effacer pour en mettre d'autres à la place.

Nous avons déjà signalé au passage comment il est possible d'employer des relais, des tubes ou des transistors pour réaliser une mémoire. Mais les circuits connus exigent deux éléments pour « mémoriser » un 1 ou un 0. C'est très coûteux. Or les problèmes



← Principe d'une mémoire à circulation, où l'information est matérialisée par la succession des billes noires et blanches dans la boucle fermée. En bas, le dispositif de commande « efface » une information périmée en éjectant les billes et introduit une information nouvelle en laissant entrer d'autres billes.



Boucle de mémoire à ligne à mercure. Les circuits logiques commandent la conservation, l'effacement et l'introduction des informations. Les oscillogrammes montrent l'allure des signaux en cinq points différents.

posés nécessitent des capacités de mémoire toujours plus élevées :

- une page dactylographiée contient de 300 à 500 caractères;
- un livre de taille moyenne en contient facilement un million;
- si l'on veut traduire un texte d'une langue dans une autre, il faut enregistrer le dictionnaire de chacune des deux langues et leurs grammaires : 10 millions de caractères ne suffisent plus;
- pour enregistrer 500 000 polices d'assurances, à raison de 200 caractères par police, une compagnie demanderait à sa machine une capacité de 100 millions de caractères.

Il était impensable de réaliser de telles capacités avec deux transistors par chiffre binaire. On connaissait plus économique.

Mémoires à ultrasons

L'idée de départ est fort simple. Les nombres ou les mots codés sont représentés par des suites de signaux qui se suivent à intervalles de temps réguliers, toutes les microsecondes par exemple. Chaque microseconde, s'il y a un signal, cela signifie UN, et s'il n'y en a pas, cela signifie ZÉRO. Imaginons un exemple : des billes qui se suivent toutes les secondes, une bille blanche voulant dire 0, une bille noire voulant dire 1. Billes blanches et noires alternent dans l'ordre voulu pour respecter le code. Enfilons dans l'ordre toutes les billes représentant un nombre ou un mot par une extrémité d'un tube cylindrique étroit. Nous avons constitué une mémoire. Pour relire le nombre ainsi conservé, il suffit d'ouvrir l'autre extrémité du tube et de laisser les

billes s'échapper une à une, seconde par seconde. Si l'on veut pouvoir recommencer l'opération, il suffit de « boucler » le système pour ramener à l'entrée les billes qui s'échappent à la sortie, en fermant le tube sur lui-même. On peut imaginer alors que les billes tournent en permanence, et qu'un chronomètre marque le début de chaque tour. Il faut supposer, bien sûr, qu'un dispositif quelconque entretient le mouvement des billes. Ajoutons à cela un « portillon » qui nous permettra de faire sortir du circuit des billes devenues inutiles (effacement) pour en mettre de nouvelles à la place, en se basant sur les indications du chronomètre, et nous aurons réalisé l'image très exacte d'une mémoire à circulation (page 119). Il ne faut évidemment pas lui demander une grande vitesse.

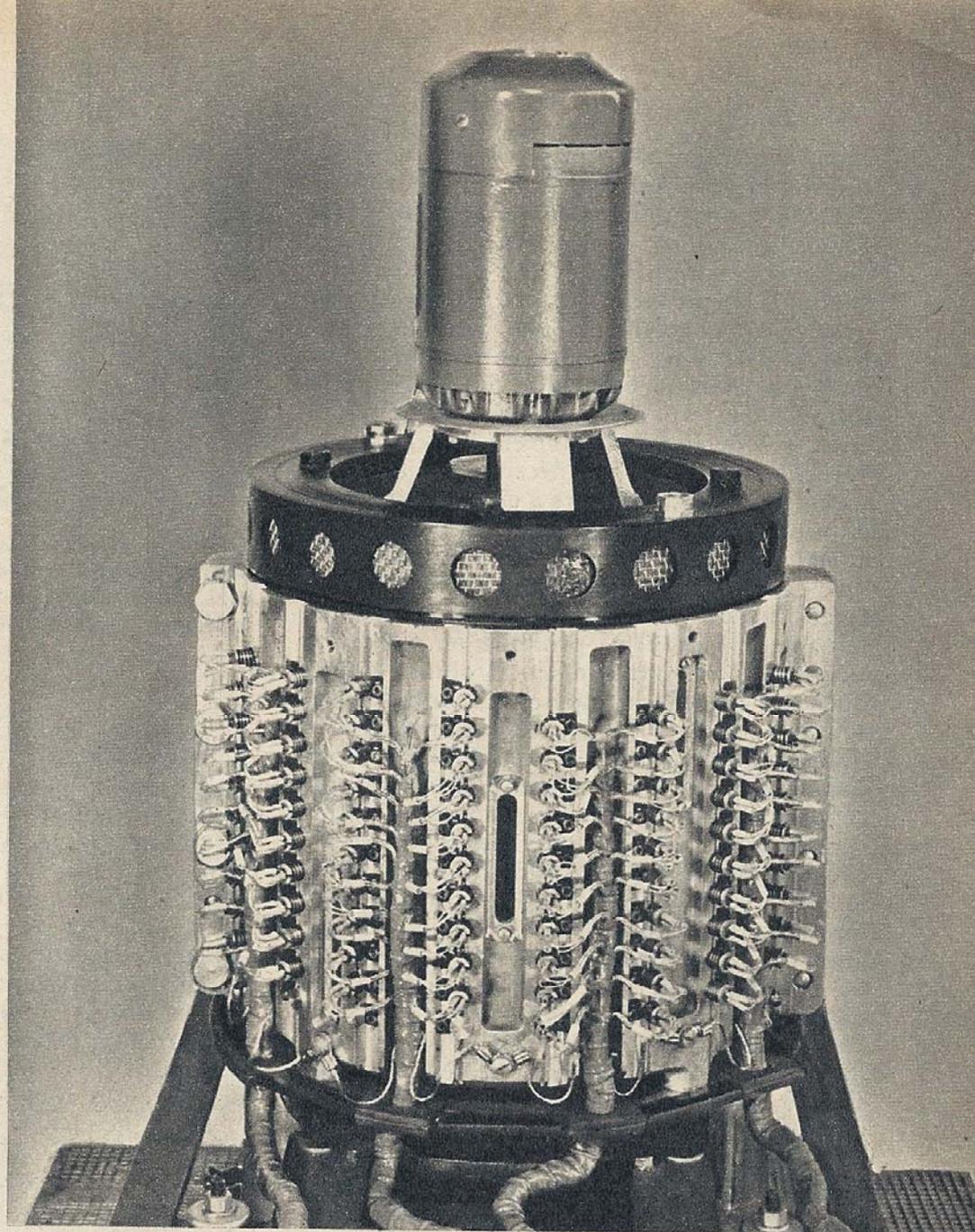
Dans la machine, les signaux employés sont des signaux électriques qui vont théoriquement à la vitesse de la lumière. Si l'on veut pouvoir loger dans une boucle 1 000 signaux à 1 microseconde, il faut une boucle parcourue en 1 milliseconde : à la vitesse de la lumière, cela fait 300 km. C'est encombrant.

On connaît, bien sûr, des circuits capables de ralentir la vitesse de propagation des signaux électriques. On les appelle des « lignes à retard »; ces lignes sont composées de bobines d'induction et de condensateurs. On les a effectivement utilisées, pour de petites capacités, avec un réel succès. Mais ce n'est pas la seule solution.

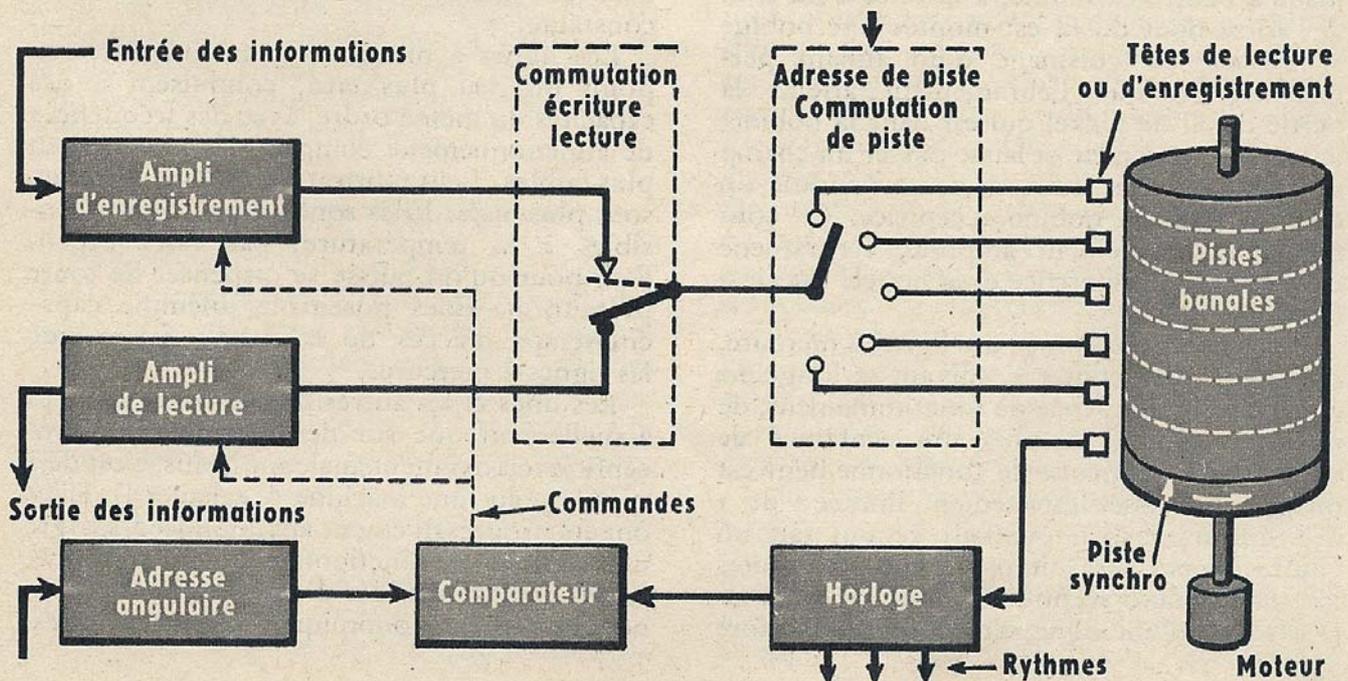
Entre la lenteur des billes et la vitesse de la lumière, il y a la vitesse du son. Dans les solides ou les liquides, il parcourt environ 1 000 m à la seconde, soit 1 m en 1 milliseconde : c'est tout à fait ce qu'il nous faut. Reste à trouver le moyen de transformer un

Mémoire à tambour magnétique

Le tambour magnétique est enfermé dans un cylindre qui porte les têtes chargées de la lecture et de l'enregistrement des informations. Le schéma général de la mémoire montre comment un mot est repéré sur le tambour par son « adresse » de piste et son « adresse » angulaire. L'adresse de piste commande la manœuvre d'un commutateur de piste. Quant à l'adresse angulaire, qui fixe la position du mot sur la piste choisie, elle est comparée aux indications d'une « horloge » pilotée par la piste spéciale de synchronisation qui est lue en permanence sur le tambour ; le comparateur délivre la commande de fonctionnement aux amplificateurs de lecture ou d'enregistrement.



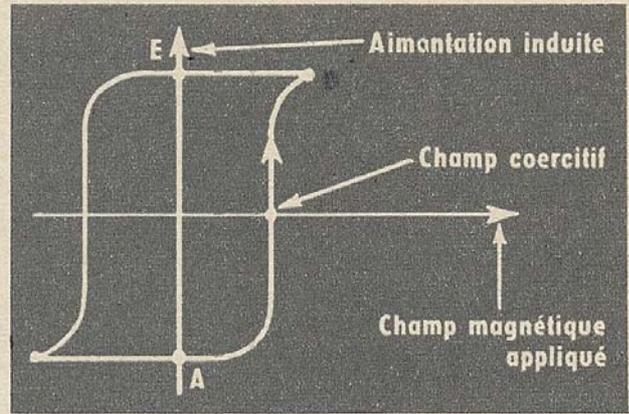
Bull



signal électrique en signal sonore (ou ultrasonore) et réciproquement.

Deux moyens principaux sont à notre disposition, dont l'un, connu depuis longtemps, est aujourd'hui très largement répandu : la piézoélectricité. Un cristal de quartz convenablement taillé qui vibre sous l'action d'un son développe entre deux de ses faces une tension électrique qui vibre de la même façon. Inversement, si l'on applique entre ses deux faces une tension électrique variable, il se déforme mécaniquement de la même façon. Fixons alors à chaque extrémité d'un tube d'un mètre de long environ, un tel cristal de quartz, et remplissons le tube avec un liquide : du mercure, par exemple. Excitons l'un des quartz par le signal représentant un mot. Il va produire un son (plus exactement un ultrason, étant donné la fréquence à laquelle on opère). Cet ultrason va se propager dans le mercure, et au bout d'une milliseconde environ, va atteindre l'autre quartz qu'il va faire vibrer. Ce quartz récepteur va transformer l'ultrason reçu en un signal électrique identique à celui qui avait excité le premier quartz. On l'amplifie, et on le réinjecte à l'entrée du dispositif : la mémoire est constituée. Nous avons encore un autre moyen pour convertir l'un dans l'autre un signal électrique et un signal sonore : la magnétostriction. Cet effet est très analogue au précédent ; au lieu de quartz, prenons un morceau de nickel ; au lieu de tension électrique, un champ magnétique. Engageons l'extrémité d'un fil de nickel dans une bobine. Si l'on fait passer un bref courant dans la bobine, le champ magnétique créé provoque une rapide contraction du nickel, véritable choc qui va se propager tout le long du fil jusqu'à l'autre extrémité, à la vitesse du son. A l'autre bout du fil est montée une bobine semblable, au voisinage d'un aimant permanent. Lorsque l'ébranlement atteint la partie du fil de nickel qui est dans la bobine, le métal se contracte et laisse passer un champ magnétique plus intense, ce qui induit un courant dans la bobine réceptrice. Ce courant, convenablement amplifié, est ramené dans la bobine émettrice et la boucle est ainsi fermée.

On a d'abord employé des lignes à mercure. Une ligne peut contenir, suivant sa longueur et suivant la fréquence de fonctionnement, de quelques chiffres à plusieurs centaines de chiffres. La fréquence de fonctionnement est malgré tout assez étroitement limitée : de 1 à 2 mégacycles en général ; ce qui fait un chiffre toutes les microsecondes ou toutes les demi-micro-secondes. Pour augmenter la capacité d'une ligne, c'est-à-dire le nombre



Un cycle d'hystérésis rectangulaire : l'aimantation induite ne peut prendre que deux valeurs opposées. Pour passer de A à E, par exemple, il faut appliquer un champ supérieur au champ coercitif.

de chiffres qu'elle contient, on ne peut qu'augmenter sa longueur. Mais alors la durée totale d'un tour augmente en proportion et il faut attendre plus longtemps pour « avoir accès » à une information quelconque de la mémoire (ce temps est en moyenne la durée d'un demi-tour). Nous voyons apparaître ici dans sa forme la plus simple le dilemme capacité-temps d'accès : si l'on veut enregistrer un grand nombre d'informations, on les obtient moins vite ; si l'on veut les obtenir vite, il faut en enregistrer moins. La nécessité d'un tel compromis se retrouve dans presque tous les systèmes de mémoires.

Les lignes à mercure sont d'une fabrication et d'un entretien délicats. Elles sont en outre très sensibles aux variations de température (la vitesse du son varie avec la température). C'est pourquoi elles sont toujours enfermées dans une enceinte maintenue à température constante.

Les lignes à nickel, qui ont été mises au point un peu plus tard, conduisent à des capacités du même ordre, avec des fréquences de fonctionnement comparables ou un peu plus faibles. Leur fabrication et leur entretien sont plus aisés. Elles sont un peu moins sensibles à la température ; pas assez cependant pour qu'on puisse se dispenser de toute précaution. Elles posent le dilemme capacité-temps d'accès de la même façon que les lignes à mercure.

Les unes et les autres ne sont plus utilisées actuellement que sur des machines de conception relativement ancienne (5 ans, c'est déjà vieux, pour une machine à calculer !). Elles ont été progressivement abandonnées, malgré une sécurité de fonctionnement satisfaisante, au profit des procédés d'enregistrement magnétiques, plus économiques et plus souples.

La notion d'adresse

Avant de fermer le chapitre des mémoires à circulation, répondons encore à une question : comment repérer l'information dans une ligne ? A propos du modèle à billes, nous avons parlé d'un chronomètre qui marquait le début de chaque tour. Il y a effectivement dans toute machine un système que l'on appelle « horloge » ou « base de temps » qui joue le rôle de chronomètre. Les signaux de temps qu'il délivre s'appellent des « rythmes ». Il y a un rythme rapide qui marque la cadence des impulsions représentant les chiffres : toutes les microsecondes, par exemple. Un rythme lent marque les tours de boucle : toutes les millisecondes. Entre les deux, un rythme intermédiaire marque des intervalles sous-multiples du tour de boucle. Ces intervalles de temps correspondent à la longueur normale d'un nombre ou d'un mot. Une ligne contient donc un certain nombre entier de mots ou de nombres. Chacun d'eux est repéré par un numéro qui est simplement l'ordre dans lequel les mots défilent à l'entrée de la mémoire. Chaque ligne a reçu elle aussi un numéro, s'il y en a plusieurs. On pourra dire ainsi : « le troisième mot de la cinquième ligne ». L'ensemble de ces deux numéros constitue l'« adresse » du mot : ici l'adresse 53. Dans une machine, une adresse est un peu comme un numéro de téléphone. Quand on compose un numéro sur le cadran d'un appareil, des circuits sélecteurs mettent automatiquement l'abonné en communication avec son correspondant. Dans nos machines également, on trouve des circuits sélecteurs capables de mettre en communication la case de mémoire dont on leur précise l'adresse, avec les circuits de calcul. Le téléphone automatique est suffisamment connu de tous aujourd'hui pour que nous puissions nous dispenser d'insister sur ces dispositifs.

Les mémoires magnétiques

Le ruban magnétique qui sert à enregistrer de la musique ou des discours peut aussi bien enregistrer des tops successifs. Convenons que les tops représentent les « 1 » et l'absence de tops les « 0 ». Sur les bandes employées dans les machines à calculer, on enregistre couramment sur 7, 8, 10 pistes, parfois plus. Pour cela on juxtapose autant de « têtes » d'enregistrement ou de lecture qu'il y a de pistes. L'une de ces pistes porte un signal régulier, une série de tops où pas un ne manque, et qui sert de référence. On appelle cette piste la piste de « synchronisation ».

Elle sert à marquer les emplacements où l'on peut enregistrer les combinaisons de 1 et de 0 formant les caractères. Il est ainsi possible de constater, au droit de chaque signal de synchronisation, la présence ou l'absence de tops, lors de la lecture.

L'appareil utilisé dans les machines a la même structure que les magnétophones, en plus perfectionné. La bande est portée par deux bobines, entre lesquelles se trouve le groupe de têtes de lecture et d'enregistrement. Elle défile devant les têtes à une vitesse qui doit être aussi constante que possible et assez élevée : ordinairement 1 à 2 mètres par seconde. Un rebobinage rapide permet le réenroulement à une vitesse de 10 à 15 mètres par seconde. Les bandes utilisées ont une longueur de 800 à 2 000 mètres en moyenne, selon les modèles. Il est pratiquement impossible de fonctionner en enregistrement ou en lecture *continus*, parce que la durée de traitement de l'information est variable, et pour bien d'autres raisons. La machine procède un peu comme une dactylo qui écoute sur son magnétophone une phrase dictée, l'arrête, et tape alors ce qu'elle a entendu, puis recommence. En procédant ainsi, elle risque de couper le début ou la fin des phrases, à moins que les intervalles entre phrases ne soient assez longs. De toutes façons, la secrétaire comprend quand même, car elle est intelligente ; et si elle n'a vraiment pas compris, elle ramène la bande en arrière et recommence la lecture. Mais il n'est pas permis de courir un tel risque dans un traitement d'information. On ne doit pas perdre le plus petit signe car la machine, par essence inintelligente, ne saurait pas s'y retrouver. Aussi doit-on prévoir systématiquement des espaces morts, dits espaces « d'arrêt-marche » dans lesquels on n'enregistre rien. Comme ce sont des espaces perdus pour l'information, il y a lieu de les réduire au strict minimum, ce qui signifie que le dispositif d'entraînement doit être capable de démarrer ou d'arrêter la bande en très peu de temps (quelques millisecondes seulement). Comme il ne saurait être question d'accélérer ou de freiner les bobines aussi vigoureusement, il faut prévoir de chaque côté de la tête une longueur de bande libre assez grande. Ces boucles de réserve sont enroulées sur des galets mobiles disposés en chicane, ou bien encore aspirées dans deux « puits » par une dépression, de façon à présenter le moins d'inertie possible. Toutes ces conditions sont très sévères, et la partie mécanique et électrique d'un appareil dérouleur de bande magnétique est complexe et chère. A ce point de vue, il n'y a aucune

commune mesure entre un magnétophone banal et l'un de ces appareils.

La qualité de la bande magnétique elle-même doit être excellente. En effet, un défaut minuscule, un grain, une poussière, passent absolument inaperçus dans un enregistrement sonore. Dans un enregistrement numérique, ils risquent de faire disparaître un chiffre, et alors tout est faussé. C'est tellement important que l'on a étudié des systèmes nombreux pour détecter les erreurs de ce genre. Certains écrivent l'information en double sur la bande. Lorsqu'on la relit, on compare les deux enregistrements et si l'un d'eux est altéré, on en est averti. C'est un procédé cher. Un moyen plus économique consiste à adjoindre à chaque nombre un nombre clef, composé suivant une certaine loi : par exemple celle qu'on utilise quand on fait la preuve par 9. Si l'un des chiffres se trouve altéré par suite d'un défaut de la bande, le nombre clef ne correspond plus, et l'on est averti de l'erreur.

L'une après l'autre, les constructeurs ont surmonté toutes les difficultés techniques rencontrées dans la réalisation de ces appareils, et ils proposent aujourd'hui un matériel bien au point. Citons quelques chiffres. Les appareils actuels sont capables d'enregistrer ou de lire de 10 000 à 60 000 caractères par seconde. Une bande de 2 000 mètres peut enregistrer jusqu'à 10 ou 20 millions de caractères dans les matériels poussés.

En contrepartie, le dilemme capacité-temps d'accès se pose d'une façon encore plus aiguë. Si l'on recherche les informations dans un ordre quelconque sur la bande, il faut faire défiler en moyenne le tiers de la bande pour accéder à l'information désirée; ce qui demande en général plusieurs dizaines de secondes. Et le problème n'est pas radicalement transformé en diminuant la longueur de la bande, ni en multipliant le nombre des dérouleurs. Il faut trouver des méthodes de travail adaptées : éviter d'avoir à procéder à une recherche aléatoire; travailler sur informations triées, classées; c'est d'autant plus imaginable que les bandes magnétiques servent en général à l'enregistrement de fichiers, de tables, de catalogues, où il existe un ordre naturel de classement. Mais ce n'est pas toujours possible.

Quoi qu'il en soit, les mémoires à bande magnétique ont doté les machines à calculer de capacités d'enregistrement énormes, surtout si l'on remarque que les bandes sont interchangeables, et qu'on peut mettre successivement sur un même dérouleur un nombre quelconque de bobines. L'enregistrement magnétique a ouvert aux machines

à calculer des domaines d'application qui leur étaient restés interdits.

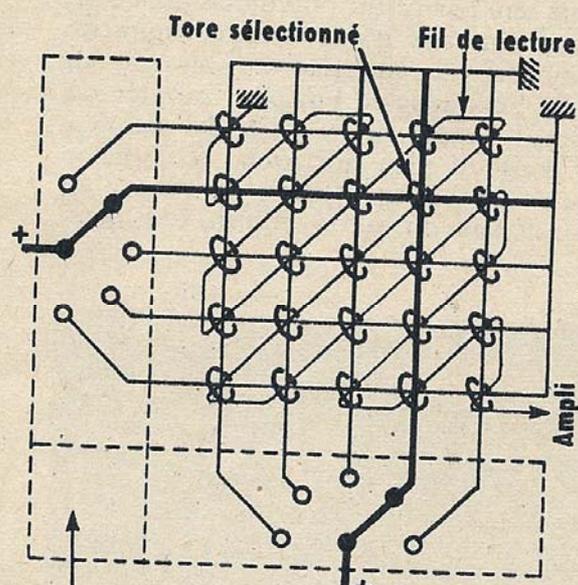
Une autre propriété fondamentale des mémoires magnétiques que le lecteur a certainement remarquée est le caractère permanent de l'enregistrement. Tandis que les informations contenues dans une mémoire à circulation disparaissent dès que la machine n'est plus sous tension, obligeant ainsi à tout introduire de nouveau dès que l'on reprend le travail, les mémoires magnétiques conservent les informations enregistrées aussi longtemps qu'on le désire, que la machine soit ou non sous tension. Et cette propriété nouvelle des mémoires a transformé les méthodes d'utilisation des machines à calculer.

Les tambours magnétiques

Un autre dispositif d'enregistrement magnétique qui semble avoir été mis au point avant l'enregistrement codé sur bandes, est le « tambour magnétique ». La couche magnétique impressionnable n'est plus disposée sur une bande souple, mais sur la surface latérale d'un cylindre qui tourne en permanence autour de son axe. Devant cette surface, sur toute la hauteur du cylindre, sont disposées les têtes de lecture et d'enregistrement; chacune d'elles voit passer en permanence toujours la même piste. On retrouve un peu l'organisation des mémoires multiples à circulation. Sur le tambour, les divers emplacements où l'on peut enregistrer des nombres sont repérés par une adresse; une partie de cette adresse sert à désigner le numéro de la piste intéressée; l'autre partie désigne, dans cette piste, l'emplacement choisi. Comme pour les mémoires à circulation, une horloge synchronisée sur le tambour sert de base de temps pour toutes les opérations de lecture, d'enregistrement, ou de sélection d'adresses. Le plus souvent, on utilise à cet effet une ou plusieurs pistes du tambour lui-même sur lesquelles on a enregistré une fois pour toutes les tops, les repères, marquant le rythme rapide, le rythme lent correspondant à un tour de tambour, et le rythme intermédiaire marquant les limites de mots.

Le nombre de pistes atteint couramment la centaine; les plus gros modèles ont jusqu'à 300 pistes environ. Chaque piste contient de plusieurs centaines à plusieurs milliers de caractères; la durée d'un tour varie dans de grandes proportions: il y a des tambours rapides qui tournent à plus de 20 000 tours par minute, mais leur capacité est limitée. Il y a des tambours lents qui tournent à 1 500 tours par minute, mais ont

La prodigieuse mémoire à ferrites livre ses informations en moins d'un cent-millième de seconde



Commutation des fils de ligne et de colonne

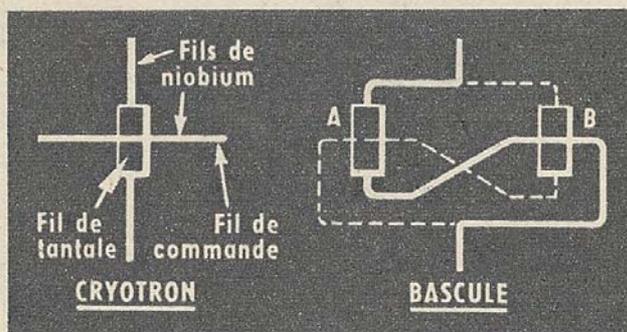
Le tore magnétique à l'intersection de la 2^e ligne et de la 4^e colonne est seul traversé par un courant assez fort pour changer son état magnétique. On remarquera le fil de lecture qui traverse tous les tores. Ci-contre, matrice de 4 096 tores magnétiques

une capacité bien plus grande. En chiffres ronds, on peut arriver à enregistrer un million et demi de caractères sur un tambour.

La construction d'un tambour magnétique est une opération délicate : la surface magnétique doit être absolument sans défauts. De plus, les têtes de lecture et d'enregistrement sont à moins d'un centième de millimètre de la couche mais ne doivent à aucun prix la toucher. Cela veut dire que le tambour doit tourner rond à quelques microns près. C'est dire à quel point son usinage et son équilibrage doivent être soignés.

Du point de vue capacité, on peut dire que la bande magnétique est à une dimension, et que le tambour magnétique en possède deux. La mémoire à disques est une des premières réalisations de mémoire à trois dimensions.

Une telle mémoire est constituée d'une pile de disques revêtus d'une couche magnétique sur leurs deux faces. Sur chacune des faces un certain nombre de sillons concentriques sont très exactement l'équivalent des pistes d'un tambour magnétique. Une face de disque offre une capacité d'enregistrement sensiblement équivalente à un tambour. Une pile de disques en comporte facilement une cinquantaine. L'ensemble a donc une capacité d'enregistrement de plusieurs millions à plusieurs dizaines de millions de caractères. Il serait difficile, et d'ailleurs inutile, de disposer une tête par piste; on équipe généralement ces mémoires d'un nombre limité de têtes mobiles. Chaque tête est montée au bout d'un bras articulé qui peut monter ou descendre le long de la pile de disques, pivoter dans un plan horizontal (comme le bras d'un tourne-disques) pour se mettre en place au-dessus du sillon choisi. Ces deux



Le cryotron est d'une simplicité remarquable dans son principe : un courant dans le fil de commande arrête le courant dans le fil de tantale. A droite, une mémoire à cryotron où le courant passant dans A bloque celui passant dans B et réciproquement. Ces deux états peuvent représenter le 0 et le 1.



Une traductrice électronique d'anglais en Braille qui fonctionne à raison de 4 000 mots par minute. C'est une IBM 704 où les règles de traduction, en

degrés de liberté correspondent à deux dimensions; la troisième est l'angle définissant la partie de sillon utile. Le temps d'accès à une information quelconque est différent d'un cas à l'autre. Si le bras se trouve déjà au-dessus du disque voulu, un faible et rapide déplacement l'amènera sur le sillon utile. Si l'information recherchée se trouve sur une autre face, il faut sortir le bras d'entre les disques, le déplacer verticalement, puis le réintroduire au-dessus de la face choisie. Ce mouvement prend nécessairement un temps plus long qui n'excède pas cependant une ou deux secondes.

Le principe d'une telle mémoire est séduisant, mais sa réalisation présente un certain nombre de difficultés : en particulier, comment faire en sorte que la tête soit toujours à bonne distance de la couche dans n'importe quelle position? Le problème a été résolu en la faisant flotter. Nous disons bien : la tête flotte sur une mince couche d'air ou d'huile; le fluide est injecté par un orifice judicieusement placé avec un débit réglé automatiquement. On conçoit que la mise au point de ces mécanismes ait posé des



particulier celles assez complexes d'abréviation, ont été enregistrées dans une mémoire et qui livre la traduction sur cartes perforées. Une machine

spéciale, à droite, lit ces cartes perforées et grave automatiquement les plaques métalliques qui serviront à l'impression définitive en relief.

problèmes sérieux. On sait aujourd'hui faire flotter une tête avec assez de souplesse et de précision pour suivre fidèlement les irrégularités de surface ou le gauchissement des disques, de telle sorte que l'enregistrement et la lecture se fassent dans des conditions convenables.

Les mémoires à ferrites

Il s'agit encore de mémoires magnétiques mais d'un principe tout différent. Le matériau utilisé est un matériau magnétique susceptible d'être aimanté, comme l'acier, mais capable de passer très brutalement d'un sens d'aimantation à l'autre si le champ magnétique extérieur qui lui est appliqué dépasse si peu que ce soit une valeur critique appelée « champ coercitif »; tant que l'on reste en-dessous de cette valeur critique, si près qu'on s'en approche, l'aimantation du matériau ne change pas. Les physiciens traduisent cette propriété en disant que le matériau en question a un « cycle d'hystérésis » rectangulaire, comme le montre la figure page 122. Pour le genre d'applications envi-

sagées, il était important de trouver un matériau dont le cycle fût un rectangle presque parfait. Les recherches faites dans ce sens ont abouti à des alliages obtenus sous forme de poudres frittées, fabriquées selon des techniques spéciales que nous ne décrirons pas ici; on a appelé ces matériaux des « ferrites ». La forme la plus courante sous laquelle on les utilise est le tore (ou anneau) avec un diamètre qui varie d'un millimètre à un ou plusieurs centimètres selon leur destination.

Le lecteur a déjà compris que les deux sens d'aimantation permettent de représenter les deux chiffres binaires, le un et le zéro. Voyons comment se font l'enregistrement et la lecture dans un tore magnétique.

On sait qu'un courant électrique est toujours accompagné d'un champ magnétique. Si un conducteur parcouru par un courant traverse un tore, on peut envoyer un courant assez intense pour aimanter le tore dans un certain sens. En envoyant le même courant en sens inverse, on va renverser le sens d'aimantation du tore. C'est ainsi que l'on enregistre un 1 ou un 0. Perfectionnons le

dispositif. Tendons sur un cadre carré 10 fils horizontaux et 10 fils verticaux. A chacune des intersections, plaçons un tore traversé par les deux fils. Un tore quelconque est repéré par le numéro du fil horizontal et par le numéro du fil vertical qui le traversent. L'ensemble de ces deux numéros constitue l'adresse du tore considéré. Supposons tous les tores dans l'état signifiant 0. Nous voulons enregistrer un 1 dans le 3^e tore de la 4^e ligne. Pour cela, nous enverrons dans le fil de la 3^e colonne la moitié du courant nécessaire pour aimanter le tore dans le sens 1. C'est insuffisant pour aimanter les tores et tous vont rester dans l'état 0. Nous enverrons en même temps dans le fil de la 4^e ligne la moitié du courant d'aimantation. Tous les tores de cette ligne vont rester dans l'état 0, sauf celui qui est à l'intersection de la 3^e colonne et de la 4^e ligne qui va, seul, être traversé par un courant suffisant pour l'aimanter. Donc il enregistrera un 1. Après quoi, en changeant l'adresse et en recommençant ce processus, on pourra enregistrer un 1 dans un autre tore, et ainsi de suite.

Et pour relire ? Supposons qu'un fil supplémentaire traverse tous les tores, et relierons ce fil à un amplificateur. Lorsqu'un tore passe d'un état magnétique à un autre on recueille un signal sur ce fil. La méthode de lecture est donc simple : pour lire un tore, essayons de le remettre à zéro. Nous enverrons ainsi sur chacun des deux fils portant le tore la moitié du courant nécessaire pour l'aimanter dans le sens 0. Les 99 autres tores seront traversés par un courant nul ou au plus égal à la moitié du courant de remise à zéro, et aucun ne changera d'état indûment. Quant à celui qui nous intéresse, il changera d'état s'il était à 1, et restera à 0 s'il y était déjà. Donc le fil supplémentaire de lecture recueillera un signal si le tore était à 1 et rien s'il était à 0. On pourra lire de la même façon n'importe quel tore du carré. Un tel élément de mémoire s'appelle une « matrice » de tores. C'est une mémoire à deux dimensions. Les plus grandes matrices réalisées n'ont guère plus de 10 000 tores. Avec des dimensions plus grandes, le bruit dû aux imperfections des tores devient très gênant.

Mais rien n'empêche de superposer un certain nombre de matrices, constituant alors une mémoire à trois dimensions pour augmenter la capacité. En commandant simultanément tous les tores qui ont même adresse dans tous les plans, on enregistrera ou relira d'un seul coup tous les caractères d'un nombre ou d'un mot. Voilà comment sont constituées les mémoires à ferrites ou à tores.

Les capacités économiques réalisables ne

sont pas énormes : de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de caractères. Mais le plus gros avantage de ces mémoires réside dans leur faible temps d'accès. Quelle que soit l'adresse proposée, le temps d'accès est le même; il est généralement d'une dizaine de microsecondes. On arrivera peut-être à 1 ou 2 microsecondes. Les qualités propres des mémoires à tores les désignent incontestablement pour jouer le rôle de mémoire centrale dans les machines. Elles seules sont naturellement capables de réagir assez vite aux sollicitations multiples des dispositifs d'entrée et de sortie, des circuits de calcul, et des circuits de commande.

L'électronique du zéro absolu

Nous n'avons pas décrit toutes les applications de l'électronique aux machines à calculer arithmétiques, et bien que nous ayons laissé dans l'ombre celles qui n'ont pas eu une large diffusion ou celles qui sont restées limitées à des cas spéciaux, nous n'avons pu nous défendre de donner à cet exposé l'aspect d'une énumération fastidieuse. Qu'il nous soit permis cependant d'ajouter encore un mot sur l'une des applications les plus curieuses de ce que l'on a appelé « l'électronique du zéro absolu ».

Le nouveau dispositif s'appelle le « cryotron ». C'est le plus simple qui ait jamais été imaginé. Il se compose uniquement d'un fil métallique croisant un autre fil métallique isolé du premier. C'est vraiment tout ! Mais il faut que l'ensemble soit à une très basse température : dans de l'hélium liquide, par exemple. Sur quel phénomène physique repose ce dispositif ? Sur la supra-conductivité, c'est-à-dire sur la propriété qu'ont les métaux de devenir des conducteurs parfaits à des températures voisines du zéro absolu (-273°C). La température critique en-dessous de laquelle la résistance d'un métal s'annule brutalement dépend du métal, et aussi du champ magnétique. Elle décroît à mesure que le champ magnétique augmente. Fabriquons un cryotron en croisant un fil de niobium et un fil de tantale et en plongeant le tout dans l'hélium liquide. Tant qu'il ne passe aucun courant dans le niobium, il n'y a donc pas de champ magnétique et le tantale est supra-conducteur, c'est-à-dire qu'il laisse passer un courant sans lui opposer de résistance. Faisons maintenant passer un courant dans le fil de niobium; cela ne demande pas d'énergie puisqu'il est supra-conducteur. Ce courant va créer un champ magnétique qui va abaisser la température critique du tantale; comme il est maintenu à température

constante (par l'hélium bouillant) il va cesser d'être supra-conducteur et opposer au courant qui le traversait précédemment une résistance un million de fois plus grande. C'est-à-dire qu'il se comporte comme un véritable interrupteur. Le cryotron est fonctionnellement équivalent à un relais qui n'aurait qu'un contact repos; et nous savons qu'avec ce seul moyen, avec cette seule fonction logique, on peut faire la synthèse de toutes les autres.

Bien sûr, il faut une installation de liquéfaction d'hélium. Mais à une époque où l'on prouve la rentabilité du transport de gaz naturel d'un continent à l'autre sous forme liquide à -170° , cette difficulté ne nous arrête pas! D'autant plus que les progrès de la miniaturisation des constituants des machines et des pièces détachées de l'électronique vont faire encore un bond en avant grâce à ces techniques nouvelles. Aujourd'hui encore, géantes impressionnantes, les machines de demain verront à la fois leur taille diminuer et leurs performances s'accroître dans des proportions que nous avons peine à imaginer. Nous nous sommes exprimés en microsecondes; dans les laboratoires on parle maintenant de milli-microseconde, c'est-à-dire de milliardième de seconde. Pendant cet intervalle de temps qui défie l'imagination, la lumière parcourt la distance énorme de... trente centimètres! Oserait-on en conclure que la technique d'avant-garde ne voit pas loin?

Faire une multiplication en 0,1 microseconde; enregistrer des milliers de caractères sur une surface de quelques centimètres carrés, avec un temps d'accès de moins d'une microseconde; voilà les limites raisonnables qu'on peut atteindre dans un avenir plus ou moins éloigné. Mais il n'est pas impossible que d'ici là, de nouvelles découvertes repoussent ces limites avant même qu'on les ait atteintes.

Le paramétron, modèle du neurone

Nous n'avons rien dit des « paramétrons » qui sont essentiellement des oscillateurs non linéaires. Or des machines fonctionnant avec ces circuits élémentaires ont été présentées à la dernière exposition « Auto-Math », à Paris, en juin 1959. Les paramétrons se prêtent comme les autres outils que nous avons examinés à la réalisation des fonctions logiques de base. Leur théorie est très ardue; nous ne l'aborderons pas. Mais les paramétrons se prêtent aussi à l'emploi de logiques majoritaires qui sont plus générales

que celles que nous avons utilisées dans cet exposé. Il se trouve alors que, tant dans son circuit que dans son fonctionnement, le paramétron est un « modèle » analogue aux neurones qui constituent les nerfs et le cerveau. Attention : ce n'est qu'une image grossière de ce que nous pensons être actuellement un neurone. Reste à savoir si une telle analogie sera source de progrès dans nos connaissances, ou si elle restera simple curiosité de laboratoire. Nous n'en sommes pas au cerveau artificiel, loin de là.

Puissance et limites des machines

Il convient à présent de prendre un peu de recul afin de mesurer la puissance et les limites des machines que nous savons construire. Cherchons d'abord à discerner, parmi les caractéristiques que nous avons mises en évidence, celles qui ne sont que simples améliorations et celles qui élèvent radicalement le degré de perfection des machines en leur ouvrant l'accès à un ordre supérieur d'activités.

La vitesse de calcul. Cette vitesse ne fait que croître. Mais l'effet premier de cette vitesse est uniquement de ramener à l'échelle humaine la solution pratique de problèmes démesurés. C'est un avantage considérable, mais il n'y a là qu'une contraction artificielle de l'échelle des temps. C'est à mettre en parallèle avec le raccourcissement artificiel des distances dû à l'augmentation des vitesses de nos moyens de transports.

La capacité des mémoires. Là encore, rien qui doive nous étonner. En soi, la capacité de mémoire ne modifie pas le degré de perfection des machines. C'est la condition de l'éclosion de possibilités ultérieures. Ce n'est pas, cela ne sera pas une faculté nouvelle.

L'extension du programme de travail. Le fonctionnement total d'une machine est déterminé à chaque instant par une suite d'instructions constituant un programme. Ces instructions choisies dans une liste restreinte mais assemblées en nombre et en ordre convenables, permettent à l'homme de plier la machine à ses exigences en lui faisant exécuter tous les calculs, tous les travaux qu'il veut. Il semble qu'aucune machine n'ait présenté jusqu'ici une telle souplesse, une telle flexibilité, un tel caractère d'universalité. Ici encore, soyons prudents dans nos jugements : multiplicité des tâches, élargissement du champ d'activités, ne veulent pas dire formes supérieures d'activités.

La faculté de décision élémentaire. Les machines à calculer ne font pas que du calcul. Elles font de la logique. Mais elles ne

peuvent inventer de nouvelles formes de raisonnements; elles répètent pas à pas sur chaque cas précis un schéma de raisonnement imaginé et imposé par l'homme, vite et avec sécurité.

Il n'est pas inexact de dire que les machines peuvent raisonner, mais il y a des degrés dans les choses. Les machines sont capables d'un raisonnement mécanisé. C'est un fait nouveau. L'homme a réussi à forger un outil auxiliaire de sa pensée auquel il peut confier la part rationalisable de ses activités intellectuelles, et elle est grande.

Déchiffrer des manuscrits ? C'est avant tout se livrer avec patience à des comparaisons sans nombre, à des calculs de corrélation entre symboles ou groupes de symboles à identifier. C'est appliquer des règles strictes, une méthode rigoureuse. C'est, parfois, risquer une hypothèse, formuler une conclusion, et toujours recommencer un patient labeur. Mais la machine n'a pas besoin de patience, et elle va infiniment plus vite dans ce travail. Qu'elle se livre donc à la tâche routinière du décryptement; et l'homme aura tout son temps pour penser à la meilleure façon de conduire son œuvre.

Composer de la musique ? C'est appliquer les lois de l'harmonie, se plier aux règles d'un genre musical. Que l'on fournisse à la machine des sons pris au hasard, elle choisira, selon ces lois, les sons et les cadences qui conviennent. Mais l'œuvre souffrira certainement d'un inévitable caractère scolaire aux antipodes de l'inspiration.

En définitive, c'est quand même l'homme qui doit formuler les lois.

Mais après tout, cette recherche même des méthodes à appliquer ne peut-elle être mécanisée ? La machine ne peut-elle pas apprendre ? Si. A condition qu'elle puisse se corriger, à condition que son programme puisse se modifier lui-même en fonction des premiers résultats obtenus.

Les machines qui apprennent

La possibilité pour un programme de s'appliquer à lui-même, de se modifier lui-même, ouvre la voie à des applications d'un ordre supérieur. Il suffisait, pour que ce fût possible, que les machines devinssent capables de traiter les instructions de leurs programmes comme elles traitaient toutes les autres informations. Du jour où le programme, mis lui aussi sous forme codée, a été enregistré dans les mémoires, ayant par là-même accès aux circuits logiques et de calcul, les machines ont acquis la *faculté d'apprendre*. Capables déjà de raisonner sur des faits, elles

devenaient capables de raisonner sur des raisonnements : c'était changer radicalement de destin.

On pouvait alors imaginer des programmes servant à en fabriquer d'autres, à les corriger. Il n'est plus nécessaire que l'homme ait pensé à tous les cas particuliers : quand il s'en présente un qui n'était pas prévu, la machine pose la question de savoir ce qu'il y a lieu de faire, et elle s'en souviendra à l'occasion.

On peut, aujourd'hui, apprendre aisément à une machine la marche des pièces de l'échiquier : la machine jouera une partie où tous les coups seront conformes à la règle du jeu, mais elle perdra. On sait aussi lui faire un « programme d'apprentissage » capable de corriger le programme de jeu précédent. Alors la machine perdra encore quelques parties, puis finira par en gagner une; et le nombre des parties qu'elle gagnera deviendra de plus en plus grand, jusqu'à ce qu'elle finisse par égaler et dépasser son maître... Dans l'état actuel de la technique, elle plafonnerait avant, car elle n'aurait pas une capacité de mémoire suffisante pour enregistrer toute sa science des échecs. Mais plus tard... Et ce qui est vrai pour le jeu d'échecs n'est-il pas vrai dans bien d'autres domaines moins anodins ? Si, et c'est bien là que le vertige nous prend.

Jusqu'où irons-nous ?

Nul ne saurait le dire avec exactitude. Nous pouvons seulement constater que les machines sont, ou seront capables d'assumer les activités intellectuelles de l'homme dans la mesure exacte où elles obéissent à des règles précises, formulables, dans la mesure où elles sont explicables. Il ne fait pas de doute alors qu'une grande partie de nos activités intellectuelles est mécanisable. Certains pensent que tout dans la pensée de l'homme est rationalisable, et que par conséquent la machine, un jour, l'égalera, pour finalement le dominer.

Nous affirmons que rien dans la technique actuelle ni dans son évolution scientifiquement prévisible ne permet de soutenir une pareille thèse. Jamais on n'a vu, au cours des âges, les outils forgés par l'homme pour accroître la puissance et l'acuité de ses sens et de ses facultés se substituer radicalement à lui dans les formes nobles de ses activités, à moins qu'il n'ait volontairement abdiqué sa dignité. Ce sera encore plus vrai dans l'ordre intellectuel où l'homme émergera grâce à son intuition et à son génie, si savantes et si érudites que deviennent ses machines.

Jean BOSSET

COMPAGNIE DES MACHINES

BULL

C

tous les matériels
nécessaires
au calcul automatique
et au traitement
de l'information

comptabilité
gestion
recherche opérationnelle
recherche scientifique

L'ÉDITION PUBLICITAIRE



2

5

0

d

a

b

guyotanshio

323

84, AVENUE GAMBETTA-PARIS XX - MEN. 81-58