

**Revue Internationale de**

ISSN 0980-1472

**systemique**

Vol. 2, N° 1, 1988

**afcet**

**Dunod**

**AFSCET**

**Revue Internationale de**  
**systemique**

**Revue**  
**Internationale**  
**de Sytémique**

volume 02, numéro 1, pages 77 - 95, 1988

La mécanique comparée

Louis Couffignal

Numérisation Afscet, janvier 2016.



Creative Commons

ARCHIVES

LA MECANIQUE COMPAREE

Louis COUFFIGNAL <sup>1</sup>

---

Cet article, de même que celui de Warren McCulloch, reproduit dans le précédent numéro de cette revue, est emprunté au numéro de *Thalès* consacré à la cybernétique et réalisé avec la collaboration du «Cercle d'Etudes Cybernétiques» (tome 7, 1951, paru en 1953, Presses Universitaires de France). Ce texte demandé à Louis Couffignal (1902-1967), alors Directeur de l'Institut Blaise Pascal, montre quelles étaient à cette époque ses préoccupations alors que, venant d'organiser le congrès sur «Les machines à calculer et la pensée humaine» (Paris, 1951) auquel avaient, entre autres, participé Ross Ashby, Warren McCulloch et Norbert Wiener, il allait se préparer à fonder la *Société Française de Sciences Comparées* puis, en collaboration avec Georges Boulanger, l'*Association Internationale de Cybernétique* (Namur).

On remarquera que Louis Couffignal, présentant les différentes définitions et classifications des machines proposées avant lui, fait allusion à Monge, Ampère, Reulaux, Maurice d'Ocagne, Kœnigs. On pourrait ajouter Jacques Lafitte (1884-1966) auteur de «Réflexions sur la science des machines» (Blaud et Gay, Paris, 1932 ; Vrin, Paris, 1972). Dans un domaine différent, une référence est faite à l'ouvrage de Yves Rocard («Dynamique générale des vibrations», Masson, Paris, 1949) que l'on peut considérer, par les isomorphismes qu'établit l'auteur entre les domaines différents des sciences et le rôle qu'il fait jouer au concept de rétroaction, comme authentiquement cybernétique.

Robert Vallée

1. Texte publié dans *Thalès*, tome 7, année 1951 (paru en 1953), pp. 9-24 (à suivre). Nous remercions les Presses Universitaires de France de nous avoir autorisés à reproduire ce document.

Un architecte, qui s'était fort instruit dans les sciences modernes, fut chargé de construire un parc zoologique. Il s'informa des mœurs des animaux sauvages, fit venir des livres d'histoire naturelle, des récits de voyages et de chasse, compulsa, compara, cogita, et calcula une trajectoire qu'il dénomma en termes explicites, le bond félin quadratique moyen. Il en tira la largeur des fossés et la hauteur des grilles à établir autour du parc des fauves, et, sur des bases ainsi assurées, il acheva une belle œuvre d'art.

Un jour, beaucoup plus tard, que l'architecte était venu contempler le succès de son œuvre, un grand tigre royal, enfermé depuis peu et d'humeur encore irritable, l'aperçut, croisa son regard, et lui trouva un air dont il eut déplaisir. L'architecte le vit dresser la tête, s'asseoir, gratter le sol de ses griffes d'acier, s'arc-bouter sur ses pattes, découvrir ses crocs et rugir, et il sourit, comme peut faire qui est sûr de sa puissance. Mais le tigre, libérant le ressort de ses jarrets musclés, bondit, passa la grille, et, avant d'ouvrir la bouche pour crier au félin qu'il transgressait les lois de la mathématique, l'architecte fut mangé.

L'architecte, assurément, dans le cheminement de ses pensées, avait manqué le carrefour où les voies issues du bon sens rencontrent celles qui viennent des mathématiques. L'accident est fréquent si l'on part des mathématiques. Et l'on voit concorder dans cette opinion un mathématicien de pure obédience bourbakienne, M. Henri Cartan, et un «gentil» comme Marcel Proust :

Le miracle de la science, dit M. Henri Cartan, c'est qu'on puisse édifier une mathématique abstraite, capable de s'appliquer ensuite avec efficacité aux lois de la nature.

Et Marcel Proust :

L'action de l'esprit est aisée quand elle n'est pas soumise au réel.

Le Prof. Norbert Wiener convie à cet autre miracle, de soumettre la biologie à quelques théories mathématiques préconçues. C'est ce qu'il appelle la cybernétique.

Nous voudrions reprendre un schéma, déjà utilisé en plusieurs occasions, qui nous paraît bien illustrer l'emploi que l'on peut faire d'une science ou d'une technique pour un problème relevant d'une autre science ou d'une autre technique.

Pour serrer la réalité de plus près, examinons le cas extrême, celui d'un problème de l'art de l'ingénieur ; par exemple, la fabrication d'une turbine hydraulique.

Du problème posé, défini par un ensemble de conditions techniques, on extraira un problème de mécanique des fluides, c'est-à-dire de physique ; celui-ci, par abstraction de certains phénomènes secondaires, dont on peut se proposer d'éliminer les effets, pourra se réduire, par exemple, à un phénomène de géométrie ; ce dernier, enfin, conduira

peut-être à un problème d'analyse mathématique. Du problème technique, concert, on est ainsi passé à un problème mathématique, abstrait : la partie gauche du schéma ci-dessous (fig. 1) représente cette démarche de la pensée.

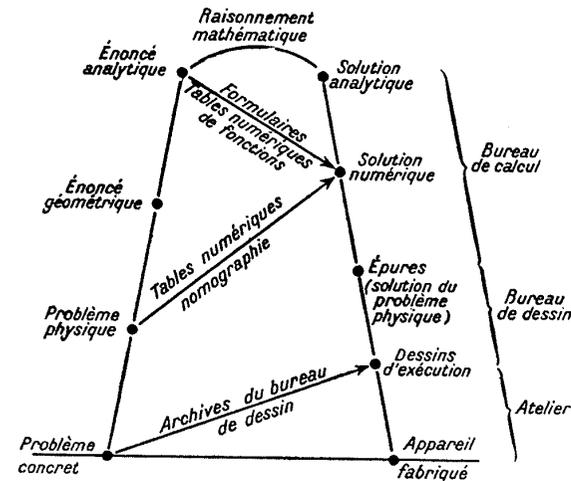


Fig. 1

L'énoncé propre de ce dernier problème ignore complètement l'énoncé technique du premier ; résoudre ce problème est une question de mathématiques et non plus de technique, et le technicien peut confier la recherche de la solution à un mathématicien, même peu averti des questions techniques ou point du tout.

La solution analytique du problème abstrait sera suivie, par exemple, d'un calcul numérique, ce dernier d'épures, et l'étude se terminera au bureau de dessin par l'établissement des plans pour l'exécution. L'atelier construira la turbine. Si, aux essais, elle satisfait aux conditions imposées, le problème technique aura alors reçu, mais alors seulement, sa véritable solution.

Sous réserve de l'excès de schématisation que peut comporter la figure, on aperçoit dans la résolution d'un problème technique, deux cheminements inverses de la pensée. Le premier substitue à l'énoncé concret des énoncés de plus en plus abstraits ; chacun de ces énoncés est en réalité celui d'un nouveau problème, plus général que le précédent, mais qui ne représente qu'une partie de l'énoncé de ce dernier : la progression vers l'énoncé le plus abstrait se fait par l'abandon progressif de conditions propres au problème technique considéré. Le second de ces cheminements de la pensée a pour point de départ la solution, généralement formelle, du problème abstrait, et il consiste à

en déduire progressivement, des solutions numériques ou graphiques des problèmes que l'on a énoncés au cours de la montée vers l'abstraction. Enfin ces deux cheminements inverses de la pensée sont reliés par le raisonnement mathématique comme par une *passerelle* — nous retiendrons ce terme pour sa commodité.

La figure montre, sans qu'il soit nécessaire de l'appuyer de longs arguments, comment d'autres passerelles : formulaires, tables numériques, abaques, données d'archives, etc., pourraient remplacer l'analyse mathématique, avec une importante économie de temps ou d'efforts.

Nous dirons, quelle que soit la passerelle, que les raisonnements à trois phases du genre de ceux que schématise la figure sont des *raisonnements complets*<sup>2</sup>.

Il est fréquent que plusieurs problèmes puissent être représentés par les mêmes symboles ; par exemple, les problèmes de mécanique des fluides et d'électricité peuvent presque toujours se ramener les uns et les autres à l'intégration d'équations de Laplace ou de Poisson. Ces problèmes constituent une *famille*, ce que nous pouvons représenter schématiquement par un faisceau de lignes convergentes tel que celui de la figure 2.

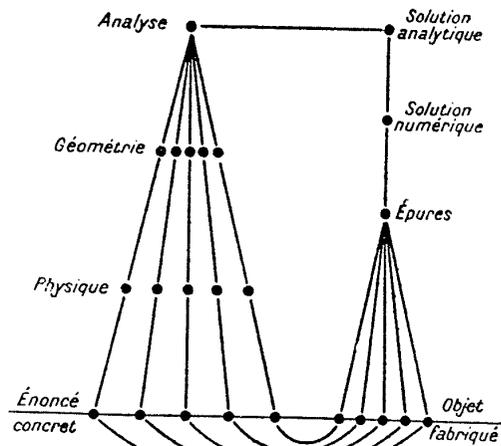


Fig. 2

2. Le Prof. Anderson, de l'Université de l'Illinois, a récemment développé des considérations voisines, et appelé les raisonnements de ce type des *raisonnements parfaits*. Nous préférons conserver le terme de raisonnements complets qui met en relief une propriété structurale et non un jugement de valeur.

Choisissant un exemple dans l'art de l'ingénieur nous avons implicitement limité les problèmes concrets considérés à des problèmes de fabrication. Ce n'est point en minimiser l'importance, ni la difficulté. L'activité de l'esprit de l'homme, on l'a souvent dit, se porte vers l'un ou l'autre de deux objets extrêmes : connaître ou créer, méditer ou agir. Au second appartiennent les problèmes techniques dont la solution exige des raisonnements complets. Les problèmes de seule connaissance demandent de même une représentation symbolique des faits et des phénomènes, mais n'exigent pas qu'elle permette le retour vers les êtres réels : la partie gauche des schémas des figures 1 et 2 représente convenablement cette structure ; on trouve souvent au sommet, une description symbolique des faits du genre d'une *théorie mathématique*.

Ces schémas mettent en évidence une notion qui commence à prendre place de façon plus ou moins explicite dans les travaux de science ou de technique et qui nous paraît importante : celle du *domaine* d'un symbole ou d'une théorie.

La définition en est immédiate : le domaine d'un symbole est l'ensemble des objets que ce symbole représente ; le domaine d'une théorie est l'ensemble des phénomènes que représente cette théorie. Dans les deux cas, la qualité, la valeur, l'efficacité de cette représentation restent à la libre appréciation de l'auteur et surtout des utilisateurs de ces symboles. La notion de domaine ne saurait donc exprimer une propriété essentielle, quelque chose d'absolu ; le domaine d'un symbole ou d'une théorie tient des usages du raisonnement scientifique et technique, et, à chaque époque, à une manière d'*université consensus*.

L'analyse qui précède, détaillée à dessein, insiste sur l'abandon nécessaire de propriétés d'un objet pour passer de la description de cet objet à sa représentation symbolique. Un symbole est donc moins précis que la définition d'aucun des objets qu'il représente — sauf s'il est le substantif par lequel on désigne cet objet — mais son domaine est plus vaste. On retrouve ici les très vieilles notions d'extension et de compréhension ; revêtant une expression mieux harmonisée, peut-être, avec la terminologie scientifique moderne, elles acquièrent une efficacité nouvelle.

Si, par exemple, du temps d'Haevside, l'usage eut été d'accompagner la définition d'un symbole de la description de son domaine, Haevside n'aurait sans doute jamais posé cette question, surprenante sous sa plume : « Comment se fait-il qu'une grandeur représentée par un vecteur n'ait pas toutes les propriétés des vecteurs ? ».

On voit à peine, dans la littérature, s'esquisser la recherche systématique des familles de problèmes bien que quelques ouvrages récents, notamment la *Dynamique des vibrations* et le *Cours d'électricité* de M.Y. Rocard permettent déjà d'en apprécier l'utilité. Et l'on ne trouve guère rien, à notre connaissance, touchant la description du domaine d'aucun symbole ou théorie.

Ces notions complémentaires faciliteraient cependant l'application de certaines lois ou méthodes qu'illustre la figure ci-dessous (fig. 3) et auxquelles l'histoire des sciences et des techniques apporte déjà mainte confirmation.

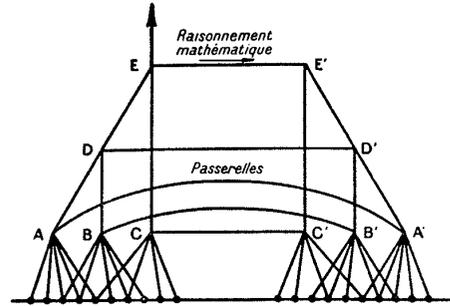


Fig. 3

Les diverses familles de problèmes que l'on peut construire, si on en limite le schéma, vers le haut, au niveau d'abstraction où s'établit une première passerelle, présentent un aspect verticillé, des rameaux de familles différentes pouvant s'anastomoser à la base. S'il existe, plus haut, d'autres passerelles, ou s'il suffit d'une description scientifique des phénomènes, la pyramide se ramifie en s'élevant ; atteignant les mathématiques, elle peut même gagner les régions hautes du schéma où seraient représentées des théories du genre du Bourbaki.

Un tel schéma s'édifie à partir de la base : on va de l'objet ou du phénomène que présente la nature à des symboles dont les domaines sont de plus en plus vastes parce que ces symboles s'obtiennent, comme nous l'avons dit, en abandonnant en nombre de plus en plus grand des qualités des objets ou des phénomènes plus concrets ; on ne peut point aller d'abord du symbole à l'être naturel puisqu'il faudrait ajouter aux qualités de définition du symbole des qualités que l'on ignore. A partir d'une théorie, en habillant ses symboles de qualités concrètes, on peut construire à volonté de multiples représentations matérielles de cette théorie, représentations graphiques, mécaniques, chimiques ou autres ; mais, sauf effet de hasard pur, on ne peut pas construire d'être réel. Le schéma de la figure 1 se parcourt dans un sens unique : à gauche, du concret vers l'abstrait, sans pouvoir cheminer en sens contraire ; à droite de l'abstrait vers le concret ; même la fabrication d'un être identique à un être naturel, dans le cas, par exemple, d'une synthèse chimique, se fait en retournant de la théorie à la réalité par la voie d'une passerelle et d'une suite d'opérations qui trouvent leur représentation dans la partie de droite du schéma.

C'est pourquoi l'on éprouve, lorsque M. Norbert Wiener, dans *Cybernetics*, propose de rechercher les lois de la biologie du système

nerveux en partant des théorèmes les plus récents de la mathématique probabiliste, autant d'inquiétude que de curiosité.

Les nombreux cas où des phénomènes biologiques admettent une description assez semblable à celle de phénomènes de la nature inerte pour que l'on ait pu présumer que les lois de ces derniers s'appliquent aussi aux autres, sont ceux où l'être vivant, dans la structure de ses organes ou dans son comportement, observe les lois de la mécanique des machines. La forme de la cellule de l'abeille, les dimensions d'une tige de seigle, le galbe d'un poisson sont établis selon une loi d'économie de matière, ou encore si l'on veut, d'économie d'énergie ; on peut multiplier de tels exemples, et en trouver de plus subtils : les découvertes de l'ordre de la biologie que revendique la cybernétique sont de cette nature ; elles résultent de la comparaison du fonctionnement de machines et du comportement d'êtres vivants. Les machines peuvent donc constituer dans bien des cas une représentation abstraite des êtres vivants significative et suggestive, ou bien des organes de machines être assez voisins d'organes d'êtres vivants pour constituer une représentation abstraite efficace de ces derniers. Une étude méthodologique de cette représentation est donc justifiée.

Au cours du colloque, international sur « Les machines à calculer et la pensée humaine » qui a eu lieu à Paris au mois de janvier dernier, M. Lichnerowicz a posé fort opportunément une question qui doit être rappelée au début de cette étude, et qui requiert une réponse précise. « On discute depuis plusieurs jours, a-t-il dit, si des organes de l'homme ou des animaux sont semblables à des machines ; mais qu'est-ce, au juste, qu'une machine ? ».

Il semble que le mathématicien français Monge ait été le premier à poser une telle question, lorsqu'il fut chargé du « Cours de machines » à l'Ecole Polytechnique, en 1808. Avant lui, on trouve seulement des descriptions de machines particulières, dans le bel atlas de Leupold, par exemple, et même l'*Encyclopédie* de Diderot n'a pas souci d'une définition générale.

Les forces de la nature dit Monge, qui sont à la disposition de l'homme, ont trois éléments distincts, la masse, la vitesse et la direction du mouvement. Rarement, dans ces forces, les trois éléments dont il s'agit ont les qualités qui conviennent au but que l'on se propose, et les machines ont pour objet principal de convertir les forces dont on peut disposer, en d'autres, dans lesquelles ces éléments soient de nature à produire l'effet désiré.

Ainsi les machines, au début du XIXe siècle, sont des engins destinés à plier les forces de la nature, les poids, le vent, l'eau et la traction animale, aux travaux que l'homme a voulu.

La machine à vapeur, où la combustion, phénomène chimique, fait naître des forces que ne sont pas directement empruntées à la nature, oblige à réviser la définition de Monge.

Après que, sous l'influence d'Ampère, la Cinématique eût été constituée en un corps de doctrine indépendant, l'on en vint à ne considérer comme appartenant à une machine que des pièces mobiles ou celles qui supportent ces dernières. C'est Reuleaux (1877) qui énonce avec le plus de précision la définition d'une machine répondant à cette conception :

Une machine est un assemblage de corps résistants, disposés de manière à obliger les forces mécaniques naturelles à agir donnant lieu à des mouvements déterminés.

L'accent est mis ici, sur les agencements de corps résistants et sur les mouvements de ces corps, c'est-à-dire, en termes modernes, sur les mécanismes.

Les conceptions d'Ampère avaient orienté nombre de mécaniciens vers l'analyse des mécanismes, dans l'espoir de pouvoir les décrire tous par la combinaison d'un petit nombre d'éléments simples, et Reuleaux, portant à son paroxysme cet esprit analytico-synthétiseur, construisait une théorie *déductive* des mécanismes, et les représentait par un symbolisme compliqué, qui se révéla d'une parfaite inutilité.

On voit ainsi la définition d'une machine évoluer au gré des conceptions scientifiques et techniques qui se sont succédé au cours du temps.

Vingt ans plus tard, Maurice d'Ocagne, découvrant la belle collection de machines à calculer du Conservatoire National des Arts et Métiers et voulant en donner une description rationnelle, s'apercevait que la structure de ces machines les apparentait plus aux êtres vivants qu'aux machines généralement désignées de ce nom à l'époque. Pour caractériser l'esprit de son étude, il ne trouvait de meilleur terme que celui d'«anatomie comparée des machines à calculer» ; et, en 1905, Kœnigs, ajoutant l'image de la physiologie à celle de l'anatomie disait :

Le machinisme est une véritable zoologie artificielle où le créateur est l'homme lui-même, guidé par une large et mystérieuse intuition.

Il restait à débarrasser ces définitions d'une machine de ce qu'elles gardaient de poésie et de métaphysique. Nous l'avons tenté, et avons proposé, en 1938, la définition générale suivante, que nous pensons qui reste cantonnée dans le domaine de la pensée scientifique :

Une machine est un ensemble d'êtres inanimés — ou même, exceptionnellement, animés — capable de remplacer l'homme dans l'exécution d'un ensemble d'opérations proposé par l'homme.

On s'assure aisément que cette définition couvre aussi bien les machines de force, la machine à vapeur qui a remplacé une chiourne de galériens, que les machines mathématiques, qui remplacent, chacune, quelques centaines de calculateurs.

Elle réserve la différence séparant une machine et un instrument d'observation ou de mesure, qui affine la sensibilité des sens de l'homme mais ne les remplace pas : un télescope est un instrument, l'équatorial qui le supporte est une machine.

Au sens que nous venons de lui donner, le terme de machine ne saurait s'appliquer à un être vivant ou même à un organe d'être vivant ; mais une comparaison peut être établie entre organes vivants et organes de machines.

On peut tout d'abord, si la comparaison y conduit et si on le juge utile, formuler des propositions plus abstraites que celles qui expriment les phénomènes biologiques et celles qui expriment les phénomènes mécaniques, et qui symbolisent à la fois les uns et les autres. Si ces propositions définissent une catégorie d'êtres abstraits — comme il se rencontre presque toujours — on a fait entrer machines et êtres vivants dans cette catégorie. On applique là une méthode de raisonnement courante dans les sciences, et qui a été formulée par divers auteurs à l'usage des mathématiciens. Nous empruntons à A.R. Schweitzer une expression de cette méthode qui nous paraît s'appliquer telle quelle à toutes les sciences :

L'existence de ressemblances entre des termes donnés implique l'existence d'un terme général qui existe sous les termes particuliers et les unifie du point de vue de leurs ressemblances.

A.R. Schweitzer l'appelle le *principe de comparaison*. Ce principe exprime le moyen par lequel on gagne un degré dans l'ascension de la pyramide de la gauche de nos schémas ; mais il ne faudrait pas qu'il dissimule ce fait important — sur lequel on voudra bien nous accorder d'insister à nouveau — que l'on ne remplace un objet par un symbole qu'en le dépouillant de quelques-uns de ses attributs essentiels.

Il semble que c'est l'application du principe de comparaison combinée avec l'oubli de cette remarque qui est à la base de l'impression de quelque mystère et d'une sorte de malaise logique, qui se dégage parfois de ce qu'on a pu lire jusqu'à présent sur la cybernétique. Traduire en termes de biologie, par exemple, la méthode de régulation qui consiste à déterminer à chaque instant le débit d'énergie à fournir à une machine au moyen d'un mécanisme sensible à la différence entre la mesure de l'effet produit par la machine et celle de l'effet que l'on désire qu'elle produise n'apprend rien aux biologistes : mais appeler *feed-back* les parties du système nerveux qui assurent de cette façon la régulation des mouvements, c'est appliquer le principe de comparaison de Schweitzer en laissant croire que les *feed-back* biologiques sont intégrés à la catégorie des *feed-back* de machines, alors que l'on crée une catégorie nouvelle, dont la définition ne peut comprendre que ce que l'on sait être commun aux organes de la régulation des

mouvements des êtres vivants et aux feed-back de machines ; et c'est laisser croire encore que la théorie moderne des feed-back est applicable aux phénomènes biologiques — ce qui est presque l'erreur d'Haeviside à propos des grandeurs représentables par des vecteurs.

L'application correcte du principe de comparaison demande de remarquer que ces traits communs aux organes de la régulation des mouvements des êtres vivants et aux feed-back des machines se réduisent à ceci : pouvoir comparer à chaque instant l'effet produit et l'effet désiré et pouvoir faire servir le résultat de la comparaison de la détermination de l'action du feed-back destiné à produire l'effet désiré ; dans les feed-back de machines l'effet désiré, l'effet produit et la cause de ces effets sont représentables par les mesures de certaines grandeurs ; on ignore s'il en est toujours ainsi en biologie, et si les grandeurs biologiques que l'on sait définir en cette circonstance suivant des lois exprimables par les mathématiques actuellement connues : il paraît donc prématuré de songer à aborder l'étude de la régulation des mouvements en biologie par une théorie mathématique des feed-back mécaniques, quelque générale que soit cette théorie.

Revenons au point de vue général. Le principe de comparaison permet de construire des symboles de plus en plus abstraits dont les domaines, de plus en plus vastes, contiennent, chacun, le précédent. La comparaison des machines et des êtres vivants n'échappe pas à cette façon de procéder. Une terminologie parfaite voudrait que l'on donnât un nom particulier à chacun de ces symboles. Or le bref historique du mot machine que nous avons tracé montre que, différemment, la définition de ce terme a été modifiée au cours du temps, devenant plus abstraite et son domaine, plus vaste, chaque fois qu'il a été justifié de le faire.

Cet argument, auquel s'ajoute l'emploi de plus en plus courant du mot machine ou de mots qui sont grammaticalement liés pour caractériser des phénomènes biologiques, nous paraît justifier d'étendre une fois encore le sens du mot machine, plutôt que d'imaginer un terme nouveau.

Ainsi est-on conduit à la réponse qu'appelle la question posée par M. Lichnerowicz, et se marque toute l'importance de cette question.

Dans la définition d'une machine à laquelle nous sommes parvenus, un premier attribut, être construit par l'homme, n'appartient pas à des organes d'êtres vivants ; il ne peut donc appartenir à la définition plus générale que nous avons dessein d'élaborer. Le second, par contre, être destiné à réaliser des opérations définies, appartient déjà à certains organes du corps des animaux et peut appartenir à d'autres : il doit donc faire partie de la nouvelle définition d'une machine. Le troisième est que les opérations qu'effectue une machine sont choisies par l'homme ; il ne s'applique pas aux organes du corps des animaux ; mais

comme on doit entendre, jusqu'à plus ample informé, que ce choix est le fait de l'esprit de l'homme, dire *a priori* si cette condition est satisfaite ou non par les organes du corps humain constitue une prise de position métaphysique, que la science se doit d'éviter. De toute façon, il faut s'arrêter à la définition générale d'une machine énoncée ci-après :

*Une machine est un ensemble d'éléments matériels agencés de manière à assurer l'exécution d'une opération définie.*

Le mot opération est pris ici dans son acception la plus large : il exprime que quelque chose a gagné ou perdu quelque attribut.

Pour distinguer, quand il sera utile, les machines constituées par des organes d'êtres vivants de celles qui sont construites par l'homme, on appellera les premières des *machines naturelles*, les secondes des *machines artificielles* et l'on peut convenir que l'absence de qualificatif signifie machines artificielles, c'est-à-dire machines au sens ancien.

L'opération logique que nous venons de faire en construisant une nouvelle définition du mot machine montre clairement que le principe de comparaison de Schweitzer ne peut servir qu'à une hiérarchisation correcte de connaissances scientifiques, mais qu'il est incapable de faire surgir des connaissances nouvelles. Ce n'est pas une méthode de découverte, mais seulement d'exposition. Avoir cru le contraire est la raison de ce malaise que donne souvent la littérature cybernétique, et que nous avons essayé de préciser à propos des feed-back.

Vouloir faire servir les connaissances acquises à des découvertes ou des inventions nouvelles n'est point, certes, le point critiqué ; c'est par ce moyen que maint progrès a été fait dans la science et que sont nées la plupart des techniques, sinon toutes. L'erreur de méthode est seulement de croire qu'une similitude quelle qu'elle soit, en entraînant d'autres, et que la description mathématique de certaines machines atteignant un but doit être celle de toutes les machines qui atteignent ce but, ou quelque autre, voisin. (Sans doute la place privilégiée que l'on a faite aux mathématiques parmi les sciences et dans la formation des jeunes savants et techniciens en est-elle cause en grande partie). Pour assurer la route, il convient donc de chercher un énoncé précis de la méthode de découverte fondée sur la comparaison des organes de machines et des organes d'êtres vivants, et qui en fasse apparaître la portée et les limites.

L'extrême généralité attribuée à la signification du mot machine exige, en contrepartie, de subdiviser l'ensemble des machines en sous-ensembles, en classes, définies, chacune, par l'opération particulière effectuée par cette classe de machine. On donne à la description de cette opération l'attribut de finalité qui est contenu dans la définition générale d'une machine, en disant que cette opération est la *fonction mécanique* de la classe de machines considérée.

Une machine est constituée d'organes qui exécutent, chacun, une opération définie avec précision ; on dira encore que cette opération est la *fonction mécanique* de l'organe considéré ; et l'on accordera de négliger le qualificatif de mécanique s'il n'y a pas d'ambiguïté. Les fonctions des organes d'une machine seront appelées, enfin, les *fonctions composantes* de la fonction de la machine, ou plus brièvement, de la machine.

La notion de fonction mécanique permet d'énoncer clairement deux problèmes généraux auxquels se ramènent les problèmes particuliers que l'on peut se proposer dans l'étude des machines.

1 — *On considère toutes les machines d'une même classe (c'est-à-dire qui tenent au même but), et l'on se propose : principalement, de chercher de quelles fonctions mécaniques composantes elles sont constituées, et, subsidiairement, de décrire les organes qui remplissent ces fonctions ;*

2 — *On considère l'un des buts, bien déterminés, que l'on peut assigner à l'action d'un être, et l'on se propose de chercher s'il existe un ensemble de fonctions mécaniques, et lesquelles, qui puissent composer une machine capable d'atteindre ce but, et auxquelles la technique soit en mesure de faire correspondre des organes les réalisant correctement.*

Ces problèmes correspondent aux deux modes déjà dits de l'activité humaine : connaître et créer. Ce que la forme sous laquelle ils sont énoncés apport de nouveau, pensons-nous, est la primauté donnée, de façon systématique, à la fonction sur l'organe, tant pour les machines naturelles que pour les machines artificielles, sans réduire cependant la mécanique — même au sans élargi d'étude des machines naturelles et artificielles — à des théorèmes d'existence, ni oublier qu'une machine est un ensemble d'éléments *matériels*.

L'analyse des fonctions, qui constitue le premier problème, peut être poursuivie dans le détail, ainsi que l'analyse des organes, pour les machines artificielles. Pour les êtres vivants, leur physiologie et leur anatomie — termes qui en désignent les analyses fonctionnelle et structurale lorsqu'on suppose qu'ils puissent être des machines — doivent être considérées encore comme mal connues, notamment celles du système nerveux, malgré les très beaux travaux achevés ou en cours. Quant au second problème, la construction d'une machine pour un but donné, il ne s'applique qu'à des machines artificielles ; l'homme n'est pas encore capable de faire la synthèse des êtres vivants, à peine peut-il provoquer une modification lente de certains de leurs organes. C'est donc la connaissance des machines artificielles que l'on peut espérer faire servir à la connaissance des êtres vivants, plutôt que l'inverse.

On y parvient par l'application d'un principe qui peut s'énoncer comme suit :

*Dans une classe de machines, si une machine présente en certaines de ses parties la même organisation fonctionnelle qu'une autre machine, on peut présumer que cette similitude s'étend à d'autres parties des deux machines.*

On pourrait appeler ce mode de raisonnement la *méthode d'analyse*. Elle complète, dans le sens de l'action, ce qu'apporte pour l'organisation de la connaissance le principe de comparaison de Schweitzer.

Comme nous l'avons déjà remarqué, c'est des machines artificielles vers les machines naturelles que s'effectuera le plus souvent l'extension de la similitude partielle constatée. Rappelons à ce propos, pour préciser la terminologie, qu'une machine artificielle construite en vue d'appliquer la méthode d'analogie est un *modèle mécanique*. Il est clair qu'on attribuera initialement à un modèle mécanique le plus grand nombre possible des caractères connus de la machine naturelle à laquelle il doit servir de terme de comparaison : l'analogie pourra atteindre ainsi des fonctions composantes «de détail» — en empruntant à la langue oucrante une expression qui demande à être précisée — et parfois même la structure organique.

Le plus ancien modèle qui ait été construit pour des fonctions du système nerveux est sans doute le nerf artificiel de Ralph Lillie (1922).

Le système nerveux, rappelons-le, est formé de cellules appelées *neurones*, constituées, chacune, par un *noyau* d'où s'échappent un ou deux filaments très fins, les *axones*, qui se terminent par des ramifications en forme d'arborisation touffue, appelées *dendrites*. L'un au moins des axones est entouré d'un manchon constitué par des cellules cylindriques gonflées d'une substance grasse, la *myéline*. Les neurones sont *irritables* : de façon précise, quand un neurone subit en un point une action extérieure, physique ou chimique, il est parcouru, dans les deux sens à partir du point d'excitation, par un train d'ondes électriques, que l'on appelle souvent encore comme autrefois, l'*influx nerveux*, ou bien, en termes plus modernes, une *volée d'impulsions*.

Les physiologistes s'accordent à attribuer au neurone, pour fonction essentielle, de transmettre l'influx nerveux du point d'excitation aux extrémités des dendrites. L'influx provoque en ces points des effets qui varient selon le milieu anatomique qui s'y trouve.

Il y a trente ans, l'Américain Ralph Lillie a construit un modèle mécanique de nerf, formé d'un fil de fer pour activé par l'action d'acide nitrique concentré, et plongé ensuite dans un bain d'acide nitrique dilué. Une excitation électrique ou même le contact d'une pointe métallique provoquent dans le fil une onde électrique de même forme qu'une onde d'influx nerveux. De plus, si on place le fil dans l'axe d'un tube de verre, comme l'axone d'un nerf se trouve placé dans le tube formé par les manchons de myéline, on constate que la vitesse de trans-

mission de l'onde électrique dans le fil de fer de Lillie dépend du diamètre du tube de verre selon une loi de même structure mathématique que celle qui relie la vitesse de l'onde électrique dans l'axone d'un nerf vivant au diamètre du manchon de myéline. Enfin, le nerf artificiel possède même cette curieuse propriété du nerf naturel que, après avoir subi une excitation, il reste insensible pendant une brève durée que l'on appelle la *période réfractaire*.

Ces diverses propriétés du nerf de Lillie ont conduit les physiologistes à admettre que la transmission de l'influx nerveux est un phénomène physico-chimique, où n'intervient aucune influence extérieure au nerf autre que l'excitation initiale. En particulier, ce modèle mécanique a affirmé la conviction que l'on pouvait écarter toute explication du fonctionnement d'un nerf faisant appel à des influences du genre de celles qu'évoque généralement le mot «vital».

Voici encore un remarquable exemple de raisonnement analogique, que M. Norbert Wiener rapporte avec plus de détails dans *Cybernetics* (p. 31 et 162). Le neurologue Mac Culloch a construit une machine à lire pour aveugles, qui explore au moyen de cellules photoélectriques le texte imprimé et le traduit en sons coordonnés, que l'aveugle apprend à interpréter comme il le fait pour les sensations tactiles que lui donne, au bout des doigts, une ligne imprimée en relief dans le système Braille. Un jour que M. McCulloch présentait le schéma de connexions du dispositif reliant les cellules photoélectriques à l'appareil sonore, le Dr von Bonin de New-York, s'écria :

N'est-ce point là le diagramme de la 4<sup>e</sup> couche des lobes optiques ?

De l'analogie des schémas, on conclut à l'analogie de fonctionnement. Il semble expérimentalement établi, maintenant, que cette région du cerveau fonctionne bien comme la machine. Et, l'analogie s'élargissant, on en vient à considérer que le système formé par l'œil, les lobes optiques et le nerf optique qui les relie à l'œil, fonctionnent à la manière d'un équipement de télévision où une image est explorée par le tube cathodique émetteur, analogue de l'œil, transmise point par point sous la forme d'ondes électriques suivant un canal unique, fil ou milieu supportant les ondes herziennes, analogue du nerf optique, reconstitué enfin, par le tube récepteur, analogue des lobes optiques.

Cet exemple, comporte application du principe de comparaison et de la méthode d'analogie, et fait apparaître leurs différences et leurs rôles respectifs. La remarque du Dr von Bonin, représentation par le même schéma de la structure d'un organe de l'encéphale et de la structure d'un organe de machine artificielle est une application du principe de comparaison ; c'est la même opération logique, par exemple, que celle que fit Maxwell élaborant la théorie électro-magnétique de la lumière ; dans le premier cas, les deux êtres groupés en une même caté-

gorie sont matériels et leur symbole commun appartient à la géométrie des schémas électriques, qui est une manière d'*analysis situs* ; dans le second cas, les deux êtres sont des phénomènes, et leur symbole commun, un système d'équations relevant du calcul intégral et différentiel. Après la remarque de M. von Bonin, présumer que la similitude structurale des organes s'accompagne d'une similitude de fonctionnement, est une application de la méthode d'analogie ; la présomption était d'autant plus près d'être confirmée que les deux organes possédaient d'autres similitudes partielles, que l'on n'a pas explicitées, notamment d'appartenir à un système assurant la transmission, par la voie d'un canal unique, d'une image couvrant une certaine surface et explorée point par point, c'est-à-dire, en termes de physique, par petites aires, définies, dans la machine de McCulloch, par le déplacement du texte lu mécaniquement devant l'optique qui en forme l'image sur les cellules photoélectriques, et, dans l'œil humain, par les dimensions des éléments sensibles rétinien, cônes et bâtonnets. Le raisonnement analogique, au fond, a été efficace parce que les deux machines, celle de McCulloch et celle qui va de l'œil aux lobes optiques, appartiennent à la même classe de machines, dont l'objet est de transmettre par une voie unique une image couvrant une surface d'aire non négligeable ; c'est après avoir construit et défini, de façon plus ou moins explicite et, peut-être, consciente, cette classe de machines que des analogies fécondes ont pu être recherchées entre les fonctions composantes de la vision humaine et celles d'une machine de télévision. Et l'on notera encore combien cet exemple montre de façon saisissante que l'analogie doit être appliquée principalement à des similitudes de fonctions, et subsidiairement à des similitudes d'organes.

Il est à peine besoin de faire remarquer que la méthode d'analogie ne donne qu'une présomption du fonctionnement d'un organe, qui doit être soumise à l'expérimentation pour devenir, ou non, une certitude.

Mais il ne sera pas inutile, sans doute, de s'arrêter sur un trait de l'application de cette méthode aux recherches biologiques, notamment à celles qui concernent le système nerveux, qui, sans être caractéristique de cette catégorie d'applications, semble prendre, à leur sujet, une importance particulière.

Le modèle de nerf artificiel de Ralph Lillie a conduit à considérer un nerf naturel comme un système dont le fonctionnement s'explique entièrement par les lois de la mécanique (physique et chimie incluses). Avec moins de netteté, peut-être, l'explication de la transmission de l'image rétinienne donnée par analogie avec le fonctionnement de la machine de Mac Culloch est encore marquée de ce caractère.

Afin de s'exprimer avec plus de précision, on peut remarquer d'abord que les machines artificielles, qui sont faites par l'homme pour l'homme, se répartissent en deux catégories : la première contient

les machines qui, pour atteindre leur but, doivent être constamment soumises à l'action d'un homme, à l'exemple d'une voiture automobile ; la seconde, celles où l'intervention de l'homme se borne à leur indiquer le but qu'elles doivent atteindre ; c'est le cas, par exemple d'un pilote mécanique d'avion. On appelle les secondes des *machines automatiques*. On pourrait appeler les premières des *machines guidées*.

L'exemple d'un avion ou d'une fusée guidés par un radar et un poste de calcul mécanique montre qu'une machine peut être guidée par une autre machine. Très couramment, un organe d'une machine et guidé par d'autres organes de cette machine. De même, certaines parties du système nerveux peuvent être guidées par d'autres parties du système nerveux, notamment par le cerveau ; par exemple, dans le maintien de l'équilibre en station debout, qui est assuré automatiquement par le cervelet, ce dernier reçoit du cerveau l'ordre permanent de maintenir cette posture.

Une explication mécanique des phénomènes biologiques, dans tous les cas où elle a été confirmée par l'expérience, applique le principe ci-après plus restreint que la seule idée d'une explication mécanique, plus suggestif aussi et qui exprime, en quelque sorte, une orientation de la pensée :

*Dans une machine naturelle, si un guidage n'est pas nécessaire, il n'existe pas.*

On peut l'appeler le principe du *maximum d'automatisation*.

Il se rattache immédiatement au principe d'économie de matière que nous avons déjà rappelé et qui a souvent comme inspiré la structure des organes des êtres vivants dont une fonction mécanique est de résister à des efforts ou d'en exercer.

Dans la langue courante, on a tendance à limiter l'application du qualificatif automatique aux fonctions mécaniques qui semblent requérir l'intervention de facultés intellectuelles, et, nous avons choisi de la sorte les exemples cités plus haut ; mais, voulant décrire l'ensemble des machines artificielles, on s'apercevrait que les transitions sont à peine sensibles des machines les plus « intelligentes » à celles qui le sont le moins, et que les termes d'automatisme et de guidage doivent être pris au sens le plus large que leur attribuent les définitions que nous en avons données.

Dans les machines, au temps où ce mot désignait seulement les machines de force, générateurs d'énergie, moteurs, engins de manutention, matériel d'artillerie, etc... on distinguait la machine et le régulateur. C'est, semble-t-il, à l'anecdote de James Watt imaginant, encore enfant, un système de cordelettes réglant à sa place l'ouverture des robinets de la pompe à vapeur dont il avait la charge et lui donnant ainsi plus de temps pour jouer qu'il faut faire remonter cette distinction entre la machine et le régulateur, ce dernier effectuant un travail plus in-

telligent que celui de la machine elle-même. Le régulateur à boules n'a rien apporté de nouveau concernant la notion même de régulateur ; il est une adaptation de l'idée première de Watt au cas où la charge de la machine (en termes d'exploitation industrielle), la résistance (en termes de théorie de la régulation), varie de façon continue avec le temps, ce qui n'est pas le cas d'une pompe. Il conduit, toutefois, à cette constatation technique que la régulation en efforts variables est mieux assurée par l'action d'un organe automatique que par l'action de l'homme ; cela tient sans doute à la difficulté, pour l'esprit humain, de maintenir longuement une même intensité d'attention. Un exemple comparable au précédent se rencontre dans la régulation du tir d'artillerie : lorsque, à bord d'un bateau, la position du but était donnée, à instants un peu espacés, par les points, des hommes visant aux télémètres, l'officier de tir, qui recevait ces informations par téléinscription dans le poste central, les moyennait et les extrapolait par une opération de jugement dont la qualité tenait à son expérience personnelle, et dictait au téléphone ou au tube acoustique les coordonnées de pointage des pièces. En de nombreux points du système de communication qui reliait les télémétristes, les servants des pièces et l'officier de tir se trouvaient des relais humains, constitués par un matelot qui observait un cadran sur lequel pouvaient se déplacer une aiguille noire et une aiguille rouge et qui, chaque fois que l'aiguille rouge faisait un bond, lui superposait rapidement l'aiguille noire, en agissant sur un volant ou une manivelle qui entraînait divers organes du système de calcul ou de transmissions ; les télémètres à lecture continue, notamment les radars dont la grande vitesse que peuvent atteindre les avions de combat ou les fusées a fait naître la nécessité, ont rendu insuffisante la transmission par recopiage, et impossible le calcul des éléments de pointage par l'officier de tir dans le temps dont il pourrait disposer de l'instant où il recevrait les données de ce calcul à l'instant où l'objectif serait hors de portée. C'est encore la considération d'une charge variable de façon continue dans le temps et à laquelle la machine doit s'adapter dans une durée en harmonie avec la vitesse de ces variations qui a contraint de remplacer l'action humaine par celle de machines automatiques.

Ce second exemple montre en outre que le problème de la régulation des machines conduit à construire des machines capables de remplacer l'homme dans des opérations jusqu'à présent considérées comme le propre de l'esprit et de plus en plus complexes : c'est en ce sens que ces machines apparaissent comme *de plus en plus automatiques*.

Il n'est pas sans intérêt, toutefois, de noter, sur cet exemple, que l'opération de moyenne — on dit maintenant *lissage* — et d'extrapolation, autrefois dévolue à l'intelligence de l'officier de tir, n'est pas encore convenablement mécanisée.

La fonction de régulation d'une machine est composée d'une

*fonction logique*, qui, à partir d'informations sur la charge et les moyens de la machine, en élabore le comportement par application des règles que conserve en lui-même l'organe de régulation, et de *fonctions de transmission*, qui se répartissent en trois catégories : *transmission d'informations externes* et *d'informations internes* qui apportent à l'organe de logique des informations relatives, les premières à l'action du milieu extérieur sur la machine, que l'on peut appeler la *charge* de la machine, en donnant à ce terme soit son sens technique usuel soit un sens figuré, selon le type de machines auxquelles on l'applique, et, les secondes, à l'état des organes de la machine, qui détermine les *moyens* que la machine peut mettre en œuvre, enfin, *transmissions motrices* qui transmettent aux organes moteurs les commandes élaborées par la fonction logique.

Dans les machines de force de type ancien, les organes d'information interne s'identifient aux dispositifs de sécurité qui évitent que la machine ne soit entraînée à des efforts plus grands que ceux que lui permettent ses moyens et qui menacent son existence. Ils manquent parfois : il en est ainsi dans les machines à régulateur du genre de celui de Watt, où l'information externe est assurée par les engrenages qui font tourner les boules, la transmission motrice par le collier et la tringlerie attachée à ce dernier, et la fonction logique par les boules et la tringlerie motrice, qui constituent dans leur ensemble une machine à calculer analogique (ce dernier mot étant pris au sens qu'on lui donne dans la technique des machines à calculer) capable de déterminer — assez grossièrement, il est vrai — l'ouverture de la vanne d'admission de vapeur en fonction de la puissance demandée à l'arbre de la machine.

On rencontre dans ce régulateur un *cumul de fonctions* : la tringlerie est à la fois composante des organes de calcul par son dessin et organe de transmission motrice par ses propriétés mécaniques, forme géométrique et rigidité. Un tel cumul de fonctions est fréquent dans les machines artificielles ; il est même recherché en vue d'une réduction du nombre des organes ; on en conçoit les multiples avantages. La régulation d'une machine par volant en offre un exemple typique et qui conduit à de nouvelles remarques. Dans le cas le plus fréquent, le volant est fixé sur l'arbre de la machine : les organes de transmission d'informations externes et de transmission motrice sont alors inexistantes. Mais les fonctions elles-mêmes existent ; le volant est influencé immédiatement par les variations de vitesse de l'arbre dues aux variations de la charge, influence qui constitue l'information externe ; et il agit immédiatement sur l'arbre de la machine en augmentant ou diminuant d'une partie de l'énergie cinétique qu'il possède l'énergie transmise à cet arbre par le moteur, action qui constitue la fonction motrice du volant. L'opération logique de régulation ne présente pas nettement, dans cet exemple, l'aspect d'un calcul, mais, par contre, offre celui

d'une action qui s'harmonise de façon continue dans le temps aux variations continues de l'état interne de la machine et de l'état du milieu extérieur par des moyens propres à l'organe de régulation, dont le caractère d'automatisme apparaît ainsi clairement.

L'usage d'incorporer le volant à la machine dans le cas où il y a en outre un régulateur du genre de celui de Watt ou plus compliqué montre que c'est surtout sur la fonction logique que s'est portée l'attention. Dans la terminologie que nous avons adoptée, le régulateur d'une machine fait ou non partie de la machine, selon ce que l'on en convient. Mais, si l'on considère la fonction de régulation elle-même, les régulateurs forment une classe de machines définie, dont on peut se proposer d'étudier les propriétés propres. Ce sont les propriétés du régulateur qui confèrent à la machine, plus ou moins, la qualité d'être automatique. La connaissance de la régulation des machines artificielles paraît donc l'un des fondements de l'application correcte du principe du maximum d'automatisme à l'étude des machines naturelles.

(à suivre)