t. 2, n° 11, 1947]

LES GRANDES MACHINES MATHÉMATIQUES

Les machines américaines

par Léon BRILLOUIN
Professeur au Collège de France

SOMMAIRE. — *L'auteur indique d'abord ce qu'on entend par grandes machines mathématiques, c'est-à-dire à quoi elles doivent être aptes, et à quoi elles peuvent servir. Il traite ensuite de leurs organes fondamentaux (dans les machines déjà anciennes et dans les machines modernes), destinés d'une part à exécuter des opérations de calcul proprement dites, d'autre part à assurer le programme de cette exécution avec le maximum d'efficacité, de rapidité, et d'automaticité. Il expose alors les réalisations américaines dans leurs traits essentiels, puis décrit divers modèles avec illustrations à l'appui. Il expose enfin les dispositions de principe et les procédés techniques applicables à l'accomplissement des principales fonctions à assurer : choix du système de numération optimum, procédés d'enregistrement matérialisant programme et mémoire, mesures prises pour assurer la précision et l'exactitude des machines ; pour terminer l'auteur souligne la communauté d'un problème technique essentiel avec les télécommunications (technique des impulsions), et signale la surprenante analogie fonctionnelle qui s'est révélée entre les robots et le système nerveux des êtres animés ; il en dégage de considérables perspectives d'avenir.*

I. APTITUDES ET APPLICATIONS DES GRANDES MACHINES MATHÉMATIQUES

Les réalisations sont extrêmement variées et c'est sur le domaine du programme qu'apparaîtra l'unité de notre exposé. Nous commencerons donc par ce programme essentiel, et examinerons de quoi doit être capable une grande machine mathématique pour mériter ce nom.

Une telle machine doit être apte à résoudre les types de problèmes suivants :

Résolution d'un système d'équations linéaires avec un grand nombre d'équations et le même nombre d'inconnues ;

Résolution d'une équation de degré élevé (problème corrélatif du précédent) ;

Résolution d'équations différentielles ou intégrales portant sur une variable réelle. Ces équations peuvent être linéaires ou non, car du point de vue de la machine, la linéarité n'est pas un caractère distinctif fondamental. A titre d'exemple, ces machines sont capables de calculer une trajectoire quand on donne les conditions initiales et la loi suivant laquelle se poursuit cette trajectoire. Elles peuvent aussi résoudre ces problèmes avec valeurs aux limites : la méthode qu'emploie la machine dans ce cas est de calculer une première trajectoire avec des conditions initiales arbitraires, de comparer pour constater si cette trajectoire passe trop loin ou passe en deçà du but à atteindre et ensuite, par approximations successives, en corrigeant progressivement les données initiales, de régler le tir, de régler la trajectoire de façon qu'elle parte du point initial et atteigne son extrémité finale.

Résolution des équations aux dérivées partielles ou des équations intégrales à deux variables. — Cela a déjà été fait sur certaines machines actuelles, mais il faut avouer que ce type de problème est tout à fait à la limite des possibilités de ces machines. Pour résoudre pratiquement des équations aux dérivées partielles à deux variables, il faudra construire des machines plus rapides, et plus souples que celles dont on dispose actuellement. Néanmoins, le problème n'est pas insoluble et quelques équations aux dérivées partielles ont été déjà effectivement discutées et traitées sur les machines mathématiques. Pour donner une idée de ce que cela représente actuellement comme difficulté, la résolution d'une équation ordinaire prend quelques jours, celle d'une équation aux dérivées partielles exige des mois de travail ; donc, ce type de problème ne deviendra pratique qu'avec des machines beaucoup plus rapides que la machine actuelle de Harvard. Éventuellement, on envisage aussi l'étude d'équations aux dérivées partielles à trois variables, mais nous ne connaissons aucun exemple de ce type qu'on ait pu traiter sur les machines existant en ce moment.

Quelles sont les applications de ces machines ? Il y a évidemment les calculs d'une quantité de problèmes de technique, de problèmes d'ingénieurs en tous genres ; en particulier, les machines qui ont été construites en Amérique ont travaillé pendant toute la guerre à calculer des tables de tir pour tous les nouveaux engins qui étaient mis en service dans l'armée, dans l'aviation ou dans la marine américaine. Il y a en outre la possibilité de calculer des tables de fonctions : on possède des tables incomplètes et de précision limitée pour un grand nombre de fonctions mathématiques ; il est possible de compléter ces tables et de le faire avec beaucoup plus de précision que cela ne fut fait pour celles que nous possédons actuellement. C'est ce genre de travail qui a été utilisé sur la machine du Professeur AIKEN à Harvard comme travail de complément.

En effet, la machine a été construite avec des crédits de la Marine américaine, et elle résout en premier lieu les problèmes qui lui sont transmis par la Marine américaine, mais cela ne suffit pas pour la faire tourner 24 heures par jour [car elle peut tourner 24 heures par jour], et on remplit les intervalles libres par des calculs de fonctions de BESSEL et de fonctions de HANKEL ; on a déjà dressé des tables des fonctions d'ordre 0, 1, 2 et 3 et 1/3 ; c'est un vaste programme de calculs qui se continue.

Il y a naturellement des plans pour développer encore davantage l'utilisation de ces machines, et ceux qui les construisent actuellement envisagent l'emploi des machines mathématiques pour tous les calculs de l'aviation. Le programme qu'ils ont en vue, et qu'ils comptent réaliser dans les prochaines années, serait de réduire l'emploi des tunnels aérodynamiques pour la détermination des constantes fondamentales et des mesures de constantes physiques de l'aérodynamique, puis de traiter sur les machines tous les problèmes particuliers, qui se réduisent généralement à des équations aux dérivées partielles à deux variables.

Les Américains aiment toujours établir des bases de rendement et, d'après les premières évaluations, il semble que les machines mathématiques, même dans leur état actuel, seraient capables de résoudre ces problèmes plus vite, avec plus de précision et environ moitié moins cher que les tunnels aérodynamiques. Cela n'est pas autrement surprenant quand on sait le prix de la construction, de l'entretien et du fonctionnement d'un tunnel aérodynamique.

Enfin, dans le domaine purement scientifique, on peut dire que ces machines ouvrent réellement une branche nouvelle des mathématiques, branche qu'on pourrait qualifier par l'association de deux termes qui semblent jurer ensemble : la branche des mathématiques expérimentales. Pour mieux expliquer l'emploi de ces termes, voici une expérience personnelle : il fallait traiter un problème qui avait pu être ramené à une équation différentielle non linéaire dont il était impossible de découvrir commodément la solution ; l'équation fut donc transmise, avec un certain nombre de données initiales raisonnables, à l'une de ces machines mathématiques et huit jours après étaient livrées les tables de nombres correspondant à la solution, avec les courbes et graphiques tracés par la machine. Au premier aspect de ces courbes, il apparaissait immédiatement que dans certains cas limites la solution devait être relativement simple. Essayant aussitôt de justifier le type de solution qui apparaissait d'après les graphiques, nous avons pu constater qu'en effet cette solution pouvait être bâtie ; elle aurait été très difficile à deviner sans l'examen de ces courbes expérimentales d'un problème de mathématiques.

Ainsi les machines doivent ouvrir une branche nouvelle des mathématiques qui peut être qualifiée d'expérimentale, c'est-à-dire l'étude de solutions construites sur la machine pour des équations dont le mathématicien a beaucoup de peine à trouver les règles générales, des équations pour lesquelles il est incapable de fournir une solution ou même de savoir s'il existe une ou plusieurs solutions ; la machine lui fabriquera des solutions et il les étudiera ensuite de la même manière que le physicien étudie les résultats d'une série d'expériences.

Ainsi les applications sont très variées et s'étendent depuis l'art de l'ingénieur jusqu'à une branche de science nouvelle qui peut aider considérablement dans les recherches mathématiques. En effet, les problèmes qui sont simples pour les mathématiciens sont parfois très difficiles pour la machine, et inversement les problèmes qui sont insolubles pour le mathématicien ne sont souvent pas particulièrement difficiles à résoudre sur la machine.

II. ORGANES FONDAMENTAUX

DANS LES MACHINES ANCIENNES

Nous commencerons par des machines qui méritent maintenant le nom d'ancêtres, mais qui se portent encore très bien, qui continuent à faire beaucoup de travail, et n'ont guère qu'une quinzaine d'années d'âge au maximum.

V. Bush. Machines du Massachusetts Institute of Technology. — Ces machines sont extrêmement intéressantes, car ce sont les réalisations de BUSH qui ont réellement ramené l'attention du monde savant sur les problèmes de calcul mathématique. Le premier analyseur a été construit en 1925 et il en existe maintenant une dizaine d'exemplaires sous des formes variées dans le monde entier : c'est déjà une nombreuse famille. Cette machine est basée essentiellement sur l'utilisation d'*intégrateurs à roulettes*. L'intégrateur à roulettes calcule une intégrale avec une précision d'ailleurs limitée, 4 chiffres exacts dans les cas les meilleurs. Il y a dans les machines de BUSH 12 ou 18 intégrateurs à roulettes, qu'on peut coupler entre eux par des trains d'engrenages, qui représentent les coefficients d'une équation intégrale ou différentielle ; on obtient ainsi un système mécanique qui ne peut bouger que dans une certaine direction et en obéissant strictement à l'équation intégrale ou différentielle qu'on a matérialisée par les intégrateurs et les trains d'engrenages.

La difficulté est que ce genre d'appareil n'a qu'une précision limitée. L'intégrateur à roulettes lui-même ne donne pas plus de 4 chiffres exacts dans les meilleures conditions; quand on commence à en coupler plusieurs par des trains d'engrenages, il arrive qu'à certains moments il s'exerce des efforts considérables sur la roulette, et que celle-ci risque de patiner sur le plan sur lequel elle doit rouler : à partir de ce moment, la machine donne des erreurs.

On a résolu cette difficulté en n'exerçant aucun effort sur la roulette elle-même et en disposant un servo-moteur qui suit exactement le mouvement de la roulette. Cela peut être réalisé par des *procédés optiques* : par exemple en utilisant de la lumière polarisée et des roulettes transparentes recouvertes de polaroïd, et en employant un mécanisme qui maintient deux roulettes, ainsi recouvertes, toujours à angle droit l'une de l'autre.

Toute une variété de réalisations de ce genre ont été appliquées dans diverses machines en Amérique, en Angleterre, en Allemagne ; ces machines n'arrivent guère qu'à donner trois ou quatre chiffres exacts ; pour de très nombreux problèmes, cette précision est suffisante, pour d'autres elle est notoirement insuffisante.

Dans la machine de Bush, il y a en outre des appareils capables de faire des *additions* ; il y a les mêmes couplages par jeu d'engrenages, et beaucoup de détails intéressants qui ont servi de modèles aux réalisations ultérieures : par exemple les appareils de *lecture de courbes*. La lecture est encore faite avec un opérateur dans l'appareil de Bush, mais on peut la rendre complètement automatique avec une lecture par cellule photoélectrique. La machine comporte aussi des *traceurs de courbes*, et un *dispositif d'impression* qui donne les résultats par tables de nombres.

Ces machines sont actuellement complètement dépassées par les machines modernes, mais cela ne veut pas dire qu'elles aient perdu leur intérêt. Dans de très nombreux problèmes, une solution avec 3 ou 4 chiffres exacts est déjà fort intéressante, et en fait, de telles machines sont partout en service et même presque en service permanent.

Principales antériorités. — Avant d'aborder maintenant les machines modernes, nous devons mentionner particulièrement deux antériorités notables dans la série des précurseurs, parmi lesquels Mr Pérès a cité, dans son introduction, les noms qui jalonnent l'historique de cette branche des mathématiques.

L'une de ces antériorités a été découverte par V. Bush lui-même : la première idée d'une machine du genre de celle de Bush se trouve dans une série de publications de *Lord Kelvin* en 1867, indiquant la manière de combiner les *intégrateurs à roulettes* pour faire une véritable machine à *résoudre des équations différentielles*. Il ne semble pas d'ailleurs qu'il ait jamais réalisé son système pratiquement.

Une autre antériorité extrêmement intéressante est celle de Charles Babbage, ingénieur anglais qui, de 1812 à 1833, avait fait des plans de machines comportant un certain nombre des organes essentiels de programme et de mémoire qui sont à la base des machines modernes que nous allons étudier maintenant. Il en avait commencé la réalisation avec l'aide de la Royal Society et du Gouvernement britannique, mais la construction n'en a jamais été terminée. Au mois de janvier dernier, à un congrès de discussion sur des machines mathématiques à Harvard, le petit-fils de Charles Babbage, journaliste au Canada, Richard Babbage, a présenté un résumé des travaux de son grand-père et des difficultés inextricables qu'il avait rencontrées vers 1820 en essayant de construire des machines de ce genre.

Dans les machines modernes

Arrivons maintenant aux grandes machines modernes. Nous essaierons d'en résumer d'abord les principes généraux, en réservant pour plus tard les indications sur les détails de réalisation des différents modèles.

Dans les machines modernes, on s'est posé comme principe d'opérer avec une véritable machine à calculer, de précision limitée uniquement par les dimensions de la machine, par le nombre de chiffres sur les chiffreurs ; certaines machines, comme celles des Bell Telephone, opèrent avec 10 chiffres, d'autres avec 15 ou 20 chiffres ; celle de Aiken à Harvard calcule avec 23 chiffres et peut même, pour certains calculs délicats, coupler deux compteurs bout à bout et marcher par conséquent avec 46 chiffres. En plus des chiffres, il est indispensable aussi que certains groupes de compteurs marquent le signe du résultat, le signe + ou le signe —. On ajoute aussi parfois des organes spéciaux pour marquer la position de la virgule ; dans la machine de Aiken la virgule est fixe ; dans d'autres machines, elle est mobile suivant les étages de calcul, et des appareils spéciaux indiquent le rang, la position de la virgule.

Ces machines sont toutes des machines électriques, obtenues par des combinaisons de relais ou par des combinaisons de lampes, parce que les circuits électriques sont beaucoup plus faciles à coupler entre eux, suivant des schémas extrêmement variés, que ne le seraient des dispositifs mécaniques.

Opérations arithmétiques. — La machine comprend donc, pour commencer, des dispositifs d'addition électriques par relais ou par lampes électroniques et des dispositifs de soustraction. La soustraction est toujours ramenée à une addition par l'emploi des compléments à neuf, système de calcul qui se trouve déjà sur les machines à calculer ordinaires. Il y a des organes pour effectuer la multiplication ; il y en a éventuellement pour faire la division, mais on a souvent trouvé plus simple de remplacer la division par un système d'approximations successives. Des organes accessoires permettent de calculer les racines carrées (ainsi que les logarithmes et un certain nombre de *fonctions d'usage courant* dans les opérations, par un processus examiné plus loin).

Opérations analytiques. — Une fois prévus les organes réalisant toutes ces opérations arithmétiques fondamentales, il faut aussi penser à calculer l'intégrale et la dérivée. Une intégrale, que les mathématiciens appellent encore une somme, est effectivement ramenée à une addition, dans ces machines à calculer. Quand il s'agit de faire une intégrale, on divise l'intervalle d'intégration en un très grand nombre d'intervalles partiels, on prend les valeurs de la fonction sur tous ces intervalles partiels et on fait la somme. Donc, l'intégrale est réduite à une longue addition. La précision avec laquelle cette somme de termes discontinus représente l'intégrale dépend du choix de l'intervalle des subdivisions. Quant à la dérivée, c'est par sa définition même le rapport d'un accroissement d'une fonction à l'accroissement de la variable, ou plus précisément, pour les mathématiciens, c'est la limite de ce rapport pour des accroissements infiniment petits ; dans la machine, on prend des accroissements petits, mais finis, et on prend le rapport des accroissements de la fonction et de la variable.

Une équation intégrale différentielle, ou intégro-différentielle, s'exprime sur le papier par une série de symboles représentant une série d'opérations à faire dans un certain ordre : toutes ces opérations, nous avons de quoi les faire, donc le moyen de fabriquer la solution de l'équation différentielle.

Opérations impliquant des tables de fonctions. — Il s'agit des tables de fonctions usuelles, la fonction logarithmique, la fonction sinus, d'autres fonctions éventuellement pour les calculs spéciaux, et aussi des tables de données expérimentales. Comment introduit-on une fonction dans la machine ? On l'introduit en donnant la valeur de la fonction à un certain nombre de points assez éloignés les uns des autres et en inscrivant aussi dans la machine les valeurs des coefficients des polynomes d'interpolation qui permettent de passer d'un point au suivant. En général, on n'emploie pas plus de 50 ou 100 points distincts sur l'intervalle d'utilisation ; quant au polynome d'interpolation, il suffit en général de le limiter à 5 ou 6 termes. Le tout doit être prévu de telle façon que la machine puisse se référer à la table de fonction et calculer automatiquement les valeurs dont elle a besoin.

Organes fondamentaux de programmes et de mémoires. — Nous arrivons au trait essentiel caractéristique de ces machines : elles exécutent toutes les opérations suivant un *programme* établi d'avance. Le programme est matérialisé par exemple sous forme d'une bande de papier perforé, ou sous forme d'une série de cartes perforées, ou sous toute autre forme équivalente. La machine lit la bande de papier perforé, exécute la commande correspondante, passe à l'ordre suivant, exécute cet ordre et continue ainsi pas à pas toutes les opérations nécessaires pour le calcul mathématique envisagé. Voici donc un premier organe essentiel : l'organe de programme.

Un deuxième dispositif essentiel, qui est nouveau par rapport aux machines à calculer que nous connaissions antérieurement, est l'organe de *mémoire*. En effet, il est indispensable que la machine puisse calculer un résultat, l'enregistrer, le mettre en réserve et l'utiliser ultérieurement dans la suite des calculs. C'est une opération que le mathématicien fait constamment : inscrire un résultat, inscrire une formule, la mettre de côté, continuer son calcul, et dans une étape suivante reprendre le résultat d'un calcul antérieur. Cet organe de mémoire peut être matérialisé aussi sous forme de perforations dans une bande, ou par tout autre procédé équivalent. La machine va donc perforer une bande, la mettre en réserve, et ensuite un organe de lecture ira rechercher le long de cette bande la perforation inscrite sous un certain numéro d'ordre pour la réintroduire dans le calcul.

Organes d'inscription. — Enfin, une troisième sorte d'organes essentiels a pour rôle d'inscrire les résultats. Ceux-ci sont fournis sous forme de tables de chiffres imprimés. La machine va donc comporter un certain nombre de machines à écrire, qui seront manœuvrées automatiquement et taperont les résultats numériques ; elles enregistrent aussi les résultats sous forme de perforations de bandes, éventuellement sous forme de perforations de cartes perforées des modèles standard utilisés dans les calculs automatiques.

Organes de comparaison. — A tous ces organes qui se trouvent dans les machines américaines, Mr COUFFIGNAL a ajouté un organe supplémentaire, dont il semble avoir été le premier à comprendre toute l'importance, et qu'il appelle le comparateur. Le comparateur est un organe capable de saisir deux nombres, de dire lequel est le plus grand, et de corriger ensuite la manœuvre de la machine jusqu'à établir l'égalité entre les deux nombres. Mr COUFFIGNAL a prévu des combinaisons très ingénieuses pour réaliser des comparateurs. D'autres combinaisons sont obtenues dans les machines américaines par un procédé un peu détourné : on calcule directement la différence des deux nombres, puis un organe spécial examine le signe et la grandeur de la différence pour corriger la suite du calcul ; en réalité, la comparaison peut être obtenue directement sans tout ce mécanisme de calcul de la différence et il est très avantageux de prévoir un organe spécial pour cette opération.

III. RÉALISATIONS AMÉRICAINES

TRAITS ESSENTIELS DES DIFFÉRENTS TYPES

Après ces quelques mots d'introduction essayant de résumer ce que doit faire la machine et comment elle le fait, nous allons maintenant examiner sommairement différentes machines américaines et en présenter quelques photographies.

Machines I. B. M. et Harvard (Mark I, II, III). — Le premier modèle de machine construit aux États-Unis d'Amérique fut celui de Harvard, dont le constructeur et inventeur est le Professeur AIKEN. AIKEN avait commencé les plan de sa machine vers 1938 ; les premières études furent exécutées sur les fonds de l'Université de Harvard, mais très vite on s'aperçut qu'il fallait des subventions beaucoup plus considérables pour réaliser de tels plans et, par la suite, la Marine américaine a financé les constructions de Harvard. Néanmoins, au point de vue de la politique scientifique, la méthode suivie par AIKEN a été excellente ; Harvard, ayant fait les premiers plans et les premiers essais, est resté possesseur et directeur du Centre ; dans le même but nous sommes heureux de voir le Centre de la Recherche Scientifique en France faire les premières mises de fonds et la mise en route de la machine, en s'adressant d'abord à ses propres ressources, de façon à n'avoir à envisager la collaboration d'autres services et d'autres Ministères qu'ultérieurement, lorsqu'il aura été bien établi que c'est le Centre de la Recherche Scientifique qui a mis en route la construction de la machine et en reste le Directeur.

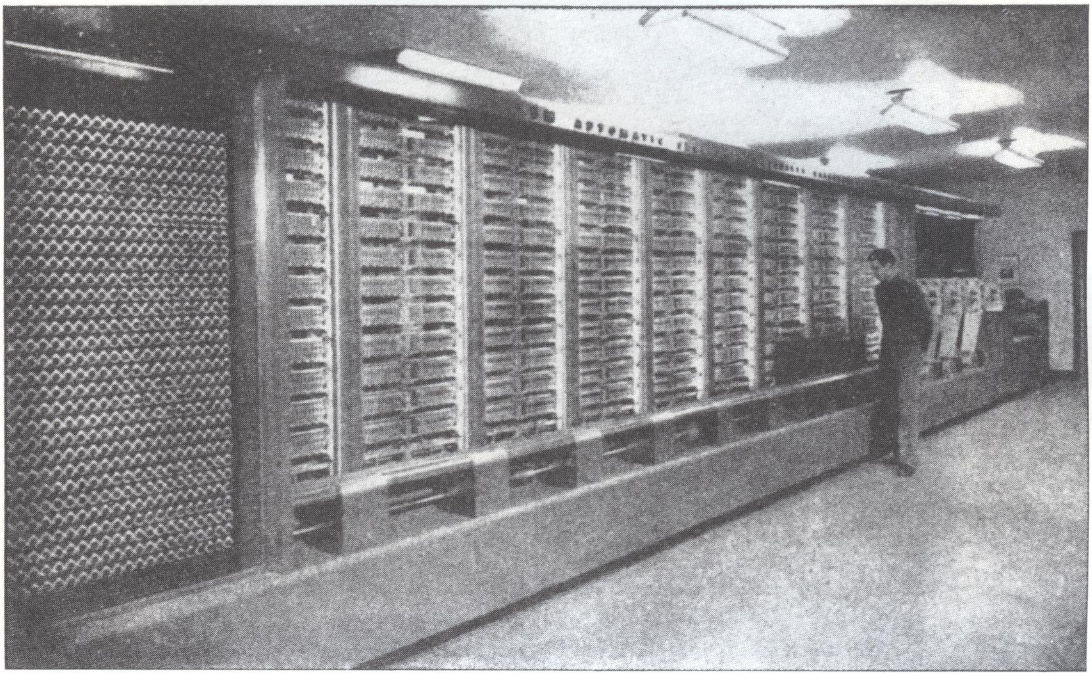

Fig. 1.

Aiken à Harvard a construit une première machine, terminée vers 1942-1943 avec l'aide d'une grande compagnie américaine de machines à calculer, l'I. B. M. (International Business Machine Corporation). C'est l'Automatic Sequence Controlled Calculator ou « Mark I ». Cette machine est encore en marche ; nous en verrons des photographies.

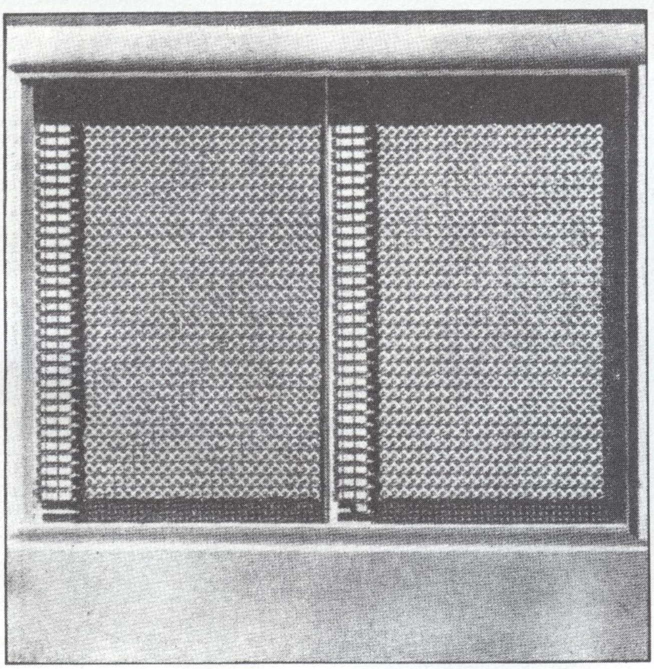

Fig. 2.

Une deuxième machine, appelée Mark II, a été construite l'année dernière par Aiken et a été livrée par lui à la Marine américaine. La Marine pourra ainsi exécuter elle-même ses propres études et le groupe de Harvard aura davantage de temps libre pour l'étude des problèmes fondamentaux et des questions d'intérêt purement scientifique.

Enfin, une troisième machine, « Mark III », sera électronique ; les deux premières machines utilisent des relais électro-mécaniques ; la troisième sera en majeure partie électronique et devra, d'après les estimations de Aiken, marcher 50 ou 100 fois plus vite que les Mark I et Mark II. Elle présentera en outre un avantage considérable : les deux premières machines ont coûté chacune environ un demi-million de dollars alors que la troisième machine, que AIKEN compte construire dans le courant de l'année prochaine, ne doit guère revenir à plus de 50 000 dollars. Ces chiffres montrent que ces machines, tout en étant coûteuses, ne sont tout de même pas d'un prix exorbitant : 50 000 dollars, traduits en francs, représentent 6 à 8 millions, cela peut se trouver sur un budget de recherches scientifiques. Quand il s'agissait d'une machine d'un demi-million de dollars, c'est-à-dire de 80 millions de francs, la dépense pouvait paraître très lourde.

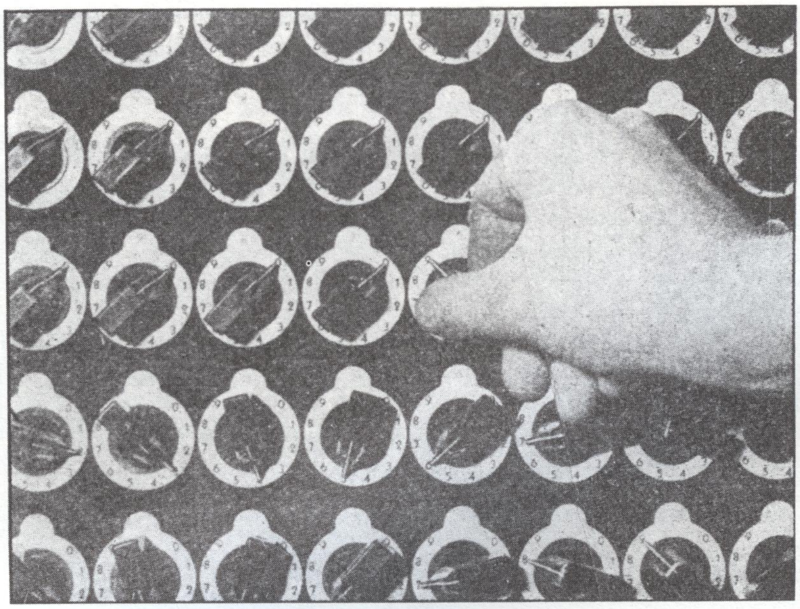

FIG. 3.

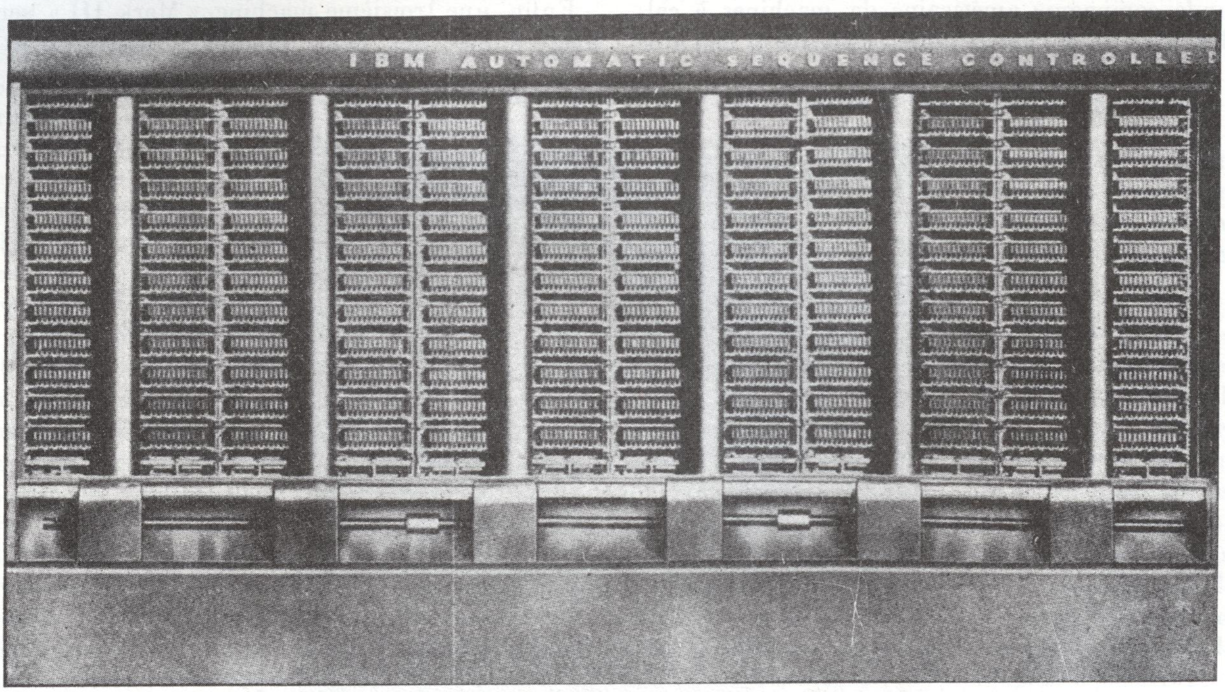

FIG. 4.

Machines des Bell Laboratories. — Aux Bell Telephones une ou plutôt deux machines complémentaires ont été construites ; elles utilisent du matériel de central téléphonique automatique de série et elles ont été réalisées par différents ingénieurs : WILLIAMS, CESAREO et JULEY, avec l'aide du Professeur STIBITZ, mathématicien de l'Université de Vermont.

Machines ENIAC. — Une autre machine est connue par ses initiales : ENIAC, ce qui signifie Electronic Numerical Integrator and Computer. Elle a été construite à l'Université de Philadelphie par différents ingénieurs et mathématiciens, dont

GOLDSTINE. Elle a été depuis livrée à l'Armée. On a fait beaucoup de réclame et de publicité autour de cette machine, qui offre en effet des caractéristiques extrêmement remarquables. Elle est entièrement électronique et comporte une batterie de 18 000 tubes à vide, qui consomment 200 kW quand la machine est en marche, de sorte qu'il faut une usine de ventilation et de refroidissement dans la pièce où sont installés les 18 000 tubes.

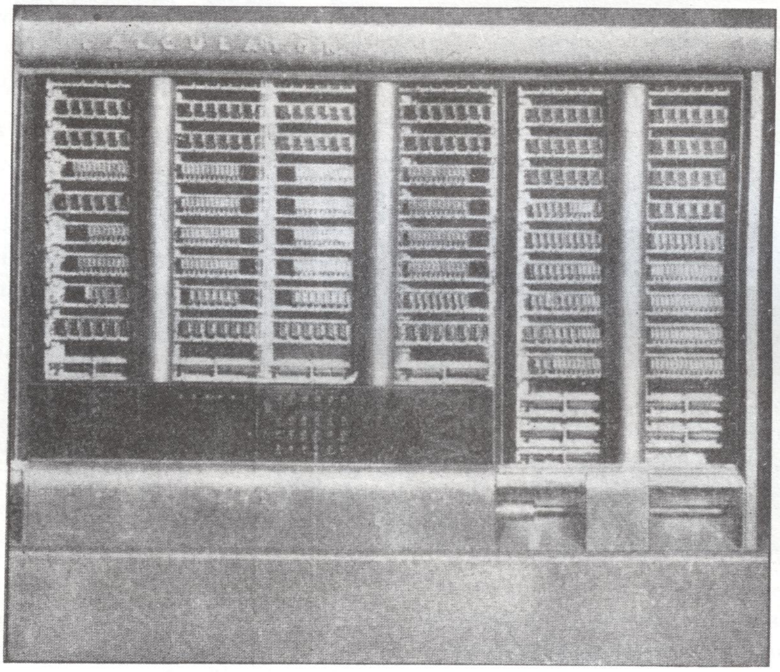

FIG. 5.

Cette machine travaille avec une rapidité fantastique. Ses auteurs se vantent d'être capables de calculer la trajectoire d'un obus de grand canon de marine en moins de temps que l'obus n'en met pour atteindre son but ; ils ont, en effet, à plusieurs reprises, réalisé ce tour de force.

Malgré tout, et de l'avis des auteurs qui l'ont monté, c'est un modèle à ne pas imiter tel quel ; cette machine réalise certes une expérience de premier ordre : elle a montré que les tubes électroniques peuvent être employés avec sécurité dans un très grand nombre d'opérations et de calculs, mais elle a prouvé aussi que dans d'autres opérations la sécurité n'était pas obtenue. Lors des discussions de janvier 1947 à Harvard, nous avons

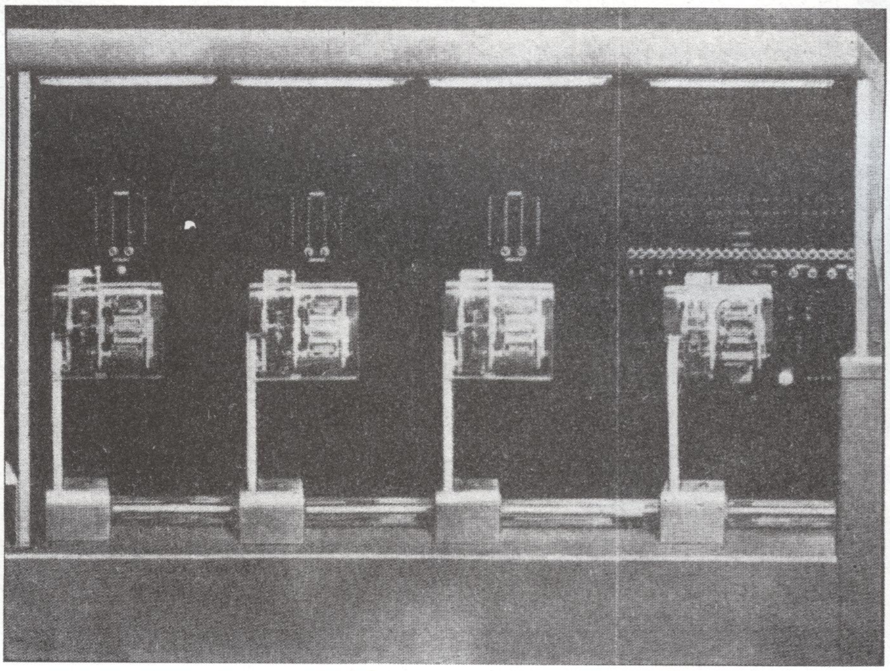

FIG. 6.

été plusieurs personnes à poser des questions fort indiscrètes aux auteurs de l'ENIAC, en faisant remarquer que cette machine était souvent en

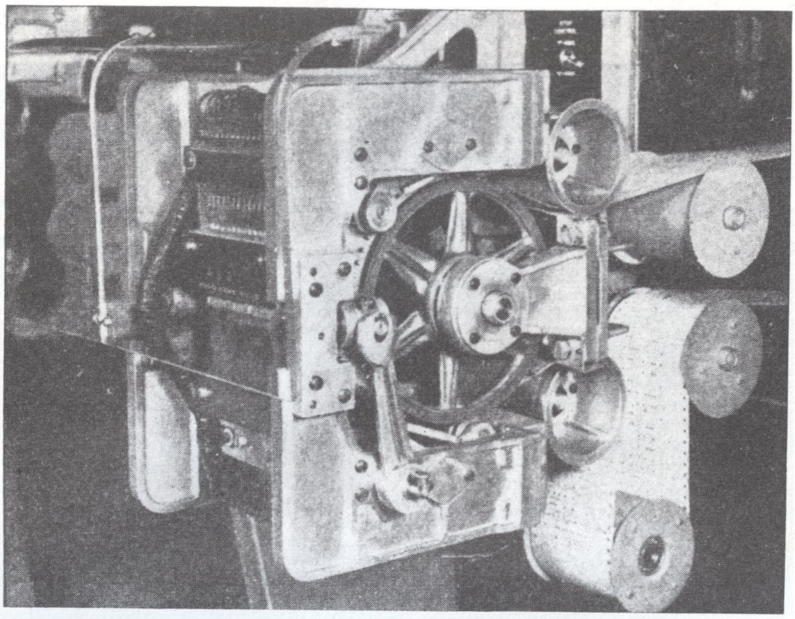

FIG. 7.

panne et qu'elle ne calculait pas toujours juste ; à force de pousser les auteurs, on a fini par leur faire admettre que la machine donnait des résultats

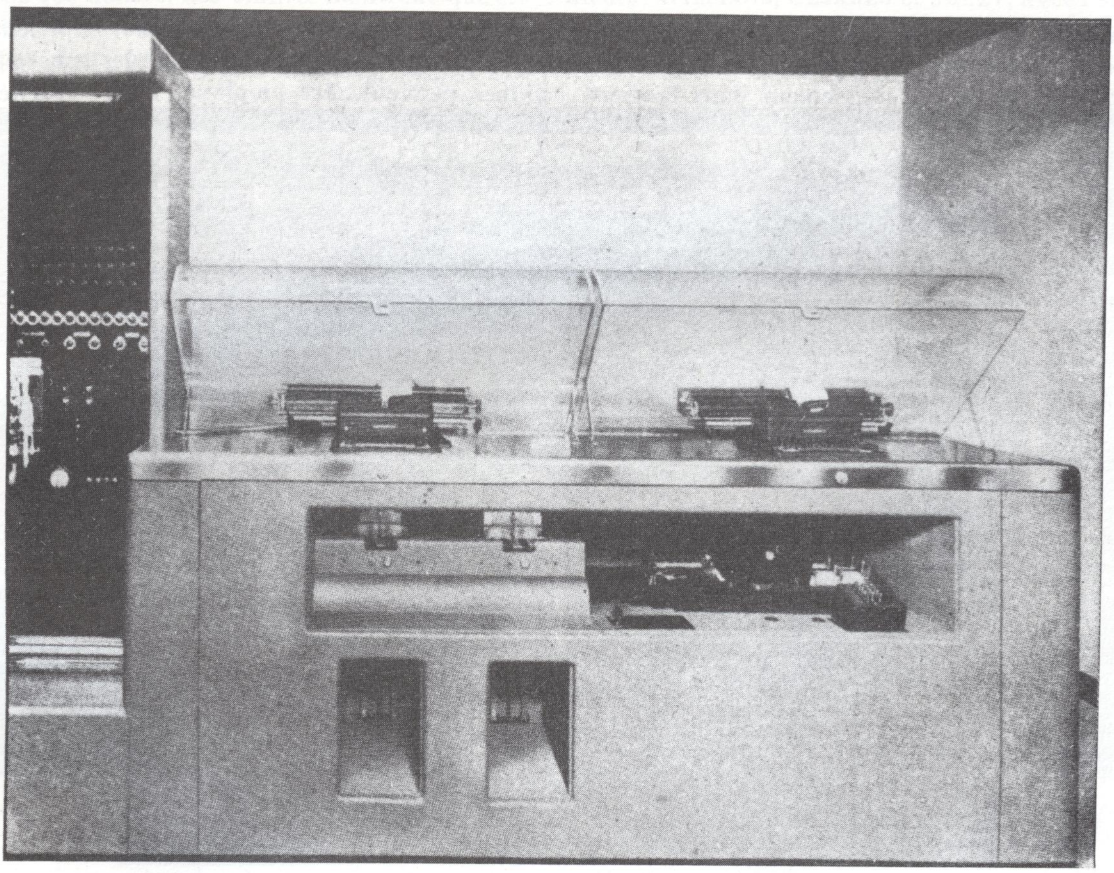

FIG. 8

corrects 20 fois sur 100 ; il y avait parfois 80 % d'erreurs... C'est un peu trop pour une machine mathématique ; à quoi les auteurs répondent : « Nous faisons les calculs 1 000 fois plus vite que tous les autres et nous répétons les opérations un nombre de fois suffisant pour être sûrs de la concordance des résultats. » Oui, mais on peut aussi répéter la même erreur un certain nombre de fois et se fier ainsi à un résultat erroné. Certains types d'organes ne sont pas tout à fait au point actuellement. et ce sont spécialement des organes de mémoire ; d'autres, au contraire donnent toute satisfaction : tous les systèmes d'addition, de numération et d'opérations arithmétiques sont absolument sûrs et de ce point de vue l'expérience des ingénieurs de l'ENIAC a été extrêmement précieuse. Aussi le Professeur Aiken, qui raisonne en ingénieur praticien, a-t-il décidé, pour sa troisième machine, de prendre tous les circuits électroniques semblables à ceux de l'ENIAC, mais de conserver pour la mémoire des systèmes plus rustiques et plus sûrs.

Études en cours et projets de réalisations. — Projet Princeton (avec le « selectron » de la R. C. A.). — Un très remarquable projet de machine est en cours à *Princeton*, sous la direction du célèbre mathématicien J. V. Neumann et de H. Goldstine. Il s'agit d'un projet de machine capable de fonctionner avec une rapidité étourdissante. Un des organes essentiels est un tube spécial qui doit remplir le rôle d'organe de programme et d'organe de mémoire. La R. C. A. travaille sur ce tube, le « sélectron », et en a construit quelques modèles préliminaires.

Jusqu'à présent, ces modèles réduits sont capables d'enregistrer des résultats pour une durée pas très longue, mais à un certain moment des étincelles éclatent en tous sens et effacent tous les résultats. Quand ce tube sélectron sera au point, il représentera un organe remarquable et révolutionnera certainement la technique des machines mathématiques, mais pour le moment il convient d'attendre. Aucun délai ne peut être donné pour cette réalisation.

Projets M. I. T. — Il y a différents projets en cours au Massachussets Institute of Technology, dont les équipes se sont spécialisées sur un problème tout particulier : la réalisation de machines relativement simples et capables de résoudre rapidement des problèmes avec une précision limitée à 3 ou 4 chiffres. Leurs expériences sur l'analyseur différentiel de Bush leur ont montré qu'il y avait un très grand nombre de problèmes, en particulier ceux dans lesquels on introduit des données empiriques, pour lesquels 4 chiffres exacts sont suffisants, et ces ingénieurs cherchent des modèles de réalisation qui soient simples et peu coûteux.

Projets divers. — L'Electronic Control Company étudie en ce moment la construction d'une machine dénommée EDVAC, qui est une modification de l'ENIAC.

Beaucoup d'autres projets de machines ou études de détails sont en cours. Chez Kodak, à Rochester, toute une équipe étudie systématiquement les possibilités d'*enregistrement sur film photographique.* Il s'agit de remplacer la bande de papier perforée par des films photographiques avec l'idée que l'on pourra resserrer bien davantage les inscriptions et marcher beaucoup plus vite. Le *Bureau of Standards*, de Washington, prépare un autre projet, pour lequel certaines études de détail sont commencées. A noter les études visant l'*enregistrement sur film magnétique* : là encore il s'agit de trouver un système pour remplacer les bandes perforées par un procédé capable de travailler plus vite. Enfin notons que l'Armée, la Marine, l'Aviation américaines ont en mains certaines machines : la machine ENIAC, construite à Philadelphie, la machine Mark II, construite par Harvard, et que l'enseignement tiré de l'utilisation des machines sera certainement mis à profit pour les divers perfectionnements en cours d'étude.

DESCRIPTION DE DIVERS MODÈLES

La machine de Harvard, I. B. M. Mark I (fig. 1 à 9). — En voici d'abord la *vue d'ensemble* (fig. 1). C'est une importante machine avec une belle collection de batteries de relais. En commençant par la gauche, on voit un panneau de commutateurs rotatifs sur lesquels on inscrit les données numériques du problème, et en continuant vers la droite, on aperçoit les organes de programme, les organes de mémoire, et finalement tout au bout les machines à taper les résultats. Une salle a été construite spécialement, à l'Université de Harvard, pour y installer cette machine.

Voici maintenant, avec plus de détails, les différentes parties de la machine, telles qu'elles se présentent de la gauche vers la droite :

D'abord (fig. 2) les deux *panneaux de constantes* dont l'ensemble permet d'inscrire 60 constantes (2×30) avec 23 chiffres pour chacune ; la figure 3 montre le détail de ces commutateurs rotatifs, et comment leur maniement permet d'inscrire sur la machine un certain nombre de chiffres correspondant aux données numériques de chaque problème particulier.

Puis une série de panneaux (fig. 4) où sont groupés les *compteurs de réserve* : 72 compteurs à 23 chiffres.

Puis (fig. 5) les panneaux sur lesquels se font les opérations *d'addition, de multiplication et de division* ; les additions se font sur les mêmes compteurs qui gardent les chiffres en réserve ; la multiplication et la division se font sur les panneaux du centre. A droite, se trouvent des panneaux sur lesquels sont inscrites les *fonctions logarithmiques et trigonométriques.*

On trouve ensuite (fig. 6) les panneaux des appareils *interpolateurs* et de *mémoire*, à bandes perforées : l'appareil de lecture de la bande perforée est à mi-hauteur ; la figure 7 montre le détail du *système de commande du programme*, qui se lit sur la bande perforée : celle-ci, guidée par des rouleaux, passe devant l'appareil à pointes et, selon la combinaison de pointes qui passent à travers la bande, l'enchaînement des opérations suivantes se trouve commandé.

Enfin, au bout de l'installation se trouvent les *machines à inscrire les résultats* (fig. 8) ; elles sont commandées par les calculateurs ; la solution s'y trouve en outre enregistrée par perforations sur bande ; on aperçoit en dessous l'appareil à perforer les cartes.

Voici maintenant (fig. 9), derrière l'installation, un opérateur célèbre par sa pipe en écume de mer — en train de faire une réparation au programme.

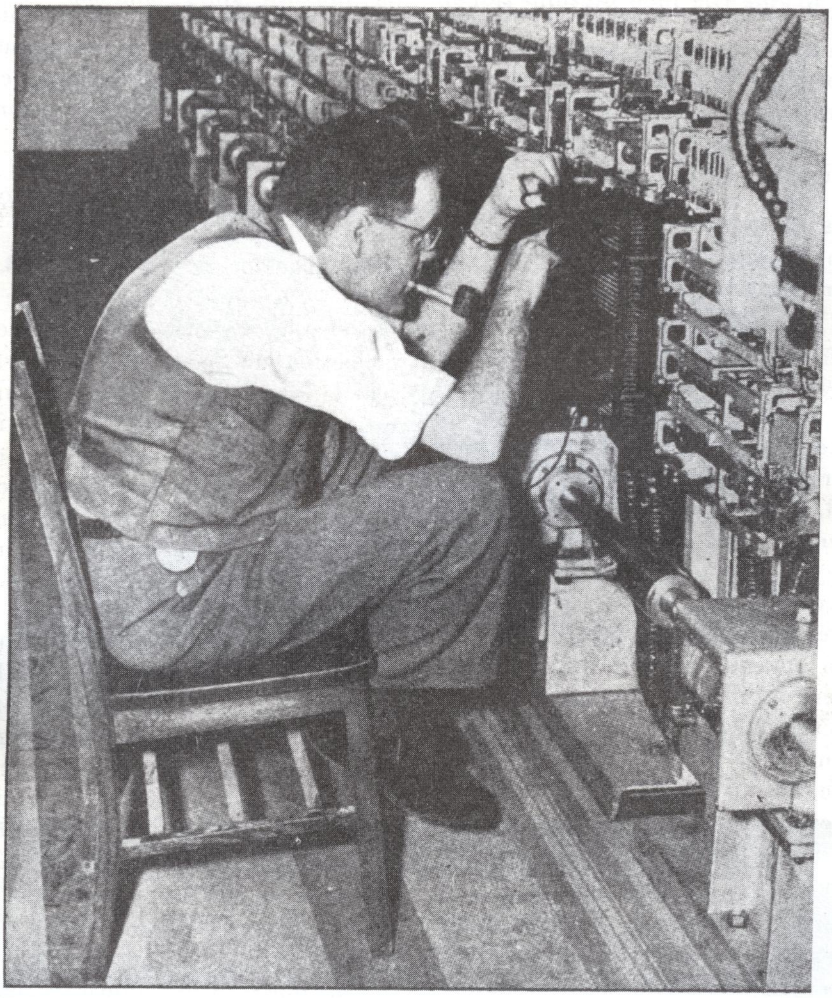

FIG. 9.

Les pannes sont-elles fréquentes et importantes ? Nous avons suivi personnellement le fonctionnement

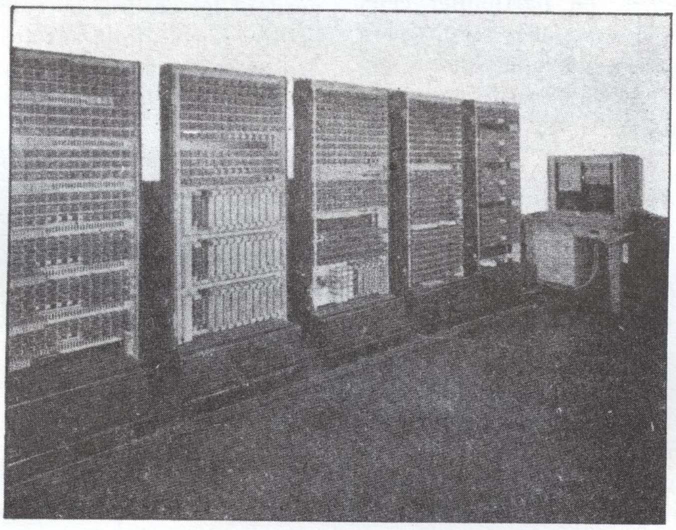

FIG. 10.

de cette machine pendant plusieurs mois, et avons constaté moins d'une panne par semaine, la machine fonctionnant durant 24 heures par jour ; dans certains cas la réparation prenait quelques minutes, dans les plus mauvais cas quelques heures, mais la moyenne est de 20 minutes de réparation une fois tous les 10 jours. Ces chiffres sont à comparer avec la proportion considérable d'erreurs que nous avons citée pour l'ENIAC.

Sur toutes ces machines, il y a naturellement tout un système de contrôle extrêmement perfectionné de telle sorte qu'aussitôt qu'un contrôle ne marche pas et que la machine a fait une erreur, un appel est déclenché : des lampes rouges s'allument dans toute la maison et tout le monde se précipite pour trouver l'erreur.

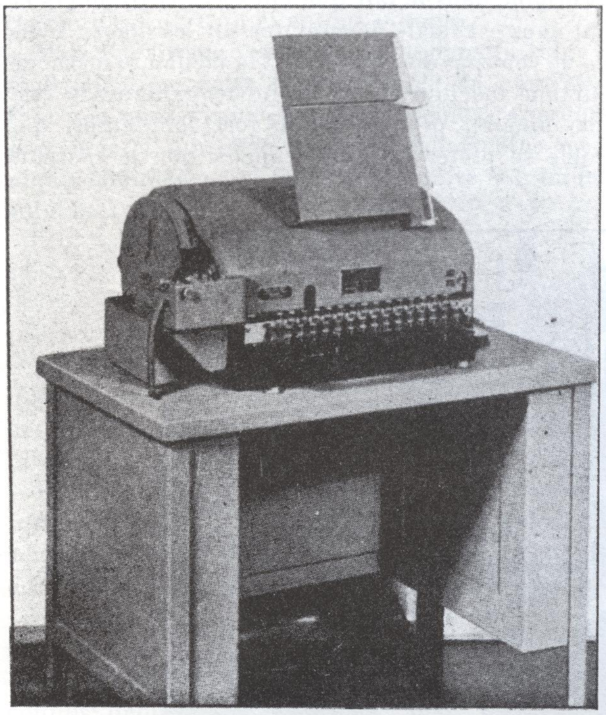

Fig. 11.

Les machines des Bell Laboratories (fig. 10 à 12). — Voici d'abord (fig. 10) une vue d'ensemble du *calculateur balistique.* C'est une machine bien moins encombrante : elle travaille sur 10 chiffres au lieu de 23, mais elle a la même disposition avec des panneaux de relais les uns à côté des autres ; il y a 5 panneaux et plusieurs meubles.

Voici deux de ces meubles contenant respectivement :

une *perforatrice* (fig. 11) propre à effectuer l'enregistrement de toutes les bandes primaires (qu'un autre appareil contrôlera et transposera en bandes codées plus courtes et mieux appropriées au calcul) ;

un système *d'enregistrement* (fig. 12) par tables de chiffres et par perforations ; un couvercle latéral du meuble est levé pour laisser voir le dispositif d'impression en pages. Pour les meubles de ce type, l'étanchéité sonore est assurée pour permettre aux opérateurs de travailler dans le calme.

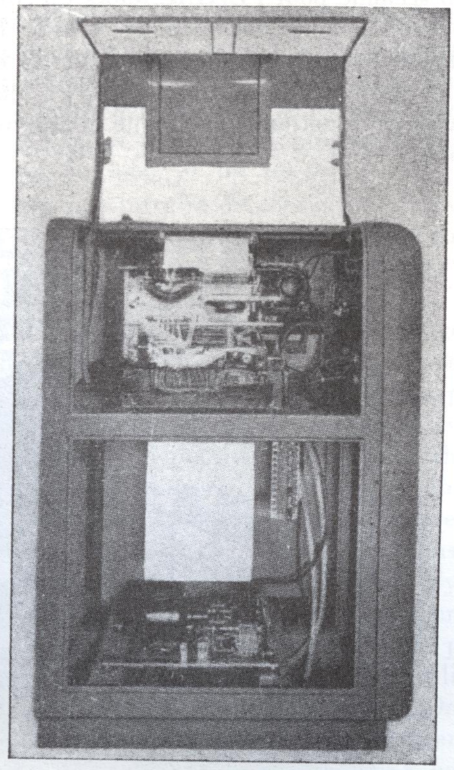

Fig. 12.

Le « calculateur » ENIAC. — Voici (fig. 13) une vue d'ensemble de cette machine électronique, avec ses 18 000 tubes répartis sur tous les panneaux tout autour de la pièce. L'opérateur qui est au premier plan est en train de tourner les commutateurs pour inscrire les chiffres qui seront utilisés dans un calcul. La salle est en sous-sol et comporte toute une énorme installation (qu'on ne distingue pas bien sur la figure) de canalisations qui font tout le tour de la pièce pour dissiper la chaleur dégagée par ces milliers de tubes.

Durées de fonctionnement des organes de l'ENIAC
(exprimées en prenant pour *unité* la durée élémentaire d'une addition, soit un tiers de milliseconde).

Organes	Fonctions accomplies	Durées
Emmagasineur	Reçoit un nombre, l'ajoute au nombre déjà emmagasiné, ou transmet le nombre emmagasiné, ou son complément à 9, r fois successivement (avec $(1 \leqslant r \leqslant 9)$.	r
Multiplicateur	Trouve avec son signe le produit d'un multiplicande d'au plus 10 chiffres par un multiplicateur de p chiffres (avec $2 \leqslant p \leqslant 10$).	$p + 4$
Diviseur et extracteur de racines carrées	Trouve p chiffres, soit du quotient (avec son signe), soit de la racine carrée.	environ $13 \times (p + 1)$ (selon les chiffres des arguments).
Table de fonctions	Choisit la valeur de la fonction correspondant à un argument donné avec 2 chiffres, ou bien l'une quelconque des 4 valeurs voisines, puis la transmet, elle ou son complément (r fois successivement).	$r + 4$
Émetteur des constantes	Émet (avec son signe) un nombre de 5 ou 10 chiffres préalablement lu sur une carte perforée ou emmagasiné dans les relais.	1

Ce qui distingue cette machine est son extrême vitesse. Cette vitesse est caractérisée par la durée élémentaire d'une addition, le temps d'une série quelconque d'opérations s'exprimant en fonction de cette durée élémentaire prise pour unité, ainsi qu'il ressort du tableau précédent. Or cette unité est de 1/3 000 seconde pour l'ENIAC, alors qu'elle est de 1/3 seconde pour la machine de AIKEN. Elle est donc 1 000 fois plus rapide que celle-ci, mais en regard de cette qualité considérable, il y a son défaut de sécurité de fonctionnement, que nous avons déjà mentionné.

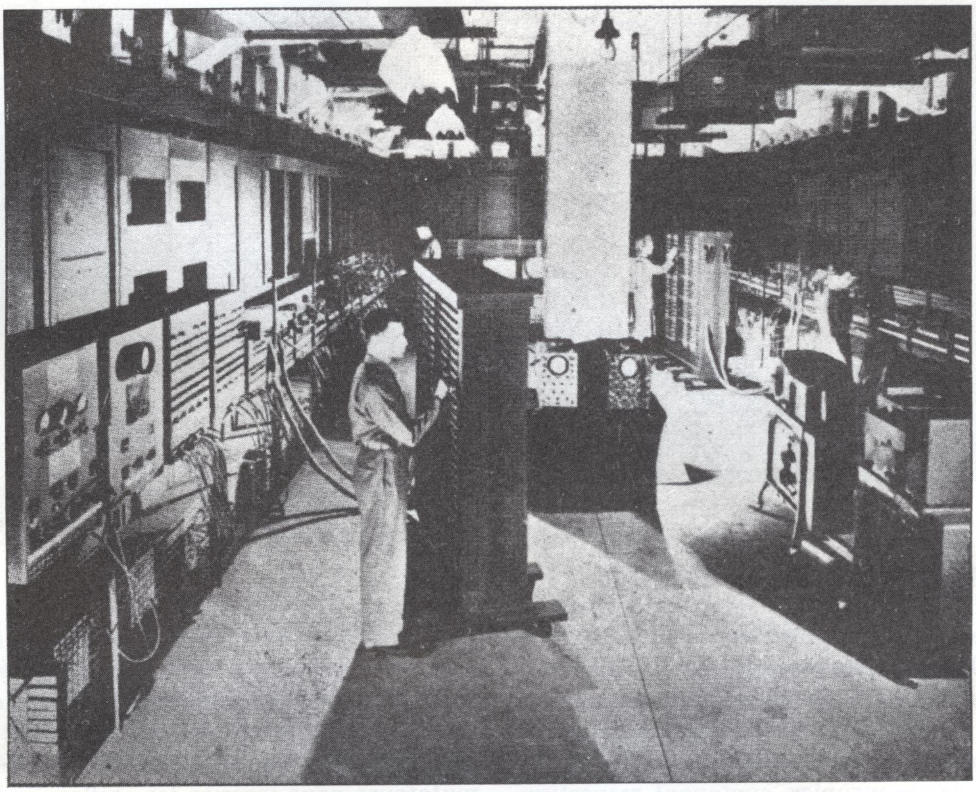

FIG. 13.

IV. DISPOSITIONS DE PRINCIPE ET PROCÉDÉS TECHNIQUES APPLICABLES A L'ACCOMPLISSEMENT DES PRINCIPALES FONCTIONS A ASSURER

Au cours des descriptions ou explications précédentes, nous avons eu l'occasion d'énumérer et de résumer les principales opérations et fonctions accomplies par les machines. Nous allons maintenant examiner les moyens permettant de remplir ces missions, sans toutefois entrer dans des détails techniques qui déborderaient le cadre de cet exposé, et sans revenir sur les opérations arithmétiques proprement dites, sinon à l'occasion de l'examen du système de numération optimum.

Système de numération optimum : le système binaire, ses avantages pour des machines du type électrique ou électronique. Les systemes hybrides utilisés jusqu'à présent.

Tout d'abord, il faut faire choix d'un système de numération. Nous sommes habitués à la numération décimale ; en fait, il semble que ce système ait son origine dans le fait que nous avons 10 doigts et qu'il nous est facile de compter sur les doigts, mais cela ne veut pas dire que ce soit la meilleure méthode pour une machine. C'est un autre système, le système binaire, proposé depuis fort longtemps, qui semble se prêter beaucoup mieux que le système décimal aux opérations mécanisées. Pour expliquer ce que l'on entend par système binaire, nous allons écrire les premiers nombres :

Système décimal	0	1	2	3	4	5	6
Système binaire	0	1	10	11	100	101	110

Système décimal	7	8	9	10	11
Système binaire	111	1000	1001	1010	1011

Ainsi en système binaire, nous ne garderons dans la numération que des 0 et des 1. Au lieu que ce soient les puissances de 10 qui soient représentées par 10, 100, 1 000, etc., ce sont alors les puissances de 2.

Les avantages de cette numération sont extrêmement nombreux. Elle présente sans doute un inconvénient, qui saute aux yeux immédiatement, c'est qu'un nombre aura une expression chiffrée beaucoup plus longue que dans la numération décimale : en fait 3 fois plus longue à peu près. Mais par contre nous n'avons que 2 signes, les 0 et les 1 ; et même nous pouvons négliger d'inscrire le 0 : il suffit d'inscrire les positions où il y a des 1 ; nous n'avons donc qu'un chiffre là où nous en avons 10 dans le système décimal. Au total en tenant compte de la longueur accrue, 3 fois moins de caractères à imprimer et c'est déjà un avantage notable.

Mais l'avantage écrasant réside dans la table de multiplication, cette fameuse table de multiplication que nous avons eu tant de peine à apprendre par cœur et qui gêne beaucoup la machine mécanique elle-même ; elle est ici réduite au tableau suivant :

	0	1
0	0	0
1	0	1

On ne peut pas trouver plus simple. C'est dire que les multiplications se réduisent directement à des additions : la multiplication n'est pas plus compliquée qu'une addition.

Pour la division, il n'en est pas de même, et la meilleure manière de la réaliser semble être d'utiliser un comparateur ou une méthode d'ajustement de multiplications successives jusqu'à ce que le produit arrive au même niveau que le nombre qu'il s'agit de diviser

Ces avantages de la numération binaire sont connus depuis fort longtemps, mais nous découvrons maintenant un avantage nouveau : la numération binaire s'adapte admirablement au calcul électrique. Le 0, c'est le relais non excité, le 1, c'est le relais excité ; on peut donc, avec la numération binaire, réaliser toutes les opérations sur des relais du type courant. Il n'est pas nécessaire de recourir au relais rotatif, qui est de construction beaucoup plus complexe ; toute la machine se réduit à des relais standard uniformes.

Au lieu d'utiliser des relais, pensons maintenant à des systèmes à lampes électroniques. Le relais à deux positions est remplacé par un système à deux lampes électroniques, appelé « flip-flop », dont voici le principe : C'est exactement un multivibrateur d'Abraham et Bloch, dans lequel on a remplacé les condensateurs shuntés par des contre-batteries ; c'est un système à positions d'équilibre stable ; dans une position, une lampe est au zéro et l'autre au maximum ; dans l'autre position, la première lampe est au maximum et l'autre au zéro ; une impulsion fait basculer le système d'un régime à l'autre. Donc, le flip-flop remplace exactement le relais dans tous les calculs faits au moyen de lampes et c'est le succès de ce montage qui a été démontré par l'expérience de l'ENIAC.

La numération binaire est donc extrêmement précieuse, parce qu'elle s'adapte merveilleusement aux circuits électriques ; les circuits électriques nous permettent d'utiliser une technique très développée, très avancée et nous pouvons nous servir de l'expérience des téléphonistes et radio-électriciens.

Le système binaire a toutefois quelques inconvénients : les données de départ nous sont fournies dans le système décimal ; il faut donc un traducteur décimal-binaire à l'entrée de la machine et un traducteur binaire-décimal à la sortie. Cela n'aurait pas de sens d'utiliser le système binaire dans une machine à additionner ou dans une caisse enregistreuse de magasin, parce que là, le calcul est trop vite fait pour qu'on ait intérêt à l'alourdir par une double traduction à l'entrée et à la sortie. Dans des machines mathématiques où le calcul suppose un très grand nombre d'opérations intermédiaires entre les données initiales et les résultats finals, il est avantageux au contraire de consentir ce travail de traduction à l'entrée et à la sortie, à cause de l'énorme simplification apportée à toutes les étapes intermédiaires.

Cela dit, le système binaire est-il employé dans les machines américaines ? Nous pouvons répondre : non. Les Américains n'ont pas encore osé l'employer. Mr Couffignal avait proposé l'emploi du système binaire dans des machines à relais, dans sa thèse de 1936 ; les Américains en ont discuté à plusieurs reprises et ils bâtiront des machines binaires plus tard, car von Neumann à Princeton est convaincu de l'excellence du système binaire ; mais il n'y a pas encore de machine binaire en fonctionnement. En revanche, les constructeurs ont été choqués par les complexités du système décimal et ils ont utilisé des combinaisons hybrides assez curieuses. Dans la machine des Bell Telephone Laboratories, on emploie un système de numération dit « quinaire », basé sur l'utilisation des chiffres de 0 à 5. Les nombres au delà de 5 s'obtiennent en additionnant $5+1$, $5+2$, $5+3$, $5+4$; avec des schémas électriques fort ingénieusement étudiés, on peut faire toutes les additions dans ce système hybride au moyen de relais ordinaires, sans relais rotatifs, sans relais décimaux.

Dans la machine ENIAC, on n'utilise pas non plus le système binaire, mais les nombres de 0 à 10 sont représentés par des combinaisons semblables à celles qu'on emploie dans les balances avec les boîtes de poids ; il n'y a que 4 éléments au lieu de 9 : 1, 2, 2 et 4.

Dans la machine Mark II, la numération binaire est utilisée jusqu'à 10, c'est-à-dire que chaque ordre décimal est interprété en binaire, mais la division en groupes de 10 est conservée. Cela revient à utiliser 1, 2, 4 et 8 au lieu d'utiliser 1, 2, 2 et 4 comme dans l'ENIAC. On s'est aperçu d'ailleurs, après coup, que la combinaison de l'ENIAC, 1, 2, 2 et 4 était plus avantageuse que la combinaison 1, 2, 4 et 8, car elle permet de former plus facilement les compléments à 9 qui sont nécessaires pour les soustractions.

En fait, le système binaire est incontestablement le système d'avenir ; plus vite on y arrivera, mieux cela vaudra, car on sera obligé, pour les machines réellement perfectionnées, de faire toutes les opérations en binaire.

Les procédés d'enregistrement au service des fonctions de programme et de mémoire.

Ce sont ces deux fonctions qui sont vraiment nouvelles et caractérisent les grandes machines modernes par rapport aux anciennes. De quelles méthodes dispose-t-on techniquement pour représenter le programme et la mémoire ? Nous allons examiner les différents procédés techniques, en commençant par les plus lents et en terminant par les plus rapides, qui seront certainement les plus avantageux quand on voudra les associer à des systèmes électroniques.

Enregistrement par perforations. — Premier système : les *cartes perforées* du modèle standard I. B. M., qui sont encore employées dans un grand nombre d'applications.

Ensuite les *bandes perforées* permettent déjà l'inscription d'un nombre de données plus considérable et une manipulation plus rapide que les cartes. Nous avons maintenant deux appareils à bandes perforées sur le marché : les appareils de l'I. B. M. et les systèmes de télétype. Les constructeurs américains semblent s'orienter de préférence vers l'emploi des machines de télétype comme étant les plus pratiques.

Enregistrement magnétique. — Comme système de mémoire ou de programme permettant de travailler déjà plus vite, nous trouvons le fil magnétique tel qu'on l'emploie dans l'enregistrement des phonogrammes par aimantation du fil. Ce fil magnétique présente toutefois un inconvénient, c'est qu'on ne peut le lire qu'en mouvement ; il est impossible de le lire au repos, donc il est très difficile de vérifier si on a bien inscrit correctement sur le fil magnétique un certain programme qu'on veut faire réaliser par la machine. Il faut tenir compte du fait qu'il se produit toujours des erreurs au moment où l'on fabrique la bande de programme ; il peut s'introduire aussi des erreurs ultérieurement dans le fonctionnement de la machine et il est toujours indispensable de pouvoir rechercher systématiquement où est l'erreur ; il est très commode, de ce point de vue, d'utiliser une bande perforée ou des cartes perforées, que l'on peut réexaminer tout à loisir, pas à pas. Cette opération est difficile sur le fil magnétique et c'est un des inconvénients de son emploi.

Enregistrement photographique. — Ensuite, nous avons la possibilité d'employer des films photographiques et nous avons vu que la question est à l'étude chez KODAK : toute une équipe de chercheurs y travaille à mettre au point un système d'enregistrement de points noirs sur fond blanc ou de points blancs sur fond noir remplaçant la perforation, avec des dimensions beaucoup plus petites.

Système ENIAC (trains d'ondes élastiques). — Arrivons au type de mémoire employé sur l'ENIAC, qui cause encore bien des difficultés. Le nombre qu'il s'agit de conserver est représenté par une série d'impulsions à une certaine distance les unes des autres ; on envoie cette série d'impulsions sur un quartz piézo-électrique, qui les transforme en signaux ultra-sonores ; ces signaux ultra-sonores se propagent ensuite dans un tube rempli d'un liquide, soit du mercure, soit un mélange d'eau et d'alcool ; quand le signal arrive au bout du tube, il est repris par un quartz piézo-électrique, remis en forme parce qu'il a été déformé pendant sa propagation et renvoyé à l'entrée du système où il recommence à faire son trajet. Lorsqu'on veut réutiliser le signal, on attend le moment où le signal spécial dont on a besoin arrive à la sortie et on le saisit à cet instant.

Un système analogue a déjà été utilisé dans le radar, mais il n'est pas très précis ; les constantes du tube empli de mercure dépendent de la température ; on n'arrive pas à isoler suffisamment ces tubes contre les échauffements extérieurs et il faut tout un système de rattrapage de jeux, avec un signal standard qui sert de point de départ, et à partir duquel on comptera le temps, pour trouver le signal dont on a besoin. C'est un organe assez compliqué, qui n'est pas tout à fait sûr pour le moment. La principale difficulté dans l'ENIAC actuellement semble être l'échauffement des tubes à mercure, produisant un décalage des signaux qu'on ne trouve plus à leur place, de sorte qu'on recueille un signal n'ayant aucun rapport avec celui qu'on voulait retrouver.

Essai d'une variante électromagnétique. — On a pensé à un autre système, on a discuté l'emploi de signaux électromagnétiques sur des câbles à propagation lente, des lignes avec un conducteur spiralé. Mais ce système est trop rapide; on n'arrive pas à ralentir suffisamment les signaux sur des lignes spiralées pour que des longueurs raisonnables puissent être utilisées. Un ralentissement des signaux électromagnétiques au centième de la vitesse de la lumière semble actuellement la limite, mais c'est encore extrêmement rapide par rapport au délai dont on a besoin dans la machine à calculer et, pour le moment, on n'envisage guère l'utilisation de ce système.

Système R. C. A. (Selectron). — Enfin, l'appareil de mémoire idéal, quand il existera, sera ce fameux sélectron de la R. C. A., dans lequel des taches lumineuses sont maintenues par un phénomène d'émission secondaire, de sorte qu'on envoie un signal qui s'inscrit, reste en place, maintenu par une émission secondaire, et que l'on va rechercher ensuite par des connexions convenables au moment où on en a besoin. Malheureusement, pour la pratique, il s'agirait d'arriver à inscrire 10 000 points sur l'écran de l'appareil et actuellement on ne sait pas fabriquer de tubes qui captent tant de points d'une façon certaine. C'est une étude technique très importante, qu'il faut surveiller de près, mais qui n'est pas au point actuellement.

Mesures prises pour assurer la précision et l'exactitude.

La *précision* des résultats est inévitablement limitée par celle des données elles-mêmes, dont on ne garde qu'un nombre limité de chiffres ; on en conserve 10, ou 15, ou 23, ou 46 si l'on met deux chiffreurs de 23 l'un au bout de l'autre, mais on fait toujours une erreur sur le dernier chiffre, qu'on arrondit à l'entier le plus voisin, de telle sorte qu'il s'introduit une erreur de 1/2, au maximum, sur la dernière unité ; c'est ce que les Américains appellent *the "rounding-off" error*, dont la traduction n'est pas très commode : erreur d'*arrondissement* ne convient guère ; un de nos amis, Jean PAULHAN, m'a suggéré erreur « *d'arrondiement* » ; ce vieux mot se trouverait dans la langue française du XVI^e siècle ; le mot « *arrondissage* » existe dans Littré. Cette erreur d'arrondiement, ou d'arrondissage, est évidemment d'autant plus grande qu'on fait un plus grand nombre d'opérations. Dans le cas le plus défavorable, l'erreur, après N opérations, pourrait atteindre N fois 1/2 sur le dernier chiffre. Mais il y a des compensations et l'erreur la plus probable augmente comme la racine carrée du nombre des opérations. Pour diminuer cette première erreur, il conviendrait de diminuer autant qu'on le peut le nombre des opérations arithmétiques ; seulement, dans d'autres opérations, nous avons avantage à augmenter, au contraire, le nombre des opérations. Quand nous calculons une intégrale et que nous la remplaçons par une somme finie de termes, le résultat séra d'autant meilleur que notre subdivision sera faite suivant des intervalles plus étroits et que, par conséquent, nous aurons augmenté le nombre des opérations. De même, quand nous calculons une dérivée, nous prenons des rapports de différences finies et nous avons intérêt à rapprocher les intervalles le plus possible, ce qui augmente le nombre des opérations.

Donc, avant de commencer un problème quelconque, il faut se livrer à une étude préliminaire, il faut choisir l'intervalle fondamental qui donne l'erreur la plus réduite par un compromis entre ces erreurs d'arrondiement, qui augmentent avec le nombre des opérations, et les erreurs faites sur les intégrales ou les dérivées, qui au contraire diminuent lorsqu'on augmente le nombre des opérations. C'est le rôle du mathématicien de discuter, sur chaque problème, la meilleure utilisation de la machine.

En fait, sur la machine de Harvard, qui calcule avec 23 chiffres, les opérations aboutissent à une quinzaine de chiffres valables ; il faut faire sauter les 8 derniers chiffres des résultats, si on veut être sûr de ce qu'on obtient.

En ce qui concerne *l'exactitude*, c'est une question de contrôle, et nous en avons déjà dit quelques mots. Il existe des dispositifs de contrôle extrêmement variés sur les différentes machines.

Sur la machine de Harvard et sur l'ENIAC, les calculs sont faits en double par des procédés différents et sur des compteurs différents ; les résultats sont comparés et dès qu'il y a discordance une lampe rouge met en route une sonnerie puissante et alerte les opérateurs du voisinage.

Dans la machine des Bell Telephone Laboratories, le système de contrôle est différent. On a réservé sur chaque relais un circuit de contrôle et ces circuits sont agencés de telle sorte que, lorsque les relais marchent régulièrement, certains circuits doivent toujours être fermés et certains autres circuits doivent toujours être ouverts. C'est une technique très semblable à celle d'un central téléphonique automatique. On n'a pas alors besoin d'un double calcul, ce qui simplifie d'autant l'utilisation de la machine et garantit une grande sécurité.

Analogies techniques et fonctionnelles. Perspectives d'avenir.

Nous avons signalé à propos du système utilisé sur la machine ENIAC pour remplacer les dispositifs d'enregistrement habituels, jugés trop lents, que ce système avait déjà été utilisé dans la technique du Radar. Mais c'est toute la technique des impulsions, de leur création et de leur utilisation par des moyens électromécaniques et électroniques qui apparaît en communauté avec les télécommunications. La machine à calculer électronique transmet toutes les indications d'un compteur à l'autre, par des impulsions électriques qui diffèrent les unes des autres par leur déplacement dans le temps ; des principes très semblables sont proposés ou appliqués dans les nouveaux systèmes de modulation par impulsions, applicables à la téléphonie, à la télécommande, etc. Dans les deux problèmes on a besoin de lignes à retard : dans les machines à calculer c'est pour la mémoire, en télécommunication c'est pour assurer la signification même des signaux. Un examen plus approfondi montrerait bien d'autres similitudes : ainsi la modulation par impulsions fait souvent usage (sans le savoir) des principes de la numération binaire.

Mais voici une autre analogie, purement fonctionnelle cette fois et assez inattendue, car elle concerne une branche de la physiologie : celle du système nerveux. Les techniciens et les mathématiciens qui ont bâti la machine de l'ENIAC et qui ont combiné des systèmes à numération binaire, avec des circuits à ondes ultra-sonores, à propagation lente, en circuit fermé, pour représenter la mémoire, ces mathématiciens se sont un jour rencontrés avec des physiologistes spécialistes du système nerveux. Ils ont été très surpris de constater qu'on trouve dans le système nerveux une série d'organes ressemblant étrangement à ceux d'une machine à calculer électronique, et que le système nerveux fonctionne par impulsions successives, comme la machine ENIAC. En effet, dans le système nerveux la mémoire, dans un très grand nombre de cas, est réalisée par des propagations lentes sur des circuits fermés, où le signal est remis en forme chaque fois qu'il passe par une cellule, pour rester disponible jusqu'au moment où on a besoin de l'utiliser ultérieurement. Dans une série de conférences passionnantes entre des physiologistes, spécialistes du système nerveux, et des ingénieurs, les discussions ont conduit à une bien meilleure compréhension du système nerveux qu'on ne l'avait auparavant, et aussi de la part des physiologistes à la suggestion de quelques problèmes aux ingénieurs. « Voici un circuit que je trouve dans le système nerveux, déclare le physiologiste, essayez donc de m'expliquer à quoi il sert et quel est son fonctionnement. »

Il y a là un rapprochement extrêmement intéressant, qui montre que les possibilités d'applications des machines mathématiques peuvent être considérables, car le jour où nous aurons réalisé un système équivalant au système nerveux, nous ne serons pas très loin de pouvoir faire une partie du travail que fait effectivement le système nerveux dans un être vivant.

La machine mathématique deviendra, à ce moment-là, l'organe universel de servo-commande, le « cerveau mécanique » capable de remplacer l'opérateur humain dans un grand nombre de ses travaux. Soit, par exemple, à contrôler une usine chimique : des appareils de mesure enregistrent les pressions, températures, débits de gaz, la composition chimique des produits. Une formule optimum d'utilisation des appareils a été choisie par les ingénieurs et les théoriciens. La machine mathématique reçoit toutes les indications mesurées, calcule la formule et effectue en conséquence les corrections ou changements de marche de l'installation. Tout un avenir industriel s'ouvrira certainement à ces nouveaux robots, dès qu'ils seront sortis du stade expérimental actuel.

ÉPILOGUE. — Arrivé au terme de cet exposé, nous tenons à dire, parce que c'est très touchant pour nous tous Français, la cordialité de l'accueil que nous avons reçu, Mr COUFFIGNAL et moi, dans tous les laboratoires et dans tous les centres d'études des États-Unis, la générosité avec laquelle les Américains ont mis à notre disposition tous les renseignements sur leurs machines ; ces machines étaient secrètes pendant la guerre, mais du jour où le secret a été levé, elles ont été ouvertes entièrement aux visiteurs, et non seulement elles sont ouvertes, mais les Américains nous demandent d'envoyer des jeunes gens pour travailler avec eux, pour les aider à monter les machines actuellement en cours d'exécution et ainsi acquérir empiriquement, en travaillant parmi les collègues américains, toute l'expérience et tous les trucs de cette technique nouvelle.

Réciproquement les spécialistes américains ont été extrêmement intéressés, dans les discussions que nous avons eues avec eux, par les propositions de Mr COUFFIGNAL ; ils suivent avec un intérêt passionné les réalisations qui se font en France. Ils demandent qu'on les tienne au courant des progrès réalisés chez nous et des résultats obtenus avec des méthodes de construction différentes de celles qu'ils ont envisagées eux-mêmes ou qu'ils ont réalisées.

Manuscrit reçu le 7 juillet 1947.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I. LES MACHINES DU MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. THE DIFFERENTIAL ANALYSER.

[1] V. BUSH, *Journal of the Franklin Institute*, vol. **212**, p. 447, 1931.

[2] V. BUSH et S. H. CALDWELL, *Journ. Fr. Institute*, vol. **240**, p. 255, 1945 [avec une bibliographie détaillée].

II. LES MACHINES DU PROFESSEUR AIKEN A HARVARD.

[3] The Automatic Sequence Controlled Calculator. M. H. AIKEN et G. M. HOPPER, *Electrical Engineering* : I. — Août-septembre 1946 ; II. — Octobre 1946 ; III. — Novembre 1946.

[4] *The Manual of Operation of the Automatic Sequence Controlled Calculator*, 1 vol. Harvard University Press. — Cambridge, Mass., 1946 (prix : 10 dollars) [contient tous les détails de montage du modèle « Mark I »].

[5] *Harvard Alumni Bulletin*, vol. **49**, nº 4, novembre 1946, pp. 174-178.

[6] *I. B. M. Automatic Sequence Controlled Calculator.* Notice de l'Intern. Business Machine Corp. (6 pages + 1 dépliant).

[7] *Comptes rendus du* « Symposium of Large Scale Digital Calculating Machinery », at Harvard University (janvier 1947), Harvard University Press, Cambridge, Mass, *(à paraître prochainement)*.

III. LES MACHINES DES BELL TEL. LABORATORIES.

Bell Laboratories Record :

[8] C. CESAREO, *The Relay Interpolator*, vol. **24**, p. 457, 1946.

[9] J. JULEY, *The Ballistic Computer*, vol. **25**, pp. 5-9, 1947.

[10] S. B. WILLIAMS, *A Relay Computer for general Application*, vol. **25**, pp. 49-54, 1947.

IV. LA MACHINE ÉLECTRONIQUE DE PHILADELPHIE.

[11] H. H. GOLDSTINE et Adèle GOLDSTINE, The Electronic Numerical Integrator and Computer. *E. N. I. A. C. Mathematical Tables and Aids to Computation*, vol. **2**, nº 15, pp. 97-110, juillet 1946.

[12] A. W. BURKS, Electronic Computing Circuits of the E. N. I. A. C., *Proc. Inst. Radio Engineers*, vol. **35**, pp. 756-767, août 1947.

V. LES PROJETS DE PRINCETON.

[13] *Rapports* (non publiés ; écrire directement pour information), par J. V. NEUMANN, H. GOLDSTINE et A. W. BURKS. Institute of advanced Studies, Princeton, N. J.

Les figures illustrant cet article ont été extraites de cinq des publications précitées, correspondant aux rubriques :

[5] P. 6 (fig. 1). — Dépliant (fig. 2, 4, 5, 6, 8).
[6] P. 177 (fig. 3). — P. 176 (fig. 7). — P. 179 (fig. 9).
[9] P. 8 (fig. 10).
[10] P. 53 : col. dr. (fig. 11), col. g. (fig. 12)
[11] P. 99 (fig. 13).