

JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

PIERRE VENDRYÈS

La relation articulaire en informatique

Journal de la société statistique de Paris, tome 108 (1967), p. 128-156

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1967__108__128_0

© Société de statistique de Paris, 1967, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (<http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques

<http://www.numdam.org/>

III

LA RELATION ARTICULAIRE EN INFORMATIQUE

Le traitement de l'information, ou informatique, prend une place grandissante dans la vie moderne. Grâce à ses incessants progrès technologiques, il étend son champ d'application à des domaines de plus en plus variés.

Je me propose de montrer que les fonctions élémentaires des machines qui effectuent ces traitements s'interprètent en utilisant deux concepts de *Physiologie théorique*.

Ces concepts sont : *la mise en réserve* et *la relation articulaire*.

Comme l'idée fondamentale de la physiologie théorique est celle d'*autonomie*, au point que ces deux concepts ne prennent tout leur sens que par la notion d'autonomie, la conclusion générale sera que les machines à traiter l'information ont été conçues afin de pouvoir être au service d'une activité douée d'autonomie, la pensée humaine.

Cet exposé est le quatrième d'une série, dont les trois premiers, qui seront désignés par (I), (II) et (III), ont paru dans le Journal de notre Société : (I) *Mathématique déterministe et mathématique de l'aléatoire*, en janvier 1962; (II) *Aléatoire et déterminisme de la relation articulaire*, titre préférable à celui que j'avais donné : *Déterminisme et aléatoire de la relation articulaire*, en avril 1963; (III) *Aléatoire et déterminisme des articulations mentales*, en avril 1965. C'est par son intégration dans cet ensemble que ce nouvel article peut prendre toute sa signification.

I. LA PHYSIOLOGIE THÉORIQUE ET LA RELATION ARTICULAIRE

Pour éviter que le lecteur n'ait à se reporter ni à ces articles (I), (II) et (III), ni à l'article condensé *Éléments de physiologie théorique* que j'ai publié dans la *Presse médicale*, le 23 avril 1966, je vais résumer les notions fondamentales qui vont être indispensables.

La physiologie théorique peut se résumer en une seule phrase : *En se rendant indépendant du milieu extérieur, l'animal acquiert la possibilité d'entrer avec lui en relations aléatoires*. Tel est le thème fondamental de l'interprétation probabiliste de l'autonomie que j'ai conçue en avril 1937 et dont j'ai présenté un premier exposé d'ensemble dans mon livre *Vie et probabilité*, de 1942.

Se rendre indépendant du milieu extérieur, c'est acquérir son autonomie par rapport à lui. L'autonomie, en effet, est une acquisition de l'organisme vivant. Deux mécanismes interviennent dans ce but : la *mise en réserve* et le *mécanisme régulateur*.

Ayant acquis son autonomie, l'animal a encore à s'en servir. Un mécanisme joue alors un rôle très important : le *mécanisme articulé* (II).

Ce schéma très condensé permet de situer dans la physiologie théorique trois fonctions : la mise en réserve et la régulation physiologique, qui participent à l'acquisition de l'autonomie, et le mécanisme articulé, qui est l'outil nécessaire à l'usage de l'autonomie.

En raison du rôle qu'elles vont jouer, les notions de *relation déterministe*, de *relation aléatoire* et enfin de *relation articulaire* doivent être à nouveau définies.

1. Entre deux objets, une relation est *déterministe* lorsqu'elle est ce qu'elle est et ne peut simultanément être autre que ce qu'elle est. Ce caractère d'unicité lui est essentiel. Il y a un seul cas possible. Il en résulte que l'évolution à venir d'un processus déterminé est prévisible.

2. La définition de la relation *aléatoire* est plus complexe, car elle doit être décomposée en deux temps successifs. L'aléatoire se décrit dans le temps.

a) Avant sa réalisation, l'épreuve aléatoire comporte une multiplicité de cas simultanément possibles. Ce caractère de multiplicité lui est essentiel. La pluralité de cas simultanément possibles permet de définir l'*indéterminisme*. Et, de cette manière, l'indéterminisme acquiert une définition positive, au lieu d'être considéré comme une simple négation du déterminisme. Entre deux objets, les relations sont indéterministes lorsqu'elles peuvent se réaliser de multiples manières simultanément possibles. Il en résulte que l'évolution à venir d'un processus indéterminé est imprévisible.

b) Au moment de la réalisation de l'épreuve, apparaîtra l'incompatibilité des cas possibles : un seul d'entre eux se réalisera, à l'exclusion de tous les autres. Par exemple, parmi les 52 cartes d'un jeu, on en tirera au hasard une quelconque, mais une seule, à l'exclusion des 51 autres.

Comme, après la réalisation de l'épreuve, un et un seul cas s'est réalisé, on se retrouve dans le cas du déterminisme. Le nombre des cas possibles est réduit à l'unité, et le déterminisme apparaît comme un cas particulier de l'aléatoire.

Le moment présent, où l'unicité remplace la multiplicité des cas possibles, coupe l'avenir du passé. C'est l'un des aspects de l'irréversibilité du temps. Il n'y aurait pas de véritable justice pour un joueur qui vient de gagner si l'on décidait de recommencer le jeu, même en lui rendant ses chances. Malgré ce qu'à d'irritant cette impossibilité d'un retour en arrière, l'aléatoire ne peut être éliminé de la nature. D'ailleurs, si tout était déterminé, rien ne serait possible.

Les relations aléatoires peuvent souvent être soumises à un traitement mathématique. On définit alors les *probabilités* relatives des divers cas simultanément possibles.

En intermédiaire entre le déterminisme et l'aléatoire, se place le *conditionnement*. Celui-ci modifie la répartition des probabilités entre les cas possibles, diminuant ou augmentant les unes au profit ou au détriment des autres; mais il n'est pas assez efficace pour devenir une détermination, qui, elle, annule les probabilités de tous les cas, sauf pour un et un seul, lequel est alors déterminé, puisque sa probabilité s'égalise à 1.

La distinction entre deux types de relations, la déterministe et l'aléatoire, n'est pas arbitraire. Elle a son fondement dans la nature. C'est ce qu'affirme l'énoncé suivant : Entre deux objets, les relations sont déterministes, lorsqu'ils sont liés entre eux; et elles sont indéterministes, lorsqu'ils sont indépendants l'un de l'autre. *L'indépendance* est la condition nécessaire et suffisante de l'indéterminisme. Et l'aléatoire, dont l'indéterminisme est le premier temps, a pour condition nécessaire cette indépendance. On retrouve ainsi, précisée, l'importance que Cournot, au XIX^e siècle, avait attribuée à l'idée d'indépendance dans sa conception du hasard.

Et cela donne tout son sens à la phrase que j'ai rappelée déjà : « En se rendant indépendant du milieu extérieur, l'animal acquiert la possibilité d'entrer avec lui en relations aléatoires. » C'est dire qu'il acquiert la possibilité d'avoir, pour tout moment futur, de multiples relations simultanément possibles avec ce milieu, et de choisir l'une quelconque d'entre elles, en excluant les autres.

Il faut alors montrer en quoi et pourquoi le *mécanisme articulé* est celui même grâce auquel l'animal peut se servir de son autonomie et entrer en relations aléatoires avec le milieu extérieur.

La relation articulaire.

Le concept de *relation articulaire* s'abstrait à partir de la physiologie des os, des muscles et des nerfs (II). Le squelette est fait de pièces et de morceaux, qui sont articulés entre eux.

1. Deux os articulés sont séparés par une cavité articulaire. Et, ainsi, ils sont mécaniquement indépendants. La condition nécessaire de l'aléatoire est réalisée.

2. Grâce à cette indépendance, les deux os peuvent prendre l'un par rapport à l'autre de multiples positions simultanément possibles. En statique corporelle, par exemple cet indéterminisme concerne aussi bien les postures des segments de membre, les uns par rapport aux autres, que les attitudes générales du corps par rapport au milieu extérieur.

3. Ces multiples positions sont incompatibles entre elles. Un animal ne peut être simultanément couché, assis et debout, ni effectuer simultanément des mouvements de flexion et d'extension d'un membre.

4. Parmi ces possibles, la mécanique corporelle exige, à tout moment, des sélections. L'animal doit choisir, moment après moment, une attitude déterminée, des postures déterminées, des gestes déterminés. Ces choix sont réalisés par le système nerveux central et les contractions musculaires. La physiologie neuro-musculaire ne peut être dissociée de la physiologie ostéo-articulaire. Dans le fonctionnement d'une articulation, on ne peut faire abstraction des muscles qui la meuvent et du système nerveux qui les commande.

La neurophysiologie devra expliquer comment le système nerveux est organisé de manière à contrôler la mécanique corporelle *dans tous les cas possibles*. La multiplicité des conditions extérieures possibles, la multiplicité des attitudes possibles, la multiplicité des gestes possibles imposent irréductiblement au système nerveux de fonctionner dans les conditions de l'indéterminisme. Tel est le sens à donner au maintien des postures segmentaires par la régulation du tonus musculaire à partir des récepteurs neuromusculaires, ou les actions plus globales des centres du tronc cérébral et des réflexes d'origine vestibulaire, ou le contrôle plus complexe du cervelet. La mécanique corporelle doit être assurée pour toutes les attitudes possibles, pour tous les gestes possibles, dans toutes les conditions possibles.

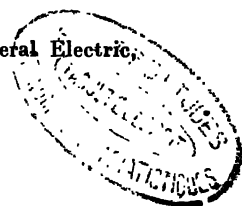
Il reste alors à concevoir la *relation articulaire* dans toute sa généralité. Car, abstraite de la physiologie, elle a un domaine d'application incommensurablement plus vaste (II et III) : cinématique appliquée, acoustique, linguistique, logique, mathématique appliquée, ... D'autre part, elle se miniaturise avec la physiologie théorique au niveau de la cellule; les enzymes, par exemple, doivent être considérés comme des agents d'articulation entre molécules biochimiques.

L'essentiel est que la relation articulaire se décrive selon le même patron que la relation aléatoire. Au premier temps d'indéterminisme, la multiplicité des gestes possibles correspond à la multiplicité des cas possibles. Au moment de l'exécution d'un geste correspond le moment de la réalisation de l'épreuve aléatoire. Pour une même raison d'incompatibilité, un et un seul geste est fait, et un et un seul cas est réalisé.

Cette similitude a une très grande valeur théorique. Seule la physiologie théorique et son interprétation probabiliste de l'autonomie pouvait faire définir la relation articulaire et en faire comprendre toute la valeur pour l'usage de l'autonomie. Le moment majeur est celui de sélection, moment de passage entre un temps d'indéterminisme et un temps de déterminisme. Voilà pourquoi un mécanisme articulé permet à un système d'entrer en relations aléatoires avec le milieu extérieur, donc de se servir de son autonomie. D'où la remarque générale (II et III) : *Tout outil, pour être au service de l'homme, doit être articulé*. Un bâton, un crayon, un marteau, ne deviennent outils que grâce aux articulations du membre qui s'en sert. Le mécanisme articulé est l'outil de l'autodétermination.

Mon but étant d'analyser le rôle de la relation articulaire dans le traitement de l'information, je choisirai mes exemples bien plus dans les anciennes machines électromécaniques et électromagnétiques, dont les articulations sont visibles et manifestes, que dans les actuelles machines électroniques, dont les articulations sont cachées, étant miniaturisées à la dimension de l'électron. Nous ne pouvons pas voir se déplacer un flux d'électrons. Mais des électrons peuvent être engagés dans une relation articulaire aussi bien que des os ou des arbres métalliques (1).

1. Ayant profité d'une importante documentation fournie par la Compagnie Bull-Genera Electric, je tiens à remercier ceux qui me l'ont procurée et en particulier, M. Arnion.



II. LA RELATION ARTICULAIRE DANS LES FONCTIONS D'ÉCHANGE

Entre l'homme et la machine, les échanges d'informations se font sous la forme de langage.

Il faut attribuer à cette remarque toute la vertu d'une donnée expérimentale. Le langage, qu'il soit écrit, oral ou gestuel, est le moyen de transmission des informations. La forme physique d'énergie, qui transporte à distance un message, doit être modulable. Ce fait d'expérience est manifeste au point d'être parfois utilisé comme critère dans la définition même de l'information : L'information c'est ce qui peut s'exprimer sous la forme d'un langage.

Réciproquement, dans la définition du langage, entre l'idée de communication et d'échanges d'information. Voici, par exemple, la définition que donnait mon père, Joseph Vendryes : « Il y a langage toutes les fois que deux individus, ayant attaché par convention un certain sens à un acte donné, accomplissent cet acte en vue de communiquer entre eux. »

L'informatique est donc intimement liée à la linguistique. Les caractères articulatoires du langage prennent alors tout leur intérêt.

De Saussure (1857-1913), créateur de la *Linguistique générale*, a défini la langue comme « un mystère de signes exprimant des idées ». Et il a défini le *signe* comme l'association d'un *signifié*, ou concept, et d'un *signifiant*. Appartient au signifiant tout ce qui, dans le langage parlé, participe, dans le fonctionnement du système nerveux et des organes phonatoires, à l'élaboration des sons. Le signifié c'est le sens que l'homme attribue aux sons.

La chaîne linguistique, qui se déroule linéairement dans le temps, est schématiquement décomposable en une succession de signes élémentaires. Une *unité significative* est le signe le plus petit que l'on puisse distinguer de ce qui le précède et de ce qui le suit dans la chaîne parlée.

Ce sont les relations réciproques entre signes qui constituent la fonction linguistique. En se succédant, les différents signes entrent en contraste les uns avec les autres. Mais une autre relation plus subtile et bien plus importante a été reconnue par de Saussure : « Les unités s'opposent dans le mécanisme de la langue. » Par exemple, les sons par lesquels s'exprime le pluriel n'ont pas de signification en eux-mêmes; ils n'acquièrent une valeur significative qu'en entrant en opposition avec les sons par lesquels s'exprime le singulier. Et réciproquement. « Dans la langue, chaque terme a sa valeur par opposition avec tous les autres termes. » Cette relation d'opposition est une condition nécessaire pour qu'il y ait une fonction linguistique.

Pour que des signes puissent être mis en opposition, il est évidemment nécessaire qu'ils soient plusieurs. Au strict minimum, le langage est binaire. L'interlocuteur, qui veut émettre un message, se trouve à tout moment dans l'obligation de choisir parmi une pluralité de signes possibles. S'il avait une autre information à transmettre, il aurait à choisir un autre signe. Il est impératif qu'il y ait sélection exclusive.

Avant de prononcer une phrase, l'orateur a le choix entre une multiplicité de phrases possibles. Mais, parmi toutes ces phrases dont le nombre est aussi illimité que celui des idées à exprimer, une et une seule sera prononcée. Il y aura donc passage d'un temps d'indéterminisme à un temps de déterminisme. Ces deux temps sont séparés par le moment de l'option. Ce processus linguistique se décrit exactement sur le patron de la relation articulatoire.

Et alors il est intuitif que le fonctionnement du langage est impérativement articulaire.

Et, en fait, la linguistique moderne affirme les caractères articulaires du langage.

Les linguistes ont distingué deux variétés d'articulations linguistiques. « En matière de langage, suivant de Saussure, l'articulation peut désigner ou bien la subdivision de la chaîne parlée en syllabes, ou bien la subdivision de la chaîne des significations en unités significatives. » C'est ce que la linguistique moderne qualifie de *double articulation linguistique*. « Un énoncé n'est proprement linguistique, selon l'assertion d'A. Martinet, que dans la mesure où il est doublement articulé. »

Il faut charger cette idée d'articulations linguistiques de tout le sens que j'ai attribué à l'idée de relation articulaire. En portant son attention, non seulement sur des notions générales, communes aux diverses langues, mais sur des relations, on tendra de la linguistique générale vers la linguistique théorique.

Il faudrait même (III) définir, non seulement deux, mais trois articulations linguistiques, en ajoutant aux deux précédentes une articulation entre les signifiés et les signifiants, entre les sens et les sons. Et il faudrait aussi concevoir une articulation entre les signifiés, entre les concepts. Cette articulation, qui n'est plus proprement linguistique, pourrait être qualifiée de logique (III). C'est elle que l'on évoque lorsque l'on parle des articulations du discours logique.

C'est le jeu de toutes ces articulations qui permet au langage d'être ce qu'il est.

Les organes, qui auront à transmettre des informations, devront donc fonctionner selon un mode articulaire.

Pour préciser, soit, à titre d'exemple, l'écriture d'un nombre dans un système de numération dont la base est k . Ce nombre s'écrit :

$$\dots + a_n.k^n + \dots + a_1.k^1 + a_0.k^0 + a_{-1}.k^{-1} + \dots + a_{-m}.k^{-m} + \dots$$

C'est une somme, dont chacun des termes est un produit. Et, dans chacun des produits, l'un des facteurs est une puissance de k . Cette écriture utilise plusieurs relations déterministes (I). En effet, l'addition est une opération déterminante : appliquée à deux nombres déterminés elle a un résultat déterminé. La multiplication aussi est déterminante ; et aussi l'élevation aux puissances. La base a une valeur déterminée k , ayant été choisie une fois pour toutes. Et la numération de position utilise la relation d'ordre, qui est déterminante (I) : chaque terme a , par rapport aux autres, une place déterminée par l'exposant de k .

Mais, dans un tel cadre, que tous ces déterminismes rendent rigide, subsistent des objets indéterminés : ceux qui sont représentés par les lettres a . Chacune de ces lettres a la possibilité de devenir l'un quelconque des k chiffres du système. Voilà la multiplicité des cas possibles.

Et ces k chiffres sont incompatibles entre eux. Choisir l'un d'entre eux c'est exclure tous les autres. Et chacun des termes de la somme sera, et indépendamment des autres, l'objet d'un choix exclusif. Une fois ces choix faits, l'écriture du nombre est déterminée. Par exemple, 3 813. Ce système d'écriture offre le moyen de passer d'un temps d'indéterminisme, nécessaire à un libre usage des nombres, à un temps de déterminisme. Une telle sélection c'est le moment central d'une relation articulaire.

Les organes d'échange entre l'homme et les machines, dont le vecteur d'informations est actuellement le langage écrit, doivent, en conséquence, avoir un fonctionnement articulaire.

Pascal, en 1642, faisait entrer des nombres dans sa machine à calculer grâce à un chiffreur à roues. Chacune des roues pouvait prendre, et indépendamment des autres, 10 positions différentes par rapport à un viseur. Et, pour mouvoir ses roues, Pascal se servait d'organes articulés, ses doigts.

Schilt, en 1851, construisit comme organe d'entrée le premier clavier à touches indépendantes. Or, un *clavier* est un ensemble ordonné de cas possibles disjoints (III). Il présente en plan la totalité des cas possibles, chacun d'eux étant repérable par un indicatif qui lui soit propre. Se servir d'un clavier c'est faire une succession de choix, car il est exclu que l'on enfonce plusieurs touches à la fois.

Cette notion de clavier s'applique directement à ce support des échanges d'informations qu'est la *carte perforée*. Chacune de ses 80 colonnes est, avant perforation, un clavier : elle est un ensemble ordonné de 12 perforations possibles. Cette multiplicité de perforations possibles caractérise un premier temps d'indéterminisme.

Le code de perforation rend ces perforations incompatibles entre elles, en fixant à chaque variété de perforations une signification et une seule. Le codage est agent de détermination. Par perforation sélective, une colonne acquiert une valeur informationnelle déterminée. D'une colonne à l'autre, les choix restent indépendants les uns des autres.

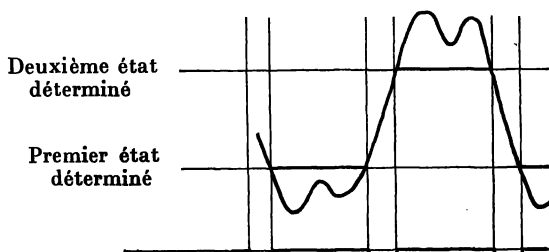
De même, chacune des tranches successives d'un ruban magnétisable est, avant aimantation, un clavier. Par codage, chacune d'elles prend, au moment de l'aimantation, une valeur informationnelle déterminée.

Enregistrer une information sur la colonne d'une carte ou sur la tranche d'un ruban, c'est passer d'un état initial d'indéterminisme à un état final de déterminisme. Ce passage est effectué par articulation. Le moment de la perforation ou de l'aimantation est le moment de sélection d'une relation articulaire.

Effectivement, pour jouer d'un clavier des mécanismes articulés sont nécessaires (III). Une poinçonneuse manuelle de cartes a comme organe d'entrée un clavier. Ses douze poinçons articulés sont mis en action par le jeu des doigts articulés sur les touches. Pour l'enregistrement sur les rubans, les relations articulaires sont réalisées par des mécanismes de sélection et de commutations vers les têtes d'écriture.

Aussi bien que les organes d'entrée, les organes de sortie doivent mettre en jeu des mécanismes articulés. Tels sont, par exemple, les marteaux des imprimantes.

Le langage binaire de la machine utilise deux signifiants. Cela exige que les supports d'information puissent prendre deux états physiques, incompatibles entre eux et nettement distincts, puisque leur opposition mutuelle est nécessaire à leur valeur informationnelle. L'un par rapport à l'autre, ils doivent être bien déterminés. L'indéterminisme serait cause d'ambiguïté et de doute. Il faut que l'on ait à passer de l'un à l'autre par choix exclusifs. Voilà pourquoi, dans les variations plus ou moins oscillantes des états physiques, il est nécessaire de délimiter des zones de déterminisme en éliminant les intervalles d'indéterminisme. Pour passer d'un état à l'autre, il faudra un mécanisme articulé.



L'impératif linguistique de la transmission des informations, en exigeant la mise en contraste et en opposition des signifiants, impose l'intervention de mécanismes articulés dans les organes d'échanges. L'intérêt n'est pas que les échanges d'informations se fassent, en eux-mêmes, sous forme de langage. Il est que tout langage ait des propriétés articulatoires.

Grâce à ces propriétés, les relations entre l'homme et sa machine peuvent être aléatoires. L'homme a la possibilité de choisir librement les informations qu'il désire transmettre à la machine. Ces relations articulatoires permettent à l'homme d'être libre et à la machine d'être soumise à la liberté de l'homme.

Et mettre en évidence les propriétés articulatoires des fonctions d'échange, à l'entrée comme à la sortie, c'est faire prévoir l'importance que ces mêmes propriétés doivent avoir dans le fonctionnement interne de la machine.

III. LA MISE EN RÉSERVE DES INFORMATIONS

Après leur introduction dans la machine, les informations sont mises en mémoire.

Ces dépôts d'informations, dont la masse risquerait d'encombrer la machine, sont enfermés dans des *mémoires périphériques*, qui seront ultérieurement mises en relation avec l'*unité centrale* de la machine en activité.

Plusieurs variétés de mémoires sont utilisées. Par exemple, les cartes perforées sont emmagasinées dans des fichiers. Les rubans magnétisables sont enroulés sur des bobines. Les enregistrements magnétiques se font sur rubans, tambours, ou disques.

La première qualité de ces mémoires est leur capacité. Un dictionnaire entier, de la taille du Petit Larousse, pourrait être transcrit sur un ruban. Et la capacité de ces mémoires périphériques peut être indéfiniment accrue grâce aux mémoires amovibles et interchangeables. Et, à volume égal, on peut accroître la capacité des mémoires en augmentant leur densité. Des milliards d'informations binaires ont pu être condensées dans un centimètre cube. L'un des objectifs de la miniaturisation est d'augmenter la capacité de la fonction de mémorisation tout en réduisant le volume.

Cette *mise en mémoire* est une *mise en réserve*. Il serait même sans doute plus exact de parler des « réserves » de la machine que de ses « mémoires ».

L'idée d'une fonction de réserve appartient à la Physiologie.

Claude Bernard (1813-1878) compte parmi les plus grands biologistes de tous les temps pour avoir été le créateur de la *Physiologie générale*. Pour apprécier à sa juste valeur cette création, il suffit de se rappeler l'aphorisme d'Aristote qu'il n'y a de science que du général. Bien qu'il l'ait conçue vers 1865, Claude Bernard ne prit vraiment conscience de sa physiologie générale que pendant ses toutes dernières années. Il se proposa le projet ambitieux d'énoncer des conceptions qui soient valables pour tous les êtres vivants. D'où le titre de son livre ultime, sa plus grande œuvre : *Leçons sur les phénomènes communs aux animaux et aux végétaux*. « La physiologie générale embrasse dans son objet tout ce qu'il y a de général dans les phénomènes de la vie. Son domaine s'étend sur les animaux et les végétaux, car, dans les uns et les autres, la vie élémentaire, la nutrition, présentent les mêmes caractères essentiels. »

La fonction de *mise en réserve* est l'un de ces phénomènes communs.

« La grande loi de la nutrition au moyen des réserves est constante; au degré près,

les choses se passent de la même manière dans tous les états de la vie »... « La nutrition s'accomplit toujours en deux temps : d'abord il se fait une accumulation, une réserve; ensuite, ces matériaux élaborés et accumulés par l'animal, sont utilisés, en donnant naissance à des produits excrémentiels aussitôt expulsés »... « Ce que nous disons de la formation des réserves nutritives se retrouve dans les deux règnes, aussi bien chez les animaux que chez les végétaux. »

Un excellent exemple de réserve nutritive peut être trouvé dans l'œuvre même de Claude Bernard, en physiologie expérimentale : la mise en réserve du glucose dans le foie sous la forme du glycogène. « Le glycogène, comme l'amidon, est une réserve qui attend plus ou moins longtemps la transformation en sucre qui lui permettra de participer au mouvement de la nutrition. »

Cette fonction de réserve, qui est commune à tous les êtres vivants, se miniaturise à l'intérieur des cellules, au niveau moléculaire des réactions biochimiques. Par exemple, dans les mitochondries, la molécule d'adénosine triphosphate met en réserve de l'énergie en associant trois molécules d'acide phosphorique. Cette énergie sera libérée par la rupture de la troisième liaison.

La physiologie générale de Claude Bernard est une étape intermédiaire entre la physiologie strictement expérimentale et la physiologie théorique. En ce milieu du xx^e siècle, la physiologie doit faire une nouvelle mutation. La physiologie générale se proposait d'abstraire les notions générales qui sont communes à tous les êtres vivants; la physiologie théorique porte son attention sur les relations, en particulier sur les relations entre l'animal et le milieu qui lui est extérieur.

La physiologie théorique donne tout son sens à la fonction de mise en réserve.

La mise en réserve est créatrice d'autonomie. Son rôle dans l'acquisition de l'autonomie avait été reconnu par Claude Bernard : « La formation des réserves est non seulement la loi générale de toutes les formes de la vie, mais elle constitue encore un mécanisme actif et indispensable au maintien de la vie constante et libre, indépendante des variations du milieu cosmique ambiant ». En accumulant des réserves, l'animal réalise une coupure spatiale avec le milieu extérieur, puisque ses réserves sont en lui, et non dans le milieu extérieur; et aussi une rupture temporelle, puisqu'il pourra en disposer au moment opportun, indépendamment des conditions du moment, et non au moment même où il reçoit les apports du milieu extérieur. L'animal a en lui ses réserves à l'état potentiel. Il peut en jouir en toute indépendance.

L'indépendance c'est la condition nécessaire de l'aléatoire. La mise en réserve crée donc la condition nécessaire de l'aléatoire. C'est elle qui permet à l'animal d'entrer en relations aléatoires avec le milieu extérieur.

D'une manière plus précise, l'existence de réserves dans l'animal évite que ses cellules, en pleine vie, ne subissent les conséquences des variations aléatoires dans l'apport des aliments, à partir du milieu extérieur, le caractère aléatoire de ces variations étant dû à ce que l'animal se rend indépendant de ce milieu extérieur. C'est dans ce sens que j'ai parlé, dans mon livre *Vie et probabilité* du rôle *contre-aléatoire* des réserves. Les réserves permettent à l'animal d'entrer en relations aléatoires avec le milieu extérieur, en évitant les graves inconvénients que peut avoir pour la vie cellulaire le caractère aléatoire de ces relations, pour le ravitaillement en aliments.

La mise en mémoire des informations, qui est une mise en réserve, permet leur libre

usage par la machine. Celle-ci peut traiter en toute indépendance les informations qu'elle possède en elle-même, à l'état potentiel.

Ce sont ces réserves mémorisées qui permettent vraiment de distinguer ce que l'on a pu qualifier de milieu interne de la machine, en l'opposant au milieu qui lui est externe. L'idée même de ce milieu interne appelle une certaine comparaison avec le célèbre milieu intérieur que Claude Bernard a décrit dans les animaux. Ce sont ces réserves qui permettent aux organes de sortie de ne plus être dépendants, dans leur fonctionnement, des organes d'entrée. Et, pour régulariser dans le temps le fonctionnement des divers organes, dont les rythmes fonctionnels peuvent être différents, des *mémoires tampons* sont intercalées.

La mise en réserve est donc un phénomène commun aux êtres vivants et aux machines qui traitent les informations. Même fonction, même rôle. La mise en réserve est l'une des conditions nécessaires à l'acquisition de l'autonomie. L'homme crée ses machines à son image. Il désire que ses machines fassent ce que lui-même fait, pour qu'elles puissent être au service de son autonomie. Et, en imaginant, comme Babbage en 1834, de mettre en mémoire non seulement les données du problème à traiter, mais le programme lui-même des opérations à effectuer, il cherchait à progresser en direction de cette autonomie.

IV. LA DYNAMIQUE DES INFORMATIONS

S'il est nécessaire que les informations soient mises en réserve pour que la machine acquière son autonomie de fonctionnement, il est nécessaire aussi qu'elles soient mises en circulation pour être traitées.

La machine met à profit la propriété éminemment transmissible des informations. Dès leur entrée, les cartes perforées sont entraînées sur les pistes de lecture jusqu'à leur éjection dans les cases de sortie; au cours de cette traversée de la machine, les informations sont perçues et émises vers les organes de traitement. Dans une trieuse, les cartes sont mobilisées les unes par rapport aux autres, pour être classées. Un totalisateur électromécanique opère grâce à la rotation de roues dentées. Les réserves mémorisées sont transférées de fichiers à cartes sur rubans magnétisables. La rotation des tambours et des dérouleurs de rubans fait défiler les informations en mémoire devant les têtes de lecture.

Pour effectuer ces déplacements d'informations les unes par rapport aux autres et par rapport au support de la machine, l'homme a utilisé diverses formes d'énergie. Pascal comptait sur la force de ses doigts pour mouvoir les roues de son chiffreur. Les roues dentées d'une tabulatrice sont entraînées par un arbre moteur. La réduction de la consommation d'énergie a été l'une des raisons qui ont fait préférer les semi-conducteurs aux tubes à vide et ces tubes aux organes électromécaniques.

Le fonctionnement des machines a été asservi à l'impératif moderne du rendement, cette grandeur cinématique, puisqu'elle est mesurée par le rapport entre la quantité de traitement réalisé au temps nécessaire à la réalisation. Voilà pourquoi la notion de vitesse a une telle importance en informatique. La valeur fonctionnelle des perforatrices ou des trieuses dépend de leur débit, et celle des mémoires de la vitesse d'accès aux informations qu'elles contiennent.

L'un des grands objectifs de la technologie est d'accélérer les traitements, les relations entre les hommes devenant de plus en plus complexes et rapides. Tant que les machines furent freinées par l'inertie de leurs pièces mécaniques, les ingénieurs furent paralysés.

L'électronique les a délivrés de cette entrave. L'électron est devenu le matériau de l'informatique grâce à trois propriétés : il est corpusculaire, donc indépendant des autres électrons ; il a une charge électrique, donc il est sensible aux actions extérieures ; il a une masse miniature, donc il n'offre aucune résistance à ces actions. Les ingénieurs ont choisi ce qu'il y a de moins grevé d'inertie dans la nature, l'électron, le photon.

La miniaturisation des organes, en réduisant leurs dimensions, a permis de nouvelles réductions des durées. D'autres gains de temps furent obtenus en faisant effectuer plusieurs programmes à la fois par les machines. Il fallut organiser dans le temps les séquences de cette multiprogrammation pour éviter les encombrements de la circulation interne et les files d'attente.

Il y a donc toute une dynamique dans le traitement des informations. Une mobilisation d'informations est nécessaire pour que des résultats soient générés. Seul le mouvement peut créer de nouveaux états possibles à partir d'états antérieurs. Le traitement des informations est réalisé dans l'espace et le temps. C'est l'une des raisons pour lesquelles il peut être mécanisé. On pense alors à la proposition de Descartes selon laquelle tout se fait par figure et mouvement.

Et pourtant il est intuitif que la Dynamique est incapable, à elle seule, de rendre compte de l'Informatique.

Il lui manque une notion essentielle. Celle de relation articulaire.

V. LA RELATION ARTICULAIRE DANS L'EXPLOITATION DES MÉMOIRES

L'exploitation par la machine des mémoires périphériques, qui lui sont adjointes, est rendue complexe pour des raisons de déterminisme et d'aléatoire.

1. Aléatoire et déterminisme dans l'exploitation des mémoires

Le temps le plus important de cette exploitation est celui de la recherche d'informations à l'intérieur des réserves. Au cours du déroulement d'un programme, la machine a besoin, à des moments déterminés, d'informations déterminées. Elle doit donc disposer de mécanismes qui lui permettent de prélever dans une mémoire, au moment opportun, l'information nécessaire et elle seule. Tel est le problème majeur de la consultation des mémoires. Il exige du déterminisme.

Mais l'alimentation des mémoires en informations comporte, elle, de l'aléatoire. Car les apports, venus de l'extérieur, se font le plus souvent en désordre, au hasard des circonstances, qui sont indépendantes les unes des autres. C'est même justement le caractère articulaire du langage qui permet à ces apports d'être aléatoires, au moment de la pénétration dans les mémoires.

D'après ce qui précède, on devine que l'intrication d'aléatoire et de déterminisme dans l'exploitation d'une mémoire fera mettre en jeu des mécanismes articulés. Cette exploitation, par la nature même des choses, doit être articulaire.

Plus précisément, il a fallu distinguer deux variétés principales de mémoires, dont les avantages et les inconvénients dérivent de cette intrication de déterminisme et d'aléatoire.

a) Les mémoires de la première variété sont telles que chacune des informations qu'elles contiennent peut être atteinte directement. Elles sont dites mémoires à *accès direct*. Mais, pour être rendues telles, elles doivent avoir été soumises artificiellement à un traitement déterminant. Un déterminisme est en effet nécessaire pour qu'une information déterminée

soit obtenue à une adresse déterminée. L'agent déterminant qui est utilisé dans ce but est, comme on va le voir, la relation d'ordre.

Mais ce déterminisme, indispensable pour la consultation directe, exige, au moment de l'enregistrement des apports, un travail supplémentaire, en raison de l'aléatoire de ces apports. Et ce travail, qui ajoute du déterminisme, sera d'autant plus important que la part de l'aléatoire sera plus grande.

b) Les mémoires de la seconde variété, qualifiées de *séquentielles*, ont l'avantage et l'inconvénient inverses.

L'absence de déterminisme facilite la mise en mémoire, qui est réalisée suivant les hasards des arrivées. Les informations peuvent être facilement renouvelées, effacées, réduites ou accrues, indépendamment les unes des autres. Une information nouvelle s'introduit directement, quel que soit son volume et quel que soit le moment de son arrivée. Sa place dans la mémoire n'est fixée par aucun déterminisme.

Mais ce manque de déterminisme se révèle au moment de la consultation, lorsqu'il faut accéder à une information déterminée. N'ayant plus d'ordre conducteur, il faut éliminer un par un, séquentiellement, tous les articles jusqu'à ce que celui qui est cherché soit découvert. Cette élimination peut être plus ou moins longue. La durée de cette recherche est égale, en moyenne statistique, à celle qui est nécessaire pour parcourir la moitié du fichier.

Pour préciser ces remarques sur l'exploitation des mémoires, je vais analyser : a) la mise en ordre d'un fichier, ce qui fera apparaître, entre les divers articles accumulés, des relations articulaires; et b) la consultation d'une mémoire à accès direct, ce qui mettra en évidence, entre la machine et les mémoires périphériques, des relations articulaires.

2. La mise en ordre d'un fichier

L'agent de détermination qui est utilisé est la *relation d'ordre*, instrument de grand usage en informatique.

a) Le déterminisme de la relation d'ordre

Cette relation, en effet, est déterminante (I et II).

Entre deux objets *a* et *b*, une relation d'ordre est définie habituellement par les trois propriétés de réflexivité, antisymétrie et transitivité.

Sa propriété déterminante est, en pratique, encore plus importante. La relation $a > b$ détermine la place de *a* par rapport à *b*. Par exemple, l'ordre alphabétique détermine la position des noms dans une liste. Il place d'une manière et d'une seule Martini après Martin et avant Martinno, et celui-ci avant Martinot. Ordonner les éléments d'un ensemble c'est imposer à cet ensemble un déterminisme.

Une relation d'ordre est totalement déterminante pour un ensemble d'objets si elle couvre tous ces objets : elle aboutit à un, et un seul, rangement. Il y a un premier article, et un dernier; et, du premier au dernier, l'ordre est croissant ou décroissant.

Mais elle peut être insuffisamment déterminante pour ordonner la totalité des objets. Si un classement incomplet n'est pas utilisable, il sera pratique de cumuler les effets de plusieurs relations d'ordre, en les insérant les unes dans les autres. Une telle hiérarchie est utilisée, par exemple, dans les relations postales, qui utilisent des relations d'ordre spatial et des relations d'ordre alphabétique. Écrire en France une adresse sur une enveloppe c'est employer successivement les classements par départements, par villes, par rues, par numéros dans la rue, par noms propres dans chaque immeuble et par prénoms dans chaque famille. Cet

emboîtement de relations d'ordre est nécessaire pour atteindre au déterminisme parfait. Si, dans une famille, le fils avait le même prénom que le père, il subsisterait encore de l'indéterminisme à l'arrivée d'une lettre, puisqu'il y aurait encore deux cas possibles.

Entre les objets d'un ensemble en désordre, les relations sont aléatoires; entre les objets d'un ensemble ordonné, les relations sont déterministes.

Tenter une réussite avec un jeu de cartes c'est essayer de ranger, dans l'ordre fixé par la règle du jeu, les cartes dont tout ordre a été préalablement disloqué par battage, jusqu'à ce que les relations aient été rendues aléatoires. On gagne dans le cas où l'on arrive à placer dans l'ordre prescrit la totalité des cartes. Le jeu fait passer du désordre et de l'aléatoire à l'ordre et au déterminisme.

De tels passages du désordre à l'ordre, de l'aléatoire au déterminisme, sont très souvent effectués dans les applications industrielles de la physique. Par exemple, pour transformer de l'énergie calorifique en énergie mécanique utilisable, l'homme doit organiser des nivellements thermiques.

Quel que soit le désordre initial, la mise en ordre, quand elle est totale, conduit à un et un seul ordre terminal. Soit un ensemble de nombres de trois chiffres. Après classements, qui procèdent successivement par unités, par dizaines, puis par centaines, on obtient, quelle qu'ait été la répartition initiale, un et un seul ordre final. La relation d'ordre est bien déterminante.

b) La multiplicité des ordres possibles

Mais il y a une multiplicité de relations d'ordre possibles, même si chacune d'elles est déterminante. Les critères d'ordre peuvent être de nature très variées : spatiale, temporelle, numérique... Une population peut être classée selon l'âge, la taille, le poids, le lieu de naissance, le montant des revenus,... Tout ce qui est mesurable peut être ordonné. L'ordre alphabétique est purement conventionnel.

En pratique, il est obligatoire de choisir entre ces multiples ordres possibles, car ils sont incompatibles entre eux.

Les fichiers médicaux sont, en général, rangés par malades, puisque c'est chaque malade, individuellement, qui compte en pratique médicale. Mais, pour exploiter un fichier médical, dans un but scientifique, ce qui compte c'est la maladie. Les concepts de maladies ont été abstraits pendant des siècles de travail médical, et les classements des maladies varient selon les critères choisis, anatomocliniques, bactériologiques, humoraux, biochimiques... Les classements, dans toute science, sont faits selon des critères en grande partie arbitraires. Et les sciences s'efforcent de parvenir à des classifications naturelles, dont les critères sont reconnus dans la nature elle-même. C'est ainsi que les chimistes avaient défini leurs familles naturelles, gaz inertes, halogènes..., et les anatomistes les familles naturelles des animaux.

La méthode comparative et l'esprit de classification sont aussi enrichissants en science qu'en traitement des informations. A partir d'un ensemble d'informations ils permettent d'obtenir des informations nouvelles.

Ordonner c'est passer d'un désordre à un ordre, d'un état où les relations entre objets sont aléatoires à un état où elles sont rendues déterministes. Trier c'est passer d'un ordre à un autre, d'une relation déterminante à une autre.

Par conséquent, si les relations d'ordre possibles sont à la fois multiples et incompatibles

tibles entre elles, les mécanismes qui auront à effectuer des tris devront posséder des mécanismes articulés.

c) Les leviers articulés d'une trieuse

Dans un fichier, les éléments unitaires des classements portent le nom, combien évocateur pour celui qui cherche des relations articulaires, « d'articles ». Les cartes perforées, qui doivent être classées dans une trieuse, sont extraites les unes après les autres d'un magasin d'alimentation. En raison de leur indépendance, les unes par rapport aux autres et par rapport à leur support commun, les cartes peuvent entrer en relations aléatoires. Leur ensemble peut être initialement dans un désordre quelconque. Le classement a pour but de les ranger dans un ordre déterminé.

Une trieuse est constituée de plusieurs casiers distincts au-dessus desquels les cartes sont entraînées les unes après les autres. Comme une carte ne peut pénétrer simultanément dans deux casiers, il y a bien à la fois multiplicité et incompatibilité des casiers possibles.

Un levier articulé, au-dessus de chacun des casiers, a la possibilité de prendre deux positions possibles : il ouvre ou il ferme le casier. C'est lui qui fera basculer les cartes que leurs indicatifs désignent pour ce casier. Un mécanisme sélecteur, sensible aux indicatifs des cartes, met en action l'un ou l'autre des leviers. Le regroupement ordonné du contenu des divers casiers ordonnera finalement l'ensemble des cartes.

Tous les organes partiels de la trieuse fonctionnent pour quelques organes essentiels, ses leviers articulés.

3. La consultation des mémoires à accès direct

Consulter une mémoire c'est, après avoir accumulé en elle de multiples informations, en extraire l'une ou l'autre au moment opportun. La machine, qui exécute dans son unité centrale le programme, instruction après instruction, peut avoir à consulter ses mémoires périphériques à tout moment. Et alors, il lui faut retrouver en elles l'information utile, à l'exclusion des autres.

Dans les mémoires à accès direct, la machine peut effectivement atteindre une information quelconque, individuellement. Elle va la chercher à son adresse individuelle. Cette adresse est définie par rapport à un support solide. Elle participe au déterminisme de l'état solide qui, par définition, a un volume et une forme déterminés. Entre les parties d'un solide idéal, les relations spatiales sont déterministes. Attribuer une adresse à une information c'est établir une relation déterministe entre le contenu et l'emplacement de cette information. Rendre adressable une mémoire c'est la soumettre à une relation d'ordre spatial. Cette relation déterministe est indispensable pour qu'une information quelconque puisse être retrouvée directement, indépendamment de toutes les autres, à l'intérieur de la mémoire.

Mais l'unité centrale de la machine doit avoir la possibilité de dérouler les instructions de son programme, l'une après l'autre, selon un ordre de succession qui lui soit propre. Elle doit pouvoir fonctionner selon un ordre temporel qui soit totalement indépendant de l'ordre de rangement spatial des informations dans les mémoires. C'est la condition même de son autonomie de fonctionnement.

En raison de cette indépendance, les relations possibles entre l'ordre temporel de l'unité centrale et l'ordre spatial des mémoires sont multiples. Le traitement des informations se réalise à la fois dans l'espace et le temps. Entre les deux variétés d'ordre, celui de l'unité centrale et celui des mémoires, les relations sont indéterministes.

Il est significatif que la consultation par accès direct des mémoires ait été qualifiée

aussi de consultation par accès *aléatoire*. Cette expression n'a véritablement de sens que grâce à l'interprétation probabiliste de l'autonomie. Ce sont bien les concepts de la physiologie théorique qui permettent de comprendre le traitement des informations.

Pour atteindre une information déterminée, à son adresse déterminée, et à un moment déterminé, il est nécessaire que cet état d'indéterminisme soit transformé en un état de déterminisme. Ce passage de l'un à l'autre est réalisé par articulation. Une information est obtenue dans une mémoire par sélection exclusive. Entre l'ordre temporel du programme et l'ordre spatial des adresses, il faut qu'interviennent des mécanismes articulés.

Associer à une machine une mémoire externe amovible c'est l'articuler avec elle. En effet, à une même machine, on peut adjoindre de multiples mémoires externes. Chacune d'elles a son propre support et sa propre variété de renseignements. Ces multiples mémoires possibles sont interchangeableables. Entre elles, l'utilisateur doit faire des choix exclusifs, avant de mettre la mémoire choisie en liaison avec la machine. Cette jonction après sélection est une articulation. Entre la machine et les mémoires amovibles, les relations sont articulaires. En fait, pour brancher une mémoire sur la machine, l'utilisateur se sert d'organes articulés, ses mains.

Une fois reliée à une mémoire externe, l'unité centrale peut la consulter. Une mémoire adressable est un ensemble ordonné de multiples informations possibles. C'est un clavier. Or, pour jouer d'un clavier, des mécanismes articulés sont nécessaires (III). Effectivement, lorsque la consultation d'une mémoire est réalisée par des organes mécaniques, ceux-ci sont faits de segments articulés. Les mains et les doigts servent à prendre une fiche dans un fichier rangé selon l'ordre alphabétique. La tête de lecture, qui explore une pile de disques magnétisés est portée par un mécanisme doublement articulé : une première articulation permet d'atteindre l'un quelconque des disques superposés, et la seconde l'une quelconque des multiples pistes que les disques entraînent dans leur rotation. Cette sélection mécanique peut être remplacée par une sélection électrique. Dans tous les cas, il y a sélection, et le moment de sélection est le moment central d'une relation articulaire.

En résumé, l'exploitation des mémoires à accès direct ne peut être comprise sans l'idée de relation articulaire. L'autonomie fonctionnelle de l'unité centrale implique cette variété de relation. Les échanges entre l'unité centrale et les mémoires périphériques ont les mêmes caractères articulaires que les échanges entre l'homme et sa machine.

VI. LA RELATION ARTICULAIRE DANS LES FONCTIONS DE CALCUL

L'homme veut obtenir de sa machine des résultats déterminés, en conclusion des traitements des informations qu'il lui confie. La fonction de calcul est l'une des fonctions élémentaires de la machine. Les opérateurs qu'utilise la machine doivent donc être déterminants. On retrouve le problème que j'ai discuté dans l'article I, sur la vertu déterminante des opérateurs mathématiques. Un opérateur est déterminant lorsqu'il confère l'existence à un objet déterminé.

1. La détermination des résultats

Dans les paragraphes précédents, j'ai déjà utilisé le caractère déterminant des opérations qui servent dans la numération de position, addition, multiplication, élévation aux puissances, et aussi le caractère déterminant de la relation d'ordre.

Dans les applications des mathématiques, cette propriété déterminante a une grande

importance. Sans reprendre, comme il le faudrait, cette difficile question, je voudrais simplement préciser à l'aide de quelques exemples la manière de la poser.

Il est habituel aux mathématiciens d'utiliser l'expression : « Il existe *un et un seul* objet mathématique tel que... » C'est affirmer la détermination de cet objet. Une *application* d'un ensemble X dans un ensemble Y est déterministe puisqu'elle fait correspondre à tout $x \in X$ *un et un seul* $y \in Y$. Une *bijection* est une application déterministe dans les deux sens.

Une loi \perp , entre trois éléments quelconques x , y et z d'un ensemble, est *associative* lorsque : $x \perp (y \perp z) = (x \perp y) \perp z$. Cette loi est déterministe. En effet, les deux membres de cette formule sont, par définition, égaux. Cela veut dire qu'il y a *un et un seul* résultat que l'on commence l'opération par $y \perp z$ ou par $x \perp y$. Lorsqu'il peut y avoir deux résultats distincts, la loi n'est pas associative.

La structure de *groupe* est déterministe, puisque sa loi de composition interne fait correspondre à deux éléments quelconques de l'ensemble *un et un seul* élément; puisque cette loi est associative; puisqu'il existe un et un seul élément neutre; puisque, à tout élément, correspond un et un seul élément inverse.

Hilbert n'a pas énoncé tous les axiomes des fondements de la géométrie. En descendant plus profondément, on atteint cet axiome unique, fondement des autres : Entre les objets géométriques, les relations sont déterministes (II). Si ces relations étaient et restaient indéterministes, la science de ces éléments ne serait pas géométrique. En particulier, il faudrait penser sans espace.

En mathématique appliquée, le déterminisme est très utile, sinon indispensable. L'homme espère en des résultats déterminés. Dans les organes de calcul de ses machines, les opérateurs sont déterminants : sur des données déterminées, ils concluent à des résultats déterminés. C'est parce que ces mécanismes opératoires sont déterminants que leurs résultats peuvent être obtenus d'une manière automatique. Telle est la raison d'être de la mécanisation des opérations.

Et pourtant, ce déterminisme opératoire ne peut être réalisé qu'en surmontant deux variétés d'indéterminisme. Ces deux indéterminismes participent aussi à la raison d'être des machines.

2. L'indétermination des opérateurs

Le premier indéterminisme est celui qui se rapporte à la multiplicité des opérateurs possibles.

Pour assurer l'autonomie des traitements, il faut que l'indétermination des opérateurs soit effective. Il faut que l'homme ait l'entière possibilité de choisir entre de multiples opérations possibles, par exemple, addition, soustraction, multiplication, division... Opérant sur de mêmes nombres, chacune de ces opérations a un résultat déterminé, mais ces résultats diffèrent selon l'opération. Et chaque variété de problèmes devra être résolue par des opérations qui lui seront propres.

Un excellent exemple de cette multiplicité d'opérateurs possibles est trouvé en algèbre booléenne. Et cet exemple a d'autant plus d'intérêt qu'il a des applications pour le calcul en numération binaire. Je reproduis donc le tableau des seize opérateurs possibles entre deux grandeurs a et b , qui, chacune, peut prendre soit la valeur 0 soit la valeur 1. Dans (III) j'avais présenté ce tableau dans le cadre du Calcul propositionnel, en utilisant les deux symboles du vrai et du faux, \mathcal{V} et \mathcal{F} .

		C																	
		a	b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
E		0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
		0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
		1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
		1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0
		D																	
										-F									

Ce tableau peut être partagé en deux selon la ligne CD qui sépare le 8^e du 9^e opérateur. On lit identiquement ce tableau, à partir de la gauche, en fixant son attention sur 1, ou à partir de la droite, en fixant son attention sur 0. Ces deux symboles 1 et 0 jouent exactement les mêmes rôles.

La 1^{re} et la 16^e opérations sont dites vulgaires, car leurs résultats ne dépendent ni de a ni de b . Les 6^e et 11^e, et les 7^e et 10^e sont dites semi-vulgaires, car leurs résultats dépendent uniquement soit de a , soit de b , respectivement.

Certaines de ces opérations ont pris une grande importance. Malheureusement, retrouvées dans plusieurs domaines de la pensée abstraite, elles ont reçu, chacune, plusieurs dénominations. La 15^e est nommée conjonction en logique, produit logique en algèbre booléenne, intersection \cap en théorie des ensembles, et opération ET en informatique. La 5^e est qualifiée de disjonction, de somme logique, de réunion \cup et d'opération OU, le vel \vee . Pour ne pas choisir entre ces expressions, qui ne sont pas normalisées, je désignerai ces opérateurs par leur numéro dans le tableau, par exemple [15] ou [5].

Et, par [N] je désignerai l'opération *négation*.

Appliquée à un objet a , la négation le transforme en un autre objet \bar{a} , qui est le complément de a par rapport au référentiel : [N] $a = \bar{a}$. Et réciproquement : [N] $\bar{a} = a$. Appliquée à un opérateur, la négation le transforme en un second opérateur, dont les résultats sont les inverses de ceux du premier. Comme ce nouvel opérateur appartient au tableau, la négation est une loi de composition interne pour cet ensemble d'opérateurs. Plus précisément, la moitié droite du tableau, à partir de [9], est obtenue à partir de sa moitié gauche, en appliquant la négation aux divers opérateurs. Par exemple [N 2] = [15]; et [N 12] = [5]. Il suffit, dans les résultats de remplacer 1 par 0, et 0 par 1.

Appliquée à la fois aux opérands et aux opérateurs, la négation détermine de nouvelles relations. On peut à nouveau partager le tableau, selon la ligne EF. Par exemple, les résultats des opérateurs [8] et [9] sont symétriques par rapport à cette ligne. Et on peut obtenir les divers opérateurs les uns à partir des autres. Par exemple, sous le nom de théorème de de Morgan, on énonce les diverses formules : $a [5] b = \bar{a} [N 15] \bar{b}$; $a [15] b = \bar{a} [N 5] \bar{b}$; $a [N 5] b = \bar{a} [15] \bar{b}$; et $a [N 15] b = \bar{a} [5] \bar{b}$. Ces mêmes relations existent respectivement entre les opérateurs 2 et 12, 3 et 13, 4 et 14. Par exemple, $a [2] b = \bar{a} [N 12] \bar{b}$.

Et, finalement, il devient possible de définir les divers opérateurs à partir de quelques-uns d'entre eux. En pratique, les trois opérateurs [N], [5], et [15] ont été choisis pour définir les autres. Par exemple, et cet exemple est utilisé pour le calcul en numération binaire, on définit l'opération dilemme [8], dite encore opération OU exclusif, par la formule :

$$a[8]b = (a[15]\bar{b}) [5] (\bar{a}[15]b).$$

Voilà donc tout un ensemble d'opérateurs possibles, dans leur multiplicité. Cette pluralité imposera, bien sûr, des choix exclusifs.

3. L'indéterminisme des données

La deuxième raison d'indéterminisme concerne les données.

Une fois choisie, parmi toutes celles que peut effectuer la machine, une opération peut être appliquée à de multiples opérandes. Voilà une nouvelle multiplicité de cas possibles, celle des données. Et la machine doit être capable d'opérer *dans tous les cas possibles*. Sinon, l'homme ne pourrait pas choisir librement ses données. Il ne pourrait pas profiter de son autonomie intellectuelle.

L'addition, opération fondamentale, va servir d'exemple.

Pour numérer les cas possibles, on commence par se reporter à la table d'addition de deux termes, *a* et *b*, qui, l'un et l'autre, peuvent prendre, en numération binaire la valeur 1 ou la valeur 0. On compte donc 4 cas possibles.

<i>a</i> + <i>b</i> = <i>r</i>		<i>s</i>	
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Exemple d'application de la table d'addition :

		1	1	0	0
.....					
	A	1	1	1	0
+	B		1	1	1
	S	1	0	1	0

On peut ajouter que : $1 + 1 + 1 = 11$.

Chacun des 4 résultats possibles *rs* est fait de deux chiffres, *r*, qui sera retenu pour l'addition partielle suivante, et *s*, qui sera conservé pour constituer la somme définitive *S*.

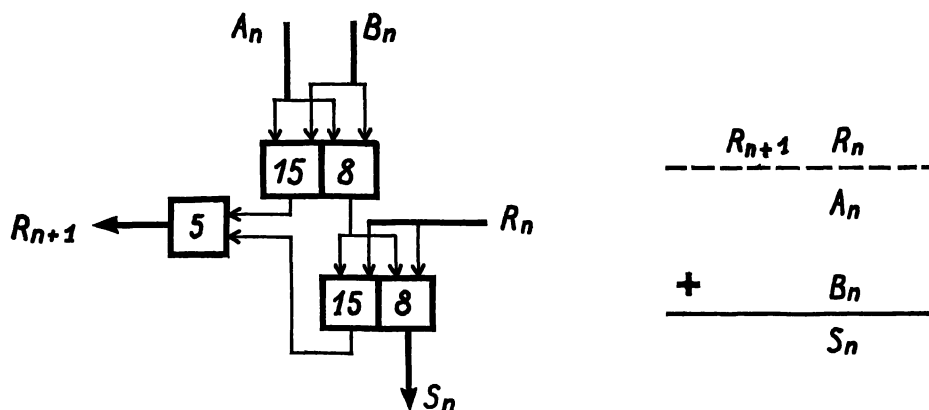
L'addition de deux nombres *A* et *B* est faite d'une succession dans le temps d'additions partielles, qui progressent de la droite vers la gauche. Chacune de ces additions partielles de rang *n*, porte sur 3 chiffres : *A_n*, *B_n*, et la retenue *R_n*, qui a résulté de l'addition de rang précédent. Et cette addition de rang *n* aura 2 résultats : le chiffre *S_n* de la somme totale *S*, et la retenue *R_{n+1}* qui sera reportée pour être ajoutée aux chiffres *A_{n+1}* et *B_{n+1}*. Chacun des 3 chiffres sur lequel porte une addition partielle a la possibilité de prendre, indépendamment des autres, soit la valeur 1 soit la valeur 0. Il faut donc porter à 8 le nombre des cas possibles.

	<i>A_n</i> + <i>B_n</i> + <i>R_n</i> =				<i>R_{n+1}</i>	<i>S_n</i>				
1	0	0	0	0	}	0	}			
2	0	1	0	0		Opéra- tion		1	}	
3	1	0	0	0		<i>A_n</i> [15] <i>B_n</i>		1		}
4	1	1	0	1				0		
5	0	0	1	0	}	1	}			
6	0	1	1	1		Opéra- tion		1	}	
7	1	0	1	1		<i>A_n</i> [5] <i>B_n</i>		0		}
8	1	1	1	1				1		

Par conséquent, pour que l'homme puisse choisir librement un nombre *A* quelconque et un nombre *B* quelconque, et en faire faire la somme par sa machine, il est indispensable

que chacun des étages partiels d'une additionneuse binaire puisse traiter ces 8 cas possibles. La machine doit être pourvue de mécanismes tels qu'ils puissent d'abord offrir ces 8 cas d'indéterminisme, et ensuite avoir le moyen de déterminer les deux résultats R_{n+1} et S_n propres à chacun de ces 8 cas.

En analysant ce tableau des 8 cas possibles, on constate que les R_{n+1} et les S_n sont obtenus en appliquant aux A_n et B_n les opérations [15], [5], [8] et [9] de l'algèbre booléenne. Cela justifie le principe du montage suivant :



Chacune des lettres A_n , B_n , R_n , S_n , et R_{n+1} , peut prendre l'une ou l'autre des deux valeurs 0 et 1.

Ce montage permet effectivement de réaliser n'importe laquelle des 8 additions possibles. Pour le vérifier, il suffit de donner aux diverses entrées A_n , B_n et R_n soit la valeur 1 soit la valeur 0, et d'appliquer les règles opératoires des opérations [15], [8] et [5] du tableau des 16 opérations possibles, pour obtenir les 2 résultats S_n et R_{n+1} .

Ces deux résultats sont déterminés. Les trois entrées, elles, peuvent être combinées de 8 manières différentes. Pour passer de la phase indéterministe des données à la phase déterministe des résultats, il sera nécessaire qu'interviennent des mécanismes articulés.

4. Les articulations des organes de calcul

Cette fonction articulatoire existe effectivement dans les organes de calcul.

Soit l'exemple d'un totalisateur électromécanique, qui réalise l'addition de nombres décimaux. Les relations articulatoires sont assurées par des mécanismes d'embrayage-débrayage entre roues dentées. Les rotations des diverses roues de totalisation sont commandées par la rotation d'un arbre primaire, porteur de roues dentées. Les relations, entre les roues de l'arbre primaire et celles de l'organe totalisateur, se font grâce à des engrenages. Mais un engrenage établit entre deux roues dentées des relations déterministes (II) : la rotation de la première détermine celle de la seconde. Pour rendre aléatoires les relations entre les roues, il faut créer la condition de l'aléatoire, l'indépendance. C'est ce qu'obtient le débrayage. Alors, il y a, entre les roues, de multiples relations mécaniques possibles. L'embrayage, qui rétablira le déterminisme, sera lui-même déterminé par la variété d'addition à effectuer. Faisant passer de l'indéterminisme au déterminisme, l'embrayage articule les roues. Un mécanisme d'embrayage-débrayage permet de réaliser les deux temps d'une relation articulatoire. Grâce à ce mécanisme, un totalisateur électronique peut être articulatoire.

Dans les machines électromagnétiques, dont les additions se font en numération binaire, les relations articulaires sont assurées par des relais. Les opérations [15], [5] et [8] sont réalisables par des circuits pourvus de relais montés en série ou en parallèle. Un relais est un organe articulé. S'intercalant dans un circuit, il y crée une coupure et réalise la condition de l'aléatoire, l'indépendance de la sortie par rapport à l'entrée. Et il est construit de manière à permettre, entre l'entrée et la sortie, deux liaisons possibles. Une pièce mobile, qui est articulée avec le support, la palette, peut établir deux contacts, travail ou repos. Ces deux cas sont incompatibles entre eux, la palette ne pouvant simultanément prendre les positions de travail et de repos. Et, enfin, le jeu de la palette est soumis à l'action déterminante d'une bobine, associée à un ressort de rappel. La bobine réalise les moments de sélection de cette relation articulaire que le relais établit entre les plots d'entrée et de sortie.

Les organes de calcul sont effectivement munis de mécanismes articulés.

VII. LES ARTICULATIONS DU PROGRAMME

L'homme, pour faire traiter les informations par sa machine, doit lui imposer lui-même tout son programme de fonctionnement. C'est lui qui ajoute de l'intelligence aux choses, porte les jugements et prend consciemment les décisions. Pour comprendre la machine il faut faire intervenir le libre arbitre de l'homme.

Lui seul se pose des problèmes. Avant de commander à sa machine, il est responsable de tout un travail préliminaire. C'est à lui que revient de choisir l'objet même des traitements à effectuer, dans le cadre des mathématiques appliquées, par exemple, ou de la recherche opérationnelle, ou de la traduction d'un texte. De cette option initiale, toutes les autres vont dépendre.

Une fois le problème posé, il appartient encore au programmeur, maître d'œuvre, de méditer sur la méthode à suivre pour le résoudre. En principe, cette méthode comporte deux phases successives.

Dans un premier temps d'analyse, le programmeur définit les divers traitements qu'il faudra faire subir les uns à la suite des autres aux informations. Chacun de ces traitements élémentaires doit faire l'objet d'un choix, car de multiples opérations sont simultanément possibles.

Ultérieurement, en enchaînant les traitements partiels, le programmeur construira un programme cohérent. Schématisé dans un organigramme, ce programme fixe l'ordre de succession des instructions. L'ensemble des opérations, alors, a un but commun. Le programme donne sa forme au traitement des informations. C'est son rôle. Il entre dans la machine, mais il n'en sort pas. A la sortie, apparaissent les résultats.

Il restera encore au programmeur à écrire le programme en utilisant le code qui a été choisi par le constructeur de la machine.

Ce double travail de fragmentation en instructions élémentaires, dont chacune est à choisir entre plusieurs instructions possibles, puis d'assemblage en un programme structuré, suggère la comparaison avec le double processus qu'ont suivi les logiciens ou les linguistes lorsqu'ils ont décomposé leur objet en opérations logiques élémentaires ou en fragments significatifs, à choisir parmi une multiplicité d'opérations ou de fragments possibles, avant de les recomposer dans les chaînes du raisonnement ou du langage. Une démonstration achevée enchaîne des suites de raisonnements de telle manière que le passage d'un chaînon

au suivant soit déterminant pour la pensée. Se réglant sur ce modèle, certains, comme Descartes, ont pu imaginer une méthode idéale qui conduirait par ordre les pensées jusqu'au résultat final, et d'autres, depuis Lulle, Leibniz ou Boole, ont cherché le moyen de mécaniser les temps successifs d'un raisonnement. De ce point de vue, logicien, linguiste et programmeur travaillent d'après le même patron.

En poursuivant alors la comparaison, et en évoquant les articulations du discours logique et les articulations du langage, on conçoit que le programmeur établisse, lui aussi, des relations articulaires entre les instructions élémentaires. L'enchaînement d'instructions dans le corps du programme serait alors le temps déterministe de relations articulaires.

Le mécanisme fondamental de ces processus articulatoires, qui doivent jouer dans l'activité mentale elle-même, est celui-ci : Des événements mentaux vont se succéder; chacun d'eux peut, avant de se réaliser, se réaliser de multiples manières qui seront, à la fois, simultanément possibles et incompatibles entre elles; des options successives seront donc nécessaires; et la réalisation d'une séquence cohérente d'événements mentaux exigera l'intervention de relations articulaires.

En fait, on peut déduire des paragraphes précédents que le programmeur doit prendre des séries d'options. Et cela en raison de la multiplicité des opérateurs possibles et de la multiplicité des opérands possibles. Le but étant de parvenir à des résultats déterminés, ces deux variétés d'indéterminisme doivent être surmontées. Le programmeur procède par choix successifs. Le moment d'une option devant être considéré comme le moment central d'une articulation mentale, le travail du programmeur est essentiellement articulant.

Mais, au moment de la rédaction d'un programme, apparaît encore une nouvelle variété d'indéterminisme, qui s'ajoute à celles que créent la multiplicité des opérateurs possibles et celle des opérands possibles. En effet, l'ordre de succession des opérations, au cours du déroulement du programme, peut être modifié par le résultat d'une opération antérieure. Et il peut y avoir une multiplicité de résultats possibles. Voilà une troisième raison d'indéterminisme pour laquelle le programmeur doit réaliser des relations articulaires.

1. *L'indétermination des séquences.*

Une même opération, appliquée à des données différentes, conduit à des résultats différents. De la variété même du résultat obtenu, la suite des opérations ultérieures peut dépendre.

Une opération logique, *la comparaison*, a même pour objet de faire apparaître cette multiplicité de résultats possibles. Appliquée à deux grandeurs, la comparaison peut avoir plusieurs résultats possibles, selon qu'il y a identité ou inégalité, supériorité ou infériorité. Ces divers résultats sont incompatibles entre eux.

Le résultat de la comparaison sera ensuite exploité. Pour décrire ce temps d'exploitation, temps déterministe d'une relation articulaire, la grammaire française fournit la conjonction conditionnelle *si*, c'est-à-dire *dans le cas où* et le mode conditionnel : Si l'événement A se réalisait, alors l'événement B se réaliserait. Dans la rédaction d'un programme, on utilise le *saut conditionnel*, lequel dépend du résultat de la comparaison : *Si...*, sauter à l'instruction *n*; *si...*, sauter à l'instruction *m*. La condition de l'aléatoire, l'indépendance, doit être réalisée : c'est la rupture des séquences du programme qui permet la multiplicité des évolutions possibles.

Par cette multiplicité des résultats possibles, la succession des séquences est rendue indéterministe. La comparaison est d'utilisation courante, car elle permet au programme

de s'adapter aux diverses conditions possibles. Elle est devenue un outil élémentaire pour le traitement des informations. Par elle sont ouvertes les bifurcations des organigrammes. Par exemple, il arrive souvent qu'une même opération soit à recommencer plusieurs fois de suite jusqu'à ce qu'une certaine précision ait été atteinte. A chaque itération, le résultat obtenu est comparé à une valeur de référence, et c'est d'après le résultat de cette comparaison que finalement la boucle d'itérations sera rompue et le calcul arrêté.

Grâce à ce mécanisme comparateur, il sera donc possible de dérouler le programme dans toutes les variations de sa dialectique.

Et, en raison de la multiplicité des traitements possibles, de la multiplicité des données possibles, de la multiplicité des séquences possibles, et parce qu'il doit conduire à des résultats déterminés, le programme sera fondamentalement articulatoire. Il articulera des séquences qui articuleront des instructions.

Ce que le programmeur a dû articuler mentalement, la machine va avoir à l'articuler physiquement. Un programme est une succession d'options à prendre par le programmeur et de sélections à faire exécuter par la machine.

Dans l'histoire, encore bien récente, de l'informatique, on peut distinguer deux périodes selon la manière dont furent réalisées ces articulations.

2. *La programmation extérieure*

Les premières réalisations de programmes articulés furent faites à l'extérieur de la machine, sous la forme de *tableaux de connexions*.

Les circuits électriques de la machine sont interrompus sur des plots répartis sur la surface d'un tableau. Ces ruptures, qui rendent indépendants les arrivées et les départs des circuits, créent la condition de l'aléatoire. Entre les plots d'entrée et ceux de sortie de multiples connexions deviennent possibles. Ainsi est réalisé l'indéterminisme des connexions. Le tableau, ensemble fini et ordonné de multiples connexions possibles, est un clavier.

Ce tableau est partagé en diverses zones fonctionnelles, qui sont affectées respectivement aux divers organes de traitement. Leurs plots servent, par exemple, à la réception des impulsions issues des broches de lecture, ou aux efférences vers le totalisateur, aux retours de ce totalisateur, aux départs vers l'imprimante,...

Entre tous ces cas possibles, le programmeur pourra faire des choix variés et, par l'intermédiaire de fils et de fiches, établir des connexions entre les plots. Et ainsi il orientera les impulsions électriques, de plot en plot, de manière à faire exécuter par les divers organes la suite des traitements nécessaires, jusqu'aux commandes ultimes, celles de l'organe de sortie. Les options du programmeur sont concrétisées par les implantations des fiches, dont les fils établissent des relations déterministes entre les plots.

Au moment où il implante ses fiches, le programmeur impose ses déterminations à la machine. En ce même moment, il articule entre eux les divers circuits. Un moment d'option est le moment central d'une articulation mentale. Pour jouer d'un clavier, il faut mettre en jeu des relations articulaires.

Sur le tableau, certaines zones sont affectées à des relations articulaires au second degré. Leurs plots sont reliés à des relais dont les connexions peuvent orienter les impulsions dans des directions différentes. Des circuits de commande déterminent l'un ou l'autre de ces divers cas possibles. Bien que les sélections soient en nombre limité, ces mécanismes donnent un certain jeu dans le fonctionnement de l'ensemble.

Une fois les fiches implantées, les connexions subsistent autant que le tableau lui-même. Le programme peut donc être conservé aussi bien qu'une mémoire externe. Et ce programme mémorisé est, lui aussi, amovible. Des bibliothèques peuvent accumuler de multiples programmes, entre lesquels il faudra choisir, au moment de l'emploi, car ils sont incompatibles entre eux. Appliquer un tableau de connexions sur la machine c'est l'articuler avec elle. C'est le même processus articulatoire que pour les mémoires périphériques. Entre les tableaux et la machine les relations sont articulaires.

3. *L'enregistrement du programme*

Ultérieurement, le programme fut enregistré, aussi bien que les données du problème, dans la mémoire centrale elle-même de la machine.

Cet enregistrement, qui a permis de définir *l'ordinateur*, est un nouveau progrès vers l'autonomie de fonctionnement. L'homme confie à sa machine tout le soin d'exécuter elle-même le programme, sans plus intervenir.

En vérité, ce n'est pas l'autonomie de fonctionnement de la machine qui importe vraiment. La notion d'autonomie est bien en cause. Mais il s'agit de celle de l'homme et non de celle de la machine.

Il ne suffit pas à l'homme que sa machine fonctionne indépendamment de lui. Il faut que, dans son fonctionnement, elle soit au service de son autonomie intellectuelle, à lui, le programmeur.

Il sera donc nécessaire que le constructeur ait créé dans la machine les conditions indispensables pour que le programmeur puisse garder l'entière liberté de ses choix. Tous les indéterminismes, qui ont été reconnus dans les paragraphes précédents, et qui dérivent tous de la liberté de l'utilisateur, doivent être assumés par la machine elle-même.

Ce sont les principes de la physiologie théorique et son interprétation probabiliste de l'autonomie, qui vont servir de guide pour comprendre le fonctionnement des organes centraux de l'ordinateur. Là, au centre de la machine, le programme est enregistré dans la mémoire centrale, et ses instructions vont être soumises aux organes de commande. Les divers organes périphériques de la machine n'ont plus de sens que dans leurs rapports avec cette unité centrale par l'intermédiaire de laquelle se font toutes leurs relations. Le principe sera que, dans cette unité centrale, soit assurée l'indépendance des instructions successives. Cette indépendance est la condition nécessaire de l'aléatoire. De cette manière, entre les instructions, il y aura de multiples relations possibles. Et ces instructions pourront être articulées entre elles, afin que soient obtenus les résultats déterminés, au terme de tous les traitements partiels.

L'unité centrale doit être telle que les instructions, qui se succèdent, puissent s'y succéder sans que ni leurs opérandes ni leurs opérateurs ne soient liés aux opérandes ou aux opérateurs des instructions précédentes. Cette condition est celle-là même qui permettra à l'unité centrale d'exécuter les programmes que l'homme aura conçus en toute liberté. La machine, qui n'a pas plus de libre arbitre que d'intelligence, doit être construite de telle manière qu'elle soit au service du libre arbitre de l'homme.

a) *La mémoire centrale*

Effectivement, la mémoire centrale, à tores de ferrite, a été construite pour être au service de l'autonomie intellectuelle du programmeur.

Son premier caractère est l'homogénéité de sa structure. Ses nombreux tores, identiques dans leur forme et leur nature, sont fonctionnellement équivalents. Ils sont placés côte à côte, et cette répartition plane évoque quelque ressemblance avec la disposition des neurones dans les cortex du cerveau et du cervelet.

Chacun des tores a la possibilité de prendre à tout moment l'un ou l'autre de deux états magnétiques, simultanément possibles et incompatibles entre eux. Ce tore passe d'un état à l'autre sous l'action déterminante d'un courant électrique, et conserve son état tant qu'une nouvelle action extérieure n'est pas intervenue. Ce changement d'état magnétique comporte les deux temps d'une relation articulaire, aussi bien que le changement de position d'un relais.

N'importe quel tore de la mémoire peut changer d'état magnétique indépendamment de ses voisins. L'indépendance étant la condition de l'aléatoire, les tores ont la possibilité d'avoir entre eux des relations fonctionnelles aléatoires. D'où la multiplicité des cas possibles.

Pour l'enregistrement des informations, les tores sont groupés, souvent 6 par 6, en *positions de mémoire*. Chaque position peut, à tout moment, enregistrer l'un ou l'autre parmi 64 caractères possibles, soit tout un code alphanumérique et toute une gamme de signes variés. Une position de mémoire est, avant enregistrement, un véritable clavier de 64 caractères possibles. Pour jouer de ce clavier, et enregistrer un et un seul parmi ces 64 cas possibles, un mécanisme articulé est nécessaire, effectuant des commutations après sélection. Le code, voulu par le constructeur, servira d'agent de détermination.

Les nombreuses positions d'une même mémoire sont indépendantes entre elles. Pour désigner le groupement informationnel de plusieurs positions, on parle souvent de *mot de mémoire*. Les informations peuvent se succéder en toute indépendance dans la mémoire. Toute région de la mémoire est à l'état de neutralité informationnelle et peut enregistrer aussi bien un ordre opératoire, que la donnée d'une opération ou le résultat de cette opération. Le programmeur a donc la liberté d'attribuer à chaque zone de la mémoire le sens qu'il désire. La mémoire est bonne à tout faire. Il y a la même indépendance entre l'état physique d'un tore et la signification que lui attribue le programmeur qu'entre les signifiants et les signifiés de la linguistique.

Si le constructeur a conféré à la mémoire à tores, à la place où il l'a mise dans l'unité centrale, de telles propriétés structurales et fonctionnelles, c'est que celles-ci étaient nécessaires pour le rôle que le programmeur aurait à leur faire jouer. Ce principe de construction assure le caractère aléatoire des relations entre tores individuels et entre positions de mémoire. La mémoire est au service du libre arbitre du programmeur. Celui-ci peut y enregistrer, en particulier, les instructions qu'il a choisies et dans l'ordre qu'il a choisi.

b) *Les organes de commande*

Une fois les instructions enregistrées, les organes de commande, intermédiaires entre la mémoire centrale et les organes d'exécution, vont entrer en action. La mémoire n'a de valeur fonctionnelle que lorsqu'elle est incorporée dans la machine. Elle est un ensemble d'éléments qui ont les deux propriétés indispensables pour servir au traitement des informations : avoir la possibilité de prendre deux états physiques distincts et avoir la possibilité d'entrer en liaison, après commutations, avec les autres organes de la machine.

Les organes de commande vont faire exécuter les instructions, qui sont rangées dans la mémoire centrale. Mais l'ordre de rangement est celui qui a été choisi par le programmeur. Il n'appartient en rien à la machine. Cet ordre résulte des libres choix du programmeur. Aussi les

instructions peuvent elles être indépendantes les unes des autres. Le fonctionnement des organes de commande doit être accordé à cette indépendance. Donc ces organes doivent procéder instruction par instruction, chacune pour elle-même, indépendamment des instructions précédentes et des suivantes. Cette indépendance garantit l'obéissance à la liberté du programmeur. La multiplicité des relations possibles entre instructions successives est nécessaire pour que le programme puisse se dérouler tel que l'homme l'a conçue librement.

Chacune des instructions en cours d'exécution est individuellement transférée de la mémoire centrale dans des registres, afin d'être transmise, d'après ses caractéristiques propres, aux organes de traitement. Toujours pour la même raison d'indéterminisme, un registre peut enregistrer l'une ou l'autre parmi de multiples instructions possibles. Les instructions peuvent s'y succéder sans se ressembler. Elles diffèrent soit par les opérations à effectuer soit par les données à soumettre aux opérateurs. Le registre accueille toutes les instructions possibles, quels que soient les opérandes et quels que soient les opérateurs.

Dans le registre va commencer le temps de détermination. Quelle que soit l'instruction, le registre va la faire exécuter en vue d'un résultat déterminé. Cette détermination est celle même qu'a choisie le programmeur et qui pénètre au cœur même de la machine.

Deux agents de détermination vont alors être utilisés. a) La variété d'opération à effectuer est déterminée dans le registre par *codage*. Un code établit une relation bijective, déterministe dans les deux sens, entre un état physique déterminé et une signification déterminée. Le code qu'a choisi le constructeur pour sa machine est utilisé par le programmeur. b) Les opérandes sont retrouvés dans la mémoire centrale par *adressage*. Attribuer une adresse à une information c'est utiliser la relation déterministe d'ordre. Les aiguillages vers les organes de traitement sont alors effectués.

Les organes de commande ont encore à déclencher le traitement de l'instruction suivante, et à réaliser les sauts conditionnels. Entre instructions successives les liaisons sont donc très transitoires. Les connexions sont établies puis rompues. Elles n'ont plus la rigidité qu'elles avaient sur les tableaux de connexions.

Le fonctionnement de la machine est alors assez souple pour que l'homme puisse l'asservir à son activité intellectuelle, dans sa liberté.

4. *L'autonomie intellectuelle*

La machine, en effet, ne peut se comprendre que par celui qui l'utilise. Et, de ce qui précède, des remarques générales peuvent être extraites.

1. La distinction entre relation *déterministe* et relation *aléatoire* a été d'un usage constant. Elle se révèle efficace au point qu'elle mérite de devenir un élément fondamental de la méthode scientifique.

2. Le premier traitement que la machine a fait subir aux informations a été de les mettre *en réserve*. La capacité et la sécurité des mémoires sont leurs qualités premières. Les informations ne se dérobent pas au moment où elles vont être saisies.

3. *La relation articulaire* a été retrouvée dans les diverses phases du traitement des informations : les échanges de l'homme avec sa machine, la consultation des mémoires périphériques par l'unité centrale, le fonctionnement des organes de calcul, l'exécution du programme par les organes de commande. La fonction articulaire se révèle comme la plus importante des fonctions élémentaires de la machine.

On dit couramment que la machine manipule, manœuvre, manutentionne les informations, que les électrons sont très aisément maniables, toutes expressions qui dérivent du mot latin *manus*, la main, l'organe articulé par excellence. Comme on devrait réserver le suffixe *-tor* aux mots qui se rapportent aux machines, en conservant le suffixe *-teur* pour ceux qui concernent l'homme, on aurait dû qualifier la machine qui traite l'information *d'arthrotor* et non *d'ordinateur*, du latin *ordino*, mettre en ordre, car la relation d'ordre, quelque importance qu'elle ait, en a moins que la relation articulaire.

La machine articule les informations qu'elle a dans ses réserves. Comme tout outil, elle doit être articulée.

4. La mise en réserve et la relation articulaire appartiennent l'une et l'autre à la *Physiologie théorique*. La Physique, science originelle de la pensée scientifique dans le monde moderne, les ignorait.

La physiologie théorique a pour idée centrale celle d'*autonomie*. L'accumulation de réserves et la création de mécanismes articulaires réalisent deux conditions physiques nécessaires à une activité autonome.

La physiologie théorique se résume dans cet énoncé : En acquérant son autonomie, par rapport au milieu extérieur, l'animal acquiert la possibilité d'entrer avec lui en relations aléatoires. La mise en réserve crée la condition de l'aléatoire, l'indépendance par rapport au milieu extérieur. Le mécanisme articulé, dont le processus fonctionnel se décrit sur le même patron que la relation aléatoire, rend possibles les relations entre un système qui a une activité autonome et le milieu extérieur. C'est l'outil de l'autodétermination.

Que le constructeur ait dû munir ses machines de réserves mémorisées et de mécanismes articulaires cela révèle le but qu'il poursuivait, mettre la machine au service de son autonomie.

5. Mais, en traitement d'information, il s'agit de *l'autonomie intellectuelle* de l'homme.

Cette autonomie intellectuelle a déjà été abordée dans l'article III, par le biais du langage, l'outil linguistique étant au service de l'autonomie intellectuelle. Dans l'article actuel, cette autonomie est abordée par le biais de l'informatique. La machine, ouvrière d'intelligence sans intelligence, est au service de l'autonomie intellectuelle de l'homme.

Sans cette autonomie on ne peut comprendre la machine à traiter l'information. Et, réciproquement, l'informatique, interprétée comme je viens de le faire, témoigne par elle-même que l'activité intellectuelle de l'homme est douée d'autonomie.

6. La relation articulaire est retrouvée (II-III) dans de multiples domaines du *comportement humain* : cinématique appliquée, acoustique, linguistique, géométrie, mathématique appliquée... Elle relie directement la physiologie ostéo-articulaire animale aux sciences descriptives du comportement humain, dont l'immense domaine s'étend aussi bien à la caractérologie qu'à la psychanalyse, l'économie politique ou la recherche opérationnelle. Seuls peuvent avoir un comportement les systèmes qui ont acquis leur autonomie motrice.

La mécanique d'un corps articulé est au service d'une activité autonome (II); le langage articulé est au service d'une activité intellectuelle autonome (III); la machine à traiter l'information est au service de la même activité intellectuelle. La physiologie du corps articulé, la linguistique, l'informatique concluent de la même façon : le mécanisme articulé est le mécanisme élémentaire de l'action de l'homme sur le milieu extérieur.

7. L'idée d'autonomie et son interprétation probabiliste sont au fondement même de la connaissance de l'homme, aussi bien comme être pensant que comme être vivant. C'est l'interprétation probabiliste de l'autonomie qui rend compte de l'emploi, par la théorie de l'information, de la théorie des probabilités.

La connaissance des mécanismes physiques d'acquisition et d'usage de l'autonomie, la mise en réserve et la relation articulaire, est indispensable pour l'intelligibilité des fonctions intellectuelles, donc pour la connaissance de l'homme par lui-même.

8. Reste encore le principal : donner un *sens* à cette activité autonome !

Aux activités de la machine le sens est donné par le constructeur et le programmeur. Ceux-ci utilisent dans ce but le procédé du codage, en attribuant à tout changement d'état physique une signification déterminée. Sans l'homme, le fonctionnement de la machine n'aurait aucun sens.

Donner un sens aux mécanismes physiques, qui permettent d'acquérir et d'utiliser l'autonomie, tel apparaît alors le rôle de l'intelligence humaine. Celle-ci pourrait se définir comme ce qui donne une signification aux fonctions intellectuelles, la mémorisation par exemple.

Le libre arbitre est la conscience que l'homme a d'être responsable de son comportement. L'homme est libre de donner un sens à sa vie. Pour comprendre l'homme, il ne suffira pas des deux relations déterministe et aléatoire. Il faudra encore *la relation finaliste*, selon laquelle le présent est réalisé en vue d'un but futur. Ni l'aléatoire ni le déterminisme n'ont de but.

L'âme, à la fin de l'article III, a été définie comme ce qui donne un sens aux articulations mentales.

9. L'homme, alors, serait-il enfin atteint dans sa totalité? Ou reste-t-il encore inintelligible pour lui-même?

VIII

Les poètes, certainement, se servent de leurs souvenirs personnels et de leur langage bien autrement que les machines ne traitent les informations. Ils préfèrent l'indéterminé au déterminé. « La Poésie, comme l'a définie Valéry, est l'essai de représenter, ou de restituer, par les moyens du langage articulé, ces choses ou cette chose que tentent obscurément d'exprimer les cris, les larmes, les caresses, les baisers, les soupirs, etc. » Mais ce langage articulé est, tel quel, insuffisant, puisque le poète se cherche « un langage dans un langage », et que la poésie doit évoluer « de l'articulé à l'effleuré ». Le langage poétique reste pourtant articulaire, puisque cet effleurement peut être obtenu par modulation et que la modulation est une articulation continue.

La mémoire poétique ne se réduit pas à une mise en réserve d'informations dans une machine. Un tambour magnétisé serait-il vraiment utile pour partir à la Recherche du temps perdu, c'est-à-dire à la recherche de soi-même, en pénétrant dans les profondeurs de ses souvenirs afin de découvrir ce qui subsiste de soi alors que tant de choses ont disparu.

« Au grand jour de la mémoire habituelle, remarque Proust, les images du passé pâlisent peu à peu, s'effacent, il ne reste plus rien d'elles, nous ne les retrouverons plus. Ou plutôt nous ne les retrouverions plus, si quelques mots (comme « directeur au ministère des Postes ») n'avaient été soigneusement enfermés dans l'oubli. » Dans une mémoire artificielle, les informations ne sont ni altérées, ni confondues, ni amalgamées, ni distordues, ni contaminées. Proust se servit de sa mémoire, par bonheur infidèle, pour en faire l'outil du luxe suprême, celui de la création inspirée et consciemment entretenue. « Dès que j'eus reconnu le goût du morceau de madeleine trempé dans le tilleul que me donnait ma tante..., aussitôt la vieille maison grise sur la rue, où était sa chambre, vint comme un décor de théâtre s'appliquer au petit pavillon donnant sur le jardin..., et avec la maison, la ville, la place où on m'envoyait avant déjeuner, les rues... » Une mémoire statique, en immobilisant le passé, est trompeuse en ce qu'elle résiste à la décomposition irréversible des événements.

La matière pourrait-elle être poète si la poésie est telle que la définissait Shelley, « l'expression des moments les meilleurs et les plus heureux des âmes les plus heureuses et les meilleures »? Si la poésie était toujours aussi angélique, il n'y aurait qu'à se promener parmi les œuvres d'art comme on se promène la main dans la main avec ses enfants pendant leur toute prime jeunesse, en communiant avec eux par la grâce d'une immédiate confiance. L'amour des parents est par nature immaculé. L'homme dans les villes se prive de la nature nue et perd le bonheur d'errer, sur un sol meuble, la sensibilité à tout vent. C'est là qu'il faut aller construire avec de la mousse et des brindilles des maisons à étages pour les petits compagnons. C'est alors que l'on peut apprécier le cadeau royal qu'ils font de leur enfance, dont la poésie mérite que l'on raconte tous les jours les mêmes histoires, avec les mêmes détails, et dans le même ordre, pour décrire les châteaux et les îles où vivent des Ogres et des Cendrillons plus vrais que nature.

Toute une hygiène est nécessaire pour sauvegarder la naïveté de l'enfance contre les désabusements déprédatsifs des hommes durcis par la concurrence et les heurts matériels qui provoquent tant de révisions déchirantes. On est obligé de se refuser à ce qui risque d'altérer les états d'enchantement. Le créateur, animé par la conviction que l'œuvre en cours de création est supérieure à toute autre, sinon elle serait inutile, ne peut que redouter l'ignominie de la mort qui abolirait les œuvres à venir.

Les machines participent à une civilisation froide. Peut-on même qualifier de civilisation une situation collective qui tend à n'obéir qu'au critère impersonnel de la rentabilité et qui utilise de plus en plus pour se décrire elle-même les mots vitesse, puissance, rendement, des mots de physique? Le déroulement séquentiel des traitements des informations dans la machine n'a pas la soudaineté d'apparition des idées en coup de lumière éclairant. Si l'homme doit ajouter de l'intelligence à la nature c'est que cette intelligence n'y est pas. Plus l'homme explorera l'univers et plus il aura à se demander ce qu'il y fait. Plus il aura de possibilités d'action et d'outils articulés à sa disposition, et plus il devra s'interroger sur l'usage qu'il aura à en faire. Car celui qui a une machine a une supériorité sur les autres hommes.

Tout à la félicité de la création, Schubert retrouvait dans l'œuvre de Mozart « le paradis perdu de la musique ». Mais ce paradis s'ouvre à la demande pour celui qui en a découvert une fois les clefs. Elle est là la poésie angélique! Et les mêmes clefs ouvrent le paradis qu'inventa Platon, pour la satisfaction de le contempler, dans sa lumière, sans laquelle les idées ne seraient que ce qu'elles sont. Aussi bien dans *la Flûte enchantée* que dans *le*

Phédon, l'homme se refuse à accepter que par la mort il se décompose comme une machine qui est disloquée.

Socrate, assis dans sa prison, au moment le plus pathétique du drame qui se prépare, vers la fin de cette ultime journée, soulève la question de savoir pourquoi il est là, alors que l'occasion et la possibilité de fuir Athènes et la mort lui avaient été offertes. Serait-ce répondre que de dire que, son corps étant fait d'os et de muscles, ses os étant des solides séparés par des cavités articulaires, ses muscles ayant la propriété de se contracter et de se décontracter, il avait la possibilité, lui Socrate, de mouvoir ses membres?

Sur ces fondements de physiologie articulaire, l'âme allait faire son entrée dans le monde occidental. Socrate rejette cette réponse rudimentaire, par laquelle on éviterait soigneusement de reconnaître les véritables causes. S'il a décidé de ne pas se servir de ses muscles et de ses articulations, c'est parce que les Athéniens avaient jugé meilleur de le condamner et que, lui-même, pour cette même raison, il avait jugé meilleur de rester dans sa prison, ce qui impliquait qu'il aurait à subir la peine que les juges avaient décidé de lui infliger. Toute sa mécanique corporelle articulaire n'avait, évidemment, aucun sens par elle-même.

Ce qui donne sa valeur à une civilisation c'est le sens qu'elle a donné à son histoire. L'homme, qui sait ajouter de l'intelligence à son action, peut-il aussi y ajouter de la morale, avec cet espoir, toujours renouvelé, et jusqu'à présent toujours déçu, que cette adjonction permettrait à la politique d'avoir une action préventive et rendrait l'histoire moins douloureuse?

Telle est bien la leçon que Platon voulut faire exprimer par Socrate, dont il fit un personnage historique, peut-être plus vrai que nature.

En fait, en affirmant que, pour l'homme, l'essentiel est de se connaître, et que l'essentiel de cette connaissance est celle de l'âme; en proclamant alors son ignorance totale, tout en maintenant que c'est par ignorance que l'homme fait le mal, ce qui faisait de l'âme un objet de recherche plus que de découverte; en remplaçant cette lacune de la connaissance intellectuelle par la recherche obstinée de raisons de croire et d'espérer en un beau risque à courir; en protégeant sa croyance contre les critiques, tout en suscitant lui-même les critiques, ce qui mettait à l'épreuve sa vulnérabilité, alors qu'il était urgent pour lui d'être invincible, tout cela pour donner, par l'acharnement même de son analyse passionnée, toute sa valeur à son enquête; en révélant à ses auditeurs qu'il ne créait rien en eux à partir du néant, mais qu'il ne faisait qu'aider, comme un accoucheur, à naître ce qui était en chacun d'eux, comme les uns et les autres pouvaient le vérifier par leur expérience personnelle, puisqu'ils étaient mordus au vif par sa parole, si douloureusement qu'ils essayaient de se refuser aux problèmes qui les bouleversaient en profondeur; en donnant lui-même cette leçon d'expérience, que comprit Épictète, qu'il n'était pas en prison puisqu'il s'était décidé volontairement à y rester; en mourant pour une espérance; Socrate, irréversiblement, a obligé les hommes à se demander depuis sa mort si sa mort avait eu la signification qu'il lui avait attribuée, si, en vérité, son acte avait eu quelque valeur, ou s'il l'avait fait en vain, comme un luxe inutile, pour rien.

Pierre VENDRYÈS