

*que
sais-je?*

LA CYBERNÉTIQUE

PAR LOUIS COUFFIGNAL



**PRESSES UNIVERSITAIRES
DE FRANCE**

LA CYBERNÉTIQUE

DU MÊME AUTEUR

Les machines à calculer, leur principe, leur évolution, Gauthier-Villars, 1933.

L'analyse mécanique, Gauthier-Villars, 1938.

Les machines à penser, Editions de Minuit, 1948, 2^e éd., 1964.

Information et cybernétique. Les notions de base, Gauthier-Villars, 1958.

Tables de produits de lignes trigonométriques, Gauthier-Villars, 1943.

Résolution numérique des systèmes d'équations linéaires, Gauthier, Villars, 1958 (coll. « Manuels de calculs techniques »).

Les mathématiques utilisables, Gauthier-Villars, 1963 (coll. « Manuels de calculs techniques »).

La pédagogie cybernétique, coll. « Que sais-je ? », Presses Universitaires de France (à paraître).

« QUE SAIS-JE ? »

LE POINT DES CONNAISSANCES ACTUELLES

=====
N° 638
=====

LA
CYBERNÉTIQUE

par

Louis COUFFIGNAL

Inspecteur général de l'Instruction Publique

TROISIÈME ÉDITION



PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

1968

VINGT-HUITIÈME MILLE

Dépôt légal. — 1^{re} édition : 3^e trimestre 1963
3^e édition : 3^e trimestre 1968

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation
réservés pour tous pays

© 1963, *Presses Universitaires de France*

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE

Bien que le mot de « Cybernétique », en son sens actuel, ne date de guère plus de quinze ans, il a déjà pris, dans la littérature technique ou scientifique, dans la presse, et même dans la langue courante, une place importante. Peu de mots, sans doute, ont eu si rapide succès. En suivre l'évolution aidera à le mieux comprendre.

I. — La cybernétique de Wiener

La « cybernétique » est entrée en Europe par le livre de Norbert Wiener : *Cybernetics*, édité à Paris en 1948. Elle est définie « le champ entier de la théorie de la commande et de la communication, tant dans la machine que dans l'animal. »

A noter que le mot « commande » traduit très insuffisamment le mot « control », qui figure dans le texte original. C'est même autour de ce mot que gravitent les doutes et les controverses provoquées par les idées de Wiener.

Plus de la moitié de l'ouvrage de Wiener est consacrée à un exposé de théories de physique mathématique qui, presque toutes, étaient peu connues en Europe, et au développement desquelles N. Wiener et ses élèves avaient grandement contribué. Ce sont : la mécanique statistique de Gibbs, la théorie des séries temporelles, où la contribution de Wiener lui-même est particulièrement importante, la théorie dite « de l'information », de Shannon. Ces théories étaient accompagnées de critiques de

la mécanique classique qui les faisaient apparaître comme la forme dans laquelle devait inévitablement se mouler la conception future des machines. Elles s'exprimaient, tantôt dans une langue de vulgarisation à l'intention d'un public cultivé, tantôt au moyen de mathématiques difficiles, et devaient naturellement séduire des mathématiciens en quête d'interprétation en termes de physique ou de technique de théories conçues dans l'abstrait pur, ainsi que des lecteurs moins avertis prêts à faire confiance à un auteur dont les raisonnements leur restaient inaccessibles.

Les chapitres suivants sont consacrés à décrire les ressemblances qui se rencontrent entre ces notions et des notions relevant de la physiologie, de la psychologie, de la psychiatrie, de la sociologie. Le titre de chacun de ces chapitres dit assez clairement quel en est le propos : « Les machines à calculer et le système nerveux » ; « La *Gestalt* et les universaux » ; « La cybernétique et la psychopathologie » ; « Information, langage et société ».

Un aussi vaste sujet ne s'épuise pas en quelques chapitres. Ce livre ne pouvait contenir le développement de « la » théorie de la commande et de la communication « dans l'animal », mais seulement une esquisse des contours « du champ entier » de cette théorie, les exemples montrant qu'il était rationnel de donner existence à ce « champ » et, partant, à la cybernétique.

II. — La pensée cybernétique dans les sciences exactes et la construction mécanique

La première partie de l'ouvrage de Wiener propose comme d'esprit cybernétique : la mécanique statistique, la théorie de l'information de Shannon, la théorie de la rétroaction (*feedback*) en mécanique.

C'est grouper sous un même vocable des doctrines déjà bien assises et qui, chacune dans son domaine, avaient fait leurs preuves.

Ces doctrines ont poursuivi leur développement normal par l'effort des spécialistes et trouvé des applications nouvelles, souvent spectaculaires, tels le pilotage automatique des avions, la télécommande des fusées, la théorie de la mesure d'une grandeur physique, de Denis Gabor et Léon Brillouin.

III. — La pensée cybernétique dans les sciences de l'être vivant

Dans *Cybernetics*, il apparaît clairement que les théories physicomathématiques du début de l'ouvrage étaient destinées à expliquer les phénomènes biologiques, psychobiologiques et même psychologiques que l'on observe dans l'être vivant, et aussi les phénomènes de comportement social. L'explication par une théorie consiste, dans l'ouvrage, à établir des analogies entre les êtres en observation et les concepts que concerne la théorie. Par exemple :

— Structure en circuits fermés d'éléments du système nerveux humain et des mémoires de certaines machines à calculer, pour conclure que ces circuits du système nerveux sont le siège de la mémoire ;

— Structure du plancher du 4^e ventricule du cerveau et d'un appareil propre à reconnaître la forme des lettres quels qu'en soient l'œil et les dimensions, pour conclure une façon dont se créerait le concept de « forme » dans le cerveau (analogie von Bonin-Mac Culloch) ;

— Guérisons obtenues par électro-choc et remise en état de machines à calculer par des impulsions envoyées au hasard, pour conclure à la similitude des circuits des machines à calculer et des circuits du cerveau.

De nouvelles analogies entre mécanismes électroniques et structures cérébrales ont été signalées au Congrès de 1951 sur : « Les machines à calculer et la pensée humaine », où se trouvaient réunis presque tous les savants, de disciplines diverses, qui avaient collaboré avec Wiener à la première élaboration de la cybernétique. Dans le même temps, Mac Culloch et W. Pitts définissaient un système d'éléments mécaniques — dans un symbolisme voisin de celui de la théorie mathématique des réseaux électriques — capable de réaliser les opérations du raisonnement. Plus tard, Mac Culloch et ses élèves ont cherché à déterminer expérimentalement si la transmission nerveuse vérifiait la théorie de l'information de Shannon. Et Grey Walter et Ross Ashby construisaient, l'un ses « tortues », l'autre l'homéostat, cependant que Mac Kay essayait d'étendre la théorie de l'information aux phénomènes psychologiques, et Mandelbrot à l'étude de la structure des langages. Enfin, on rattache à la cybernétique les modes d'organisation du travail généralement groupés sous le nom d'« automation », dont les répercussions sociales sont profondes.

IV. — La pensée cybernétique et la métaphysique

Certains auteurs en vinrent même à mettre sous le couvert de la cybernétique toute argumentation où quelques ressemblances partielles entre systèmes complexes suggéraient d'appliquer des raisonnements qui auraient pu être valables en d'autres circonstances, notamment pour des analogies entre systèmes mécaniques ou entre systèmes mécaniques et systèmes biologiques.

C'est la notion de rétroaction qui en fournit le plus souvent l'occasion. La rétroaction est une notion bien précise dans la technique de la régulation des machines : ayant appliqué à un système mécanique certaines actions physiques calculées de manière à obtenir un effet désiré, et l'imperfection des calculs ou des réalisations matérielles permettant seulement d'obtenir un effet voisin, on mesure l'écart entre l'effet désiré et l'effet obtenu, on calcule quelle modification doivent subir les actions physiques appliquées au système pour corriger cet écart, et on fait agir le système sur lui-même. On peut déceler des « rétroactions » presque dans tous les comportements des êtres vivants, tant physiques que psychologiques.

Et l'on en vint même à trouver des « rétroactions » dans le comportement de la divinité.

V. — Discordances

L'introduction de la cybernétique dans des disciplines de tous ordres s'est faite selon les modes les plus divers, et n'a pas toujours été acceptée sans discussion.

Les ingénieurs, et notamment les spécialistes de machines automatiques, ont trouvé dans la première partie du livre de Wiener confirmation d'une évolution vers l'abstraction de l'exposé de leur technique, et tenté soit de réduire la cybernétique à une théorie des mécanismes automatiques, soit, contestant son originalité, de demander que l'on s'en tienne au terme classique d'« automatisme ». Ils ont souvent pris une position semblable au regard du terme d'« automation ».

Les opinions des biologistes sont moins uniformes. La pauvreté des mécanismes construits par l'homme au regard de ceux que l'anatomie a décelés dans un être vivant et la multiplicité des « rétroactions » déjà caractérisées dans la physiologie des organes vivants firent accueillir avec réserves sinon avec scepticisme les offres de la mécanique abstraite d'expliquer les phénomènes de la vie. Parallèlement, une

interprétation trop stricte des idées de l'ordre de la philosophie que l'on croit discerner dans le livre de Wiener a conduit certains biologistes à penser que les cybernéticiens voulaient établir que la pensée n'était, dans sa totalité, que le résultat du fonctionnement de systèmes mécaniques ; et d'autres biologistes ont trouvé dans la cybernétique des arguments nouveaux pour l'affirmer. Un débat déjà ancien s'est ranimé ainsi dans une terminologie nouvelle et des livres entiers ont été écrits pour prouver, tantôt par la mécanique, tantôt par la psychologie — une psychologie tout empreinte de métaphysique — qu'il était impossible de construire un mécanisme doué d'imagination créatrice... Il est vrai que la confusion involontaire qui est souvent faite, notamment dans les ouvrages de vulgarisation, et même parfois consciemment pour des fins publicitaires, entre les termes de « servo-mécanisme » et de « cerveau mécanique » peut induire en erreur. Cependant, d'autres biologistes construisaient des modèles mécaniques de certains comportements d'êtres vivants, comportements psychosomatiques, comme dans l'homéostat de Ross Ashby, ou comportements sociaux, comme dans les animaux artificiels de Grey Walter, et plaçaient leurs travaux, d'esprit essentiellement biologique, sous l'égide de la cybernétique.

Quant à l'extension de comportements mécanisables à la pensée pure ou à la pensée mystique, elle rencontra une opposition unanime.

De plus, les exemples et les arguments proposés par N. Wiener étaient mis en doute ou réfutés les uns après les autres. Les neurologues ne purent répéter les expériences décrites par Wiener, et le récit qui présentait l'analogie Mac Cullogh-von Bonin dut être considéré comme apocryphe. L'application de la théorie de l'information à la démonstration que le système de numération binaire est le plus avantageux n'atteignait pas la distinction nécessaire entre l'opération de mise en mémoire d'une suite de nombres entiers, où le système binaire permet une très grande réduction du matériel nécessaire (60 % par rapport au système décimal) et l'opération de symbolisation d'un nombre isolément où le système binaire est le moins maniable. Quant à la critique de la mécanique classique, qui aurait principalement conduit aux amusettes que seraient les robots à horlogerie de Vaucanson et de ses contemporains, elle s'effondre devant la découverte faite par Liaigre, dans la littérature de l'époque, que Vaucanson construisit ses automates en vue d'études de biologie, comme le font les plus cybernéticiens des biologistes contemporains, Grey Walter, Ross Ashby, Sauvan et d'autres et devant la constatation que

ce que la plupart de nos contemporains attribuent en totale propriété à la cybernétique, ce sont de grands joujoux à servo-mécanismes, tel celui qui conduisit les visiteurs en voiture dans la Foire de Paris, ou le groupe de musiciens qui divertit naguère le thé de 5 heures dans un Grand Magasin. Et le second ouvrage de N. Wiener sur la cybernétique : *The human use of the human beings (L'usage que fait l'homme des êtres humains)*, n'apportait pas l'édifice de raison que le premier promet sans le construire.

Le lecteur curieux ou passionné qui voudra lire les quelques milliers d'ouvrages ou d'articles écrits jusqu'à présent sur la cybernétique (non compris les articles parus dans la grande presse, quotidienne ou hebdomadaire) devra donc rester en garde contre les enthousiasmes et les critiques excessifs.

VI. — Études doctrinales récentes

Après le Congrès international de Paris, en 1951, où les fondateurs de la Cybernétique vinrent présenter les divers aspects de la doctrine en cours de croissance, et éveillèrent de grands espoirs, un autre Congrès international, à Namur, en 1956, prenait pour thème directeur une vaste consultation, en vue d'une mise au point de l'intérêt porté à la question. Près de neuf cents congressistes, venus de plus de vingt nations, qui intervinrent presque tous dans les débats, témoignèrent qu'un mode de penser particulier se constituait bien en cette époque, et que le terme de « cybernétique » serait son étendard.

La constitution d'une « Association internationale de cybernétique » sanctionnait ces débats ; on lui donnait pour but l'organisation et la coordination d'études de cybernétique, dans l'esprit d'objectivité qui est celui des sociétés savantes dans tous les pays. Près de mille membres inscrits en un an et répartis dans trente-deux pays font la preuve que la cybernétique est considérée comme chose sérieuse, en l'utilité de laquelle on a foi.

En septembre 1957, un symposium se réunissait à Zurich, sous la présidence du P^r Gonseth, pour étudier les relations entre « Cybernétique et connaissance ».

En juillet 1962, un autre symposium de confrontation de doctrines avait lieu à Royaumont, sous l'égide de la Société des Colloques philosophiques internationaux avec la collaboration de l'Association internationale de Cybernétique, sur « l'Information dans les Sciences ». On y retrouvait Nor-

bert Wiener, entouré de savants et de philosophes de nombreux pays.

Enfin se créaient l'« Association internationale de Médecine cybernétique », l'« Association de Pédagogie cybernétique » et la « Société française de cybernétique ».

Ces études doctrinales marquent à la fois le souci des penseurs du monde entier de préciser la nature de cet être nouveau que Norbert Wiener a fait naître il y a vingt ans dans un élan d'imagination créatrice. Elles marquent aussi la vitalité des idées qui s'y rattachent, et le souci d'en tirer profit.

CHAPITRE II

LES NOTIONS DE BASE

I. — Situation de départ

Le Pr Gonseth a montré qu'une action de la pensée, un raisonnement, s'applique à une « situation de départ », qui comprend en particulier ce que l'on sait de l'objet sur lequel on raisonne, mais qui ne peut être décrit au moyen des termes du raisonnement lui-même.

Ce sont ces notions que l'on se propose de grouper dans cette section, en faisant apparaître des liens logiques immédiats qui existent entre elles.

1. **La cybernétique de Wiener.** — La cybernétique de Wiener a été généralement comprise comme un moyen d'étendre les théories valables pour les mouvements des organes des machines au comportement des êtres vivants, notamment des êtres humains, et aux sociétés d'êtres vivants, plus particulièrement aux sociétés humaines. La notion de « commande », valable pour des organes de machines, devient celle du « commandement » lorsqu'il s'agit de sociétés humaines, avec toutes ses variantes et ses nuances, notamment celle que désigne le terme de « gouvernement ». Les raisonnements de la cybernétique s'apparentaient dès lors étroitement

à ceux que l'on appelle, en mathématiques et en physique, une « généralisation ». Mais, dans l'état actuel des connaissances, on attribue à l'être humain des caractères qui lui sont propres, que ne possèdent pas les autres êtres vivants ni les machines, notamment la faculté particulièrement développée de construire des images abstraites du monde réel qui l'entoure, et d'organiser son action par le jeu de ces images.

Il est donc à craindre que, partant des machines, on n'atteigne en l'homme que ce qui est mécanique. Affirmer que l'on pourra atteindre l'homme entier est une prise de position métaphysique, qui ne peut être le fondement d'une doctrine ayant souci d'objectivité. Par contre, une étude directe de l'être humain peut conduire à des notions valables aussi pour les machines, à titre de cas particulier.

2. L'analyse de l'action. — Si l'on retient que la commande, ou le commandement, doivent rester des éléments essentiels de cette étude, sauf à perdre tout contact avec la Cybernétique de Wiener, et que ces notions ne s'appliquent qu'à l'exécution d'une action déterminée, on conçoit que l'analyse de l'action rencontre sans doute à quelque moment la cybernétique de Wiener. Enfin, l'emploi si fréquent de l'analogie comme moyen d'argumentation dans *Cybernetics* et dans les écrits des cybernéticiens exige que ce mode de raisonnement soit examiné avec soin et, vraisemblablement, inclus dans le système.

Telle est la situation de départ d'une analyse qui veut caractériser la notion de cybernétique, ses moyens et le champ de ses applications.

3. Caractères de l'étude. — Comme il se présente généralement, les notions qui vont être coordonnées,

précisées ou définies s'éclairent les unes les autres. Le lecteur ne sera donc pas surpris de ne percevoir parfois une notion en toute clarté qu'à l'aide de termes pour l'explication desquels cette même notion est utilisée. C'est ainsi que le professeur qui veut faire assimiler à des étudiants la pensée subtile d'un philosophe use de périphrases, de comparaisons de termes, de rapprochements entre doctrines voisines, ou opposées, et crée en quelque sorte en ses étudiants un *état d'âme* qui leur permette de se pénétrer de la pensée du maître par la lecture de ses œuvres et un effort personnel de compréhension.

Dans ce même esprit, les subdivisions en chapitres doivent être considérées comme d'intérêt plus particulièrement didactique.

Enfin, afin d'éviter dès le départ une équivoque possible, disons que le système de *notions de base* qui va être proposé n'est pas un système d'axiomes d'où l'on déduise une théorie. La suite expliquera pourquoi la cybernétique ne peut pas être une théorie déductive.

II. — L'être humain. Le milieu extérieur

1. **L'être humain.** — La notion de l'*être humain* est prise comme *notion première*.

Il n'est pas utile, pour le moment, d'en tenter une définition formelle ; l'idée que s'en fait chacun est suffisante, même si elle diffère sur quelques points de celle du voisin.

Le *milieu extérieur* à un être humain est constitué par *tout ce qui n'est pas partie de l'être humain*.

Toutefois, les entités transcendantales, telles que la Divinité, ne sont pas comprises sous le terme de « milieu extérieur à l'être humain ».

2. **Action physique.** — On appelle *action physique* d'un être sur un autre une *action au sens de la physique*, ce dernier terme étant pris dans l'acception usuelle la plus générale.

On distinguera en particulier :

— *L'action physique du milieu extérieur sur un être humain*, dont une piqûre, un bruit, un éclair sont des exemples ;

— *L'action physique de l'être humain sur le milieu extérieur*, dont une poussée sur un corps mobile, un cri, le tracé d'un dessin sont des exemples.

3. **Environnement.** — L'environnement d'un être humain est constitué par la *partie du milieu extérieur qui se trouve en situation d'agir sur l'être humain ou de subir son action.*

Un système physique qui agit sur un être humain fait partie de son environnement : c'est une constatation de fait. Mais la partie du milieu extérieur sur laquelle un être humain peut effectivement agir, même par des moyens physiques simples, est très difficile à déterminer, du moins avant l'action. Sa détermination la meilleure possible est néanmoins l'un des éléments essentiels dont est constituée une action.

Toutefois, l'impossibilité pour un être humain de décrire complètement son environnement fait que l'environnement d'un être humain est, non un être physique sensible, mais un être de raison, une entité logique.

III. — Première analyse de l'action

1. **Domaine d'une action.** — Une action physique de l'être humain sur le milieu extérieur présente

quelques caractères évidents, qui importent à la cybernétique :

- *une action s'exerce sur une région limitée du milieu extérieur ;*
- *sa durée est limitée ;*
- *elle commence à un instant déterminé.*

D'autres traits, non immédiatement liés à des considérations d'espace ou de temps ou pour lesquels les caractères spatio-temporels ne sont pas dominants, peuvent encore contribuer à la description de cette partie du milieu extérieur sur laquelle s'exerce une action. Ils peuvent différer d'une action à une autre.

On appellera donc *domaine d'une action*, l'ensemble des circonstances (de temps, de lieu, de personnes, etc.) qui s'attachent à cette action. Le domaine d'une action est propre à cette action.

2. Éléments d'une action. — L'analyse du déroulement d'une action permet de distinguer quatre éléments :

1^o *But.* — Tout d'abord, une action a un *but*. *Le but d'une action est d'apporter à l'environnement une modification définie.*

On peut poser la question de la motivation d'une action. Une telle question, et par suite, les réponses que l'on peut y faire, restent en dehors de la pensée cybernétique. Pour le cybernéticien, le but d'une action est une donnée qu'il reçoit comme telle et à partir de laquelle s'exerce sa propre activité. On verra, toutefois, que la pensée cybernétique s'applique aussi à la préparation de l'action, ce qui peut conduire à modifier le but primitivement désiré.

2^o *Préparation.* — Le but défini, vient la préparation de l'action. La préparation d'une action

aboutit à un *programme d'action*, qui décrit un ensemble d'actes élémentaires dont la réalisation successive est présumée accomplir l'action (c'est-à-dire atteindre le but assigné). Il n'y a pas de différence essentielle entre un acte et une action ; l'emploi des deux mots concurremment suggère mieux la relation d'élément à ensemble qui existe entre les idées qu'ils expriment.

On peut noter que la description d'un acte comprend la description du domaine de cet acte. De même, le programme, dans sa totalité, comprend une description du domaine de l'action projetée. Mais la description du domaine d'une action n'est pas possible sans une connaissance suffisante de l'environnement. Action et connaissance apparaissent dès maintenant comme étroitement liées.

3^o *Décision*. — La préparation terminée, on prend — ou non — la *décision* d'agir. Cet élément de l'action est capital. Mais il évoque souvent quelque idée attachée au terme de « volonté » et réveille de grandes controverses. Ce qui intéresse cette première analyse de l'action, c'est *uniquement* l'existence, dans l'être humain qui agit, d'une phase de son activité qui déclenche l'exécution du premier des actes prévus au programme d'action ; cette phase est la décision. L'observation immédiate assure de son existence.

Une décision est précédée d'un jugement de valeur. Par exemple, avant de basculer une lourde pierre, je suppute son poids, et je cherche le geste qui permettra de la saisir le mieux possible, puis je compare l'effort estimé nécessaire avec l'effort dont je me sens capable : je passe à l'action, ou non, selon le résultat de cette comparaison.

Dans cet exemple très simple, les opérations qui

précèdent la comparaison, évaluation du poids de la pierre et détermination de la façon de l'attaquer, appartiennent à l'établissement d'un programme d'action. La comparaison, ni même le résultat de cette comparaison, n'appartiennent au programme. On peut comprendre ce jugement de valeur dans la décision ou bien le faire entrer dans la préparation de l'action. Si l'on s'en tenait aux actions d'un être humain isolé, on serait enclin à l'intégrer à la décision (en d'autres termes, à le considérer comme appelé par la volonté). Mais, dans l'action collective, il est fréquent que l'être humain qui prend la décision n'ait pas réuni lui-même les éléments du jugement de valeur préalables, portant sur les conditions de l'action, et ne fasse pas lui-même ce jugement. Tel est le cas d'un administrateur qui s'adjoit un service de recherche opérationnelle. Cette observation conduit à disjoindre de la décision d'agir le jugement de valeur qui la précède et à le considérer comme faisant partie de la préparation de l'action.

4^o *Exécution*. — La décision d'agir étant prise, le premier acte du programme commence. L'*exécution* de l'action commence aussi.

3. *Comportement du milieu extérieur*. — Le but de l'action étant une modification définie de l'environnement, les actes successifs prévus au programme apportent chacun, en général, une modification partielle à l'environnement déjà modifié par les actes antérieurs.

La *modification de l'environnement à un instant donné* est appelée la *réaction* de l'environnement.

Des réminiscences de mécanique pourraient donner à penser qu'il est incorrect de définir la « réaction » du milieu extérieur par la « modification » de ce

milieu. L'exemple de défense par mimétisme de certains animaux montre que la modification de la connaissance que l'attaquant aura du milieu extérieur est une réaction aux premiers actes d'une attaque en un sens à peine plus large que celui de la mécanique.

La réaction de l'environnement est en relation avec les actes prévus au programme. On peut classer les diverses réactions possibles en trois modes, que l'on appellera les *comportements* du milieu extérieur sous l'action qu'il subit.

1° *Comportement passif* : la réaction du milieu extérieur est celle que présume le programme.

Telle est la réaction d'une pièce en cours d'usinage : le métal s'échappe sous l'outil et la pièce prend docilement la forme définie par les dessins. Le programme consiste dans la loi de la répartition dans l'espace des positions de l'outil en fonction du temps. Ces positions sont occupées successivement par l'outil, il en résulte une forme de la pièce qui est le but à atteindre.

De façon générale, il suffit, pour atteindre le but, d'exécuter les actes successifs décrits par le programme. On dira qu'il suffit d'appliquer le programme.

2° *Comportement déterministe* : la réaction du milieu n'est pas nécessairement celle que présume le programme, mais elle est liée aux actes possibles des agents d'exécution par des lois connues.

Un exemple typique que l'on donne souvent est la régulation du chauffage central d'un appartement.

Le but de l'action est de maintenir à une valeur donnée la température de l'air d'une salle de séjour. La température de la salle dépend du réglage de la chaudière, c'est-à-dire de l'ouverture du volet d'ad-

mission de l'air dans le foyer ; mais elle dépend aussi de la température de l'air à l'extérieur de la pièce, du nombre des occupants, de l'ouverture plus ou moins grande des fenêtres et des portes, etc. Un programme, définissant l'ouverture du volet d'air en fonction du temps, ne saurait suffire à maintenir constante la température de la salle, parce que la loi de correspondance de cette température avec le temps n'est pas connue à l'avance. Mais il existe une relation simple entre une *variation* de l'ouverture du volet d'air du foyer et une variation de la température de la salle ; cette relation simple est : réduire l'ouverture du volet abaisse la température de la salle, accroître l'ouverture du volet élève la température. Dès lors, il suffit, pour atteindre le but, d'aller fermer un peu le volet de la chaudière si l'on a trop chaud, et d'aller l'ouvrir si l'on a froid.

Dans le cas d'un comportement déterministe on ne peut préparer une liste chronologique d'actes atteignant le but, mais on peut prédire quel acte doit être effectué pour corriger le défaut des actes précédents à atteindre le but.

3° Comportement aléatoire : la réaction du milieu n'est pas nécessairement celle que présume le programme et l'on ne connaît pas de loi la reliant aux agents d'exécution.

Un exemple typique est la chasse aux papillons. L'insecte étant immobile, on s'approche en se dissimulant, et, à l'instant où l'on va jeter le filet, le papillon s'envole vers une autre fleur.

A cette catégorie appartiennent aussi le tir contre avions, la concurrence commerciale, les jeux de cartes et nombre d'autres jeux, en un mot, la plupart des actions de l'homme sur l'homme ou sur des êtres vivants.

4. **Efficacité. Guidage.** — L'être humain qui accomplit une action afin d'imposer au milieu extérieur une modification prédéfinie règle la suite de ses actes selon le comportement du milieu extérieur. Dans le second et le troisième cas il modifie chaque fois qu'il est utile le programme préparé, pour l'adapter à une situation nouvelle. Quelle que soit la façon dont l'être humain adapte le programme d'action au milieu extérieur, cette modification se fait sous le contrôle d'un critère de qualité universel qui est l'*efficacité*. En termes imagés, peut-être plus expressifs :

Une action, un acte, un programme sont efficaces s'ils conduisent au but assigné.

La substitution d'un programme à un autre en conséquence de la réaction du milieu extérieur est l'opération principale du maintien ou du rétablissement de l'efficacité de l'action, qui pouvait se trouver amoindrie par cette réaction. Mais l'exécution de l'action, qui est assurée par des agents d'exécution, peut comprendre, lorsque le programme est modifié, de mobiliser de nouveaux agents d'exécution et de les mettre à l'œuvre ; au jeu de tennis, si la balle attendue à droite surgit à gauche, les muscles déjà tendus pour un direct sont aussitôt remplacés par ceux qui exécutent un revers.

Ces opérations diverses que fait l'être humain pour adapter ses actes successifs à la réaction du milieu extérieur sont commodément groupées sous le terme de *guidage*. De façon plus précise :

Le guidage d'une action est un ensemble de moyens mis en œuvre pour que cette action soit efficace.

5. **La cybernétique.** — Parmi les « moyens » que peut mettre en œuvre le guidage d'une action, aucune espèce n'est exclue. Point, notamment, les moyens intellectuels.

1^o Mais une activité plus abstraite domine le guidage et, en quelque sorte, le construit. Le guidage d'une action peut presque toujours s'effectuer de diverses façons. Dans l'exemple que l'on a emprunté au jeu de tennis, un direct du bras gauche peut remplacer le revers du droit ; le conducteur d'une voiture en situation délicate, qui, généralement, cherche à stopper par un coup de frein, peut aussi souvent se dégager en accélérant, et, dans une discussion, quelle multitude de répliques, parfois, entre lesquelles il faut choisir la meilleure ! Ce choix d'un système d'actes et d'idées qui, mieux que d'autres, guide l'action vers le but assigné procède d'une activité de l'ordre de l'esprit dont l'individualité se marque nettement. Elle se définit d'elle-même : assurer l'efficacité de l'action.

A cette activité il est naturel de rattacher celles qui l'alimentent ou en dépendent immédiatement :

a) Le choix du programme initial en fait partie. On a noté qu'il était fondé sur une connaissance suffisante du domaine de l'action. De même, au cours de l'exécution de l'action, les modifications du programme nécessitées par la réaction du milieu extérieur ne peuvent être convenablement déterminées sans une bonne connaissance de cette réaction. A tout instant donc, cette activité de guidage prend pour matière d'œuvre des renseignements reçus du milieu extérieur.

b) Dans le guidage de l'action figure, au premier chef, la commande des agents matériels de l'action, ou le commandement des hommes, qui se manifeste par des « ordres », « transmis » aux agents d'exécution.

2^o Cette activité particulière, d'ordre intellectuel, qui organise le guidage de l'action comprend donc

les deux éléments dont la Cybernétique de Wiener serait la « théorie » : la commande et les communications. Dès lors, restant dans la ligne du développement de la langue, notamment de la langue scientifique, l'on peut :

- ou bien imaginer un terme nouveau pour désigner cette activité, dont la théorie que Wiener a appelée « cybernétique » serait une partie ;
- ou bien étendre le sens du mot « cybernétique » et lui faire désigner tous les aspects de cette activité, et toutes ses modalités.

3^o C'est de cette dernière façon que nous procéderons, disant : *La cybernétique est l'art de rendre efficace l'action.*

Cette conception de la cybernétique trouve sa source dans une fine étude de G.-T. Guilbaud sur un texte de Platon relatif à l'art du pilote. Entre le capitaine, qui dit où aller, et le timonier, qui manœuvre la barre, le pilote dit quelle barre mettre : le capitaine fixe le but, le timonier exécute la gouverne, le pilote choisit le programme d'action et donne les ordres au timonier : il pense cybernétique.

D'autres exemples peuvent être cités. Dans une entreprise de construction mécanique, la direction, qui choisit les constructions à entreprendre, et le bureau d'étude, qui en établit la description détaillée, définissent le but ; les ateliers, qui fabriquent les pièces et assureront le montage, sont les agents d'exécution ; le bureau de lancement, qui choisit les machines et les équipes et fixe le moment et la façon d'intervenir de chacune, pense cybernétique.

Dans le corps humain, le cervelet reçoit du cerveau l'indication du geste à accomplir ; par les nerfs propriocepteurs, il reçoit à chaque instant l'indication de l'état de chaque muscle et, par

les nerfs des canaux semi-circulaires, l'indication de la position par rapport à la verticale d'un trièdre de référence du corps ; il construit à partir de ces données les ordres à envoyer aux muscles pour que le geste soit exécuté sans compromettre l'équilibre du corps : le cervelet est un organe cybernétique.

On trouve aussi des organes cybernétiques dans les machines. Un exemple devenu classique est celui du régulateur de Watt des machines à vapeur. Deux boules assez lourdes sont reliées à un arbre vertical par un losange articulé de manière à pouvoir s'écarter de l'arbre. L'arbre du régulateur est entraîné par la machine et l'écartement des boules mesure la vitesse de rotation. L'articulation inférieure du losange s'élève donc quand la vitesse croît, s'abaisse quand elle décroît. Elle est reliée au robinet d'admission de la vapeur par un collier et une tringlerie disposés de façon à ouvrir le robinet quand le collier s'abaisse, la vitesse diminuant, et à fermer le robinet quand le collier s'élève : le régulateur de Watt qui commande le débit de vapeur de manière que la vitesse reste constante est un organe cybernétique.

Le régulateur de Watt et les organes cybernétiques des machines se prêtent évidemment à une description les faisant apparaître comme des applications de théories de la mécanique. Les organes cybernétiques des êtres vivants sont « semblables » aux organes cybernétiques des machines dans leur but et, plus ou moins, dans leur structure et leur fonctionnement. Il a pu sembler aux premiers cybernéticiens, dont la pensée a été exprimée par Wiener, qu'une même théorie pouvait les décrire les uns et les autres. On s'explique que l'insuccès des premières tentatives ait pu conduire des ingénieurs à penser qu'il n'y avait pas de théorie possible en dehors des

machines. Mais il conduisait d'autres penseurs, des philosophes notamment, à examiner de plus près ce mouvement de pensée en tant que tel.

IV. — Les mécanismes

Quelle que puisse être la nature d'une « théorie » commune aux êtres humains et aux machines, une telle théorie serait une théorie des mécanismes, classe d'êtres à laquelle appartiennent les machines et les êtres humains, pour une grande part de leurs agencements.

1. **Mécanismes.** — On appelle *mécanisme* :

- au sens dénombrable : *un système physique qui peut prendre des états successifs différents* ;
- au sens non dénombrable : *le comportement d'un mécanisme.*

Cette définition peut paraître trop large, eu égard à l'origine du mot mécanisme et à l'évocation de pièces de machines qui s'y attache primitivement. L'extension proposée correspond cependant à un usage de plus en plus fréquent du terme, au sens non dénombrable, pour désigner un comportement considéré comme soumis à des lois, même si l'on ignore ces lois elles-mêmes : on parle du mécanisme d'une réaction chimique, du mécanisme des compensations de devises entre plusieurs pays, et même du mécanisme d'une démonstration.

On distinguera :

- les *mécanismes artificiels*, qui sont construits par l'homme ;
- les *mécanismes naturels*, qui ne sont pas construits par l'homme.

Les concepts de « milieu extérieur », « action physique », « environnement » qui précisent l'individualité d'un être humain, s'appliquent également à un mécanisme.

2. Mécanisme finalisé. — On appelle *mécanisme finalisé* un mécanisme considéré comme établi pour des interactions avec son environnement exclusivement déterminées.

Cette définition est inspirée par la considération d'une machine, qui est construite par l'homme pour réaliser des opérations déterminées par avance.

Si le comportement du milieu est aléatoire, les réactions du milieu ne sont plus prévisibles, mais on peut prévoir, généralement, un ensemble de réactions de la même espèce et établir le mécanisme de telle sorte qu'il interagisse correctement pour une réaction quelconque de cet ensemble. Si la réaction est autre, le mécanisme ne joue plus correctement mais ce cas est exceptionnel : si, par exemple, on va à la pêche avec une ligne pour les petits poissons, dans un coin approprié, on tirera de l'eau aussi bien un gardon qu'un goujon, ou peut-être on ne prendra rien ; mais si, un goujon s'étant pris, un brochet survient qui l'avale, il emportera aussi la ligne ; ce cas toutefois est exceptionnel, à l'endroit où l'on s'était posté.

Une autre précaution dans les termes est de dire qu'un mécanisme finalisé est *considéré comme* établi pour des interactions avec son environnement exclusivement déterminées. Ce point demande explication. L'ingénieur mis en présence d'une machine compliquée voit ce que fait la machine, et *il sait* qu'elle a été construite *pour* faire cela. Le naturaliste qui rencontre un mécanisme naturel, peut aussi l'observer. Il voit ce que fait le mécanisme, et *il dit*

que le mécanisme a été construit *pour* faire cela. Un tel mode de description des phénomènes sous-entend l'adhésion à un principe d'explicabilité du monde selon certaines normes, qui est métaphysique. Or, la cybernétique, ne visant pas à « expliquer » des phénomènes observés, mais à mettre en œuvre la connaissance que l'on peut avoir des phénomènes pour assurer l'efficacité d'actions particulières déterminées, n'a pas besoin de tous les concepts d'ordre métaphysique nécessaires à certains modes d'explication des phénomènes observés. Il reste, cependant, que, *dans la situation du moment*, attribuer pour but à un mécanisme que l'on voit agir sur son environnement le résultat de cette action est une façon commode de décrire les choses, et l'on ne saurait proscrire cette commodité. La plupart des mécanismes que considère la cybernétique deviennent ainsi des mécanismes finalisés, puisque toute action a un but. On peut donc considérer la finalité comme essentielle à la cybernétique.

3. Notions liées à la finalité. — On appelle :

- *données* : les actions physiques exercées par l'environnement sur un mécanisme finalisé et les êtres qui les exercent ;
- *résultats* : les modifications de l'environnement dues à l'action du mécanisme, et les êtres modifiés par cette action ;
- *matière d'œuvre* : la partie de l'environnement sur laquelle un mécanisme finalisé est destiné à agir ;
- *fonction* d'un mécanisme finalisé, la relation établie par ce mécanisme finalisé entre les données et les résultats ;
- *organe* d'une fonction, le mécanisme (généralement partie d'un autre mécanisme) qui réalise cette fonction ;

- *structure* d'un mécanisme finalisé, *l'agencement de ses organes* ;
- *logique* d'un mécanisme finalisé, *l'agencement de ses fonctions* ;
- *fonctionnement* d'un mécanisme finalisé, *l'opération par laquelle le mécanisme réalise sa fonction* ;
- *organe d'entrée* d'un mécanisme finalisé, *l'organe qui reçoit les données* ;
- *organe de sortie* d'un mécanisme finalisé, *l'organe qui fournit les résultats* ;
- *effecteur*, l'organe qui agit sur la matière d'œuvre ;
- *fonction essentielle* d'un mécanisme finalisé, *la partie de la logique du mécanisme qui concerne la fonction propre de l'effecteur* ;
- *cybernétique* d'un mécanisme finalisé, *la partie de la logique du mécanisme finalisé qui concerne le guidage de ce mécanisme* ;
- *organes cybernétiques*, les organes qui assurent le guidage de l'action d'un mécanisme finalisé ;
- *mécanisme automatique*, un mécanisme qui assure son propre guidage.

1^o Un exemple précisera le jeu de ces notions, qui ont été définies dans la plus grande généralité possible.

Une machine-outil, un tour, est un mécanisme finalisé. Son but est d'usiner une pièce brute pour lui donner une forme définie. La pièce brute est la donnée principale, la pièce usinée, le résultat. La fonction essentielle du mécanisme est la relation logique qui existe entre la pièce brute et la pièce usinée ; elle est définie par des dessins. La pièce brute est taillée par un outil ; cet outil est l'effecteur. La pièce est supportée par d'autres pièces, appelées

poupées, dont l'une tourne, entraînée par un moteur. L'outil est porté par un chariot qui se déplace longitudinalement et transversalement sous l'action du moteur ; la vitesse du mouvement de l'outil et l'amplitude de ses déplacements sont fixées par l'ouvrier qui conduit la machine. La poupée mobile, le chariot porte-outil, les glissières sur lesquelles le chariot se déplace, etc., sont des organes qui ont chacun une fonction particulière. La structure de la machine est la description de chacun des organes et de ses relations de position et de mouvement avec les autres organes. La logique de la machine est la description de la fonction de chaque organe et de ses relations avec les fonctions des autres organes. Le fonctionnement de chaque organe consiste dans les mouvements qu'il prend en vue de réaliser sa fonction. Les données comprennent la pièce brute, qui est un être matériel et aussi l'huile de graissage, le liquide de refroidissement de la pièce, qui sont des êtres matériels, l'action physique extérieure par laquelle le moteur tourne, que l'on attribue à un être physique, probablement immatériel, appelé électricité, enfin, les réglages effectués par l'ouvrier, qui sont des actions physiques, équivalentes logiquement et matériellement à la fourniture d'informations, dont la nature, matérielle ou immatérielle, n'a point encore été convenue. Les résultats comprennent principalement la pièce usinée, mais aussi des copeaux, qui ont une valeur marchande, l'usure de l'outil et de la machine. Les organes qui relient à l'outil les organes sur lesquels agit l'ouvrier pour effectuer ses réglages sont des organes cybernétiques ; leur fonctionnement assure le guidage de l'outil. La description des fonctions qui sont réalisées pour assurer le guidage de la machine constitue la cybernétique de la machine.

2° Quelques remarques immédiates contribueront encore à éclairer ces notions :

- un même organe peut remplir plusieurs fonctions, tant dans les mécanismes naturels que dans les mécanismes artificiels ;
- une même fonction peut être remplie par des organes divers ;
- les organes de sortie, agissant sur l'environnement, sont en contact avec lui, et ils sont guidés, sans participer au guidage ; les organes d'entrée apportent ou présentent au reste du mécanisme les éléments du milieu extérieur sur lesquels ou au moyen desquels s'exerce l'action du mécanisme et ils peuvent participer au guidage des mouvements de ces éléments.

3° On trouve couramment depuis quelques années, dans les ouvrages français relatifs aux machines, le mot « technologie » au lieu de « structure ».

Les termes de « logique » et de « technologie » sont empruntés à la terminologie américaine.

Ils sont très voisins des termes de « principe » et « description » utilisés dans les ouvrages de technologie français pour l'étude des machines. Leur introduction dans la terminologie des machines automatiques depuis une dizaine d'années semble due à une sorte de découverte de l'automatisme dans la littérature américaine par des ingénieurs peu avertis des méthodes pratiquées depuis longtemps par les constructeurs français.

Ces deux termes sont à rapprocher aussi des termes conjugués de « anatomie » et « physiologie », en usage en biologie. La biologie étudie des êtres naturels. Elle en étudie, nécessairement, ce que peut appréhender un observateur. La connaissance des éléments matériels qui les constituent, objet de

l'anatomie, a précédé l'étude des relations de fonctionnement que présentent ces éléments entre eux et avec le milieu extérieur, et qui est l'objet de la physiologie.

Les concepts de « structure » et « fonctionnement », plus généraux que ceux d' « anatomie et physiologie », procèdent cependant du même esprit, et marquent le même souci de *connaître* un objet *donné*. C'est ainsi que Maurice d'Ocagne, puis Kœnigs, voulant caractériser l'esprit d'objectivité et de rigueur scientifique dans lequel ils se proposaient de décrire l'ensemble des machines à calculer ou des mécanismes de calcul existant à leur époque, ont parlé d'anatomie et de physiologie du machinisme.

Les termes de « logique » et de « structure » (ou de « technologie ») renversent l'ordre des idées. Ils font passer la description des relations à assurer entre le mécanisme et l'extérieur avant la description des organes. Ils concernent l'invention du mécanisme plus que sa description scientifique. Ils marquent nettement la prééminence du but de l'action que le mécanisme pourra accomplir, et la règle d'efficacité imposée au choix des organes. Ils conviennent mieux, par conséquent, à la pensée cybernétique, et préfigurent même les arguments qui individualiseront la cybernétique au regard d'autres activités de l'esprit.

V. — L'information

1. **La notion d'information.** — Il est d'observation banale qu'une action physique du milieu extérieur sur un être humain, nécessairement manifestée à la périphérie du corps, se répercute sur des éléments du système nerveux plus ou moins lointains du point où cette action physique s'est manifestée.

Si l'action est légère, elle provoque un mouvement de défense à travers un « arc réflexe », de faible longueur ; tel est le geste machinal d'agiter légèrement un doigt sur lequel s'est posé une mouche. Si l'action est intense, elle peut agir sur les centres nerveux supérieurs, déclencher des mouvements de réaction concernant des membres éloignés du point où l'action extérieure s'est manifestée, et provoquer des phénomènes psychiques, à commencer par l'enregistrement dans la mémoire du souvenir de l'action subie. Parmi les actions physiques du milieu extérieur sur l'être humain, il en est même dont le but est un effet psychique ; telles sont, évidemment, les actions constituées par les sons modulés de paroles que l'on entend, ou d'un instrument de musique que l'on écoute.

La cybernétique appelle « information », toute action physique qui s'accompagne d'une action psychique. Cette définition couvre la signification usuelle du terme « information », à savoir : renseignement, élément de connaissance relatif au milieu extérieur. Mais elle déborde cette signification. Pour distinguer dans la terminologie l'action physique et l'action psychique qui constituent une information, et préciser l'usage du mot information lui-même, on appellera :

- *information* : l'ensemble d'un support et d'une sémantique ;
- *sémantique* d'une information : l'effet psychique d'une information ;
- *support* (ou *forme*) d'une information : le phénomène physique associé à une sémantique pour constituer une information.

Le terme de « sémantique » est emprunté à la linguistique. Mais il est pris dans un sens plus large.

Les langages expriment plus particulièrement la pensée rationnelle. Or, la cybernétique doit considérer non seulement les idées, mais tous les phénomènes d'ordre psychique.

Par exemple, les idées exprimées par un texte parlé peuvent être conservées par un disque de phonographe ou un ruban de magnétophone. Mais la musique peut être conservée par ces mêmes instruments. Pour le technicien qui construit ou règle l'appareil, parole et musique sont indistinctes, on ne fait pas, pour l'une ou l'autre, des réglages différents. On dira peut-être que la sémantique — au sens cybernétique — de la parole enregistrée est d'ordre plus particulièrement rationnel, celle de la musique enregistrée d'ordre plus particulièrement esthétique; mais il est commode d'utiliser le même mot dans les deux cas. Au reste, l'éloquence, la poésie et le chant permettent de passer par des transitions insensibles d'une sémantique de caractère purement logique à une sémantique purement esthétique.

Le terme de support se comprend de lui-même.

Il facilite souvent le discours de dire que le support d'une information *convoie* une sémantique.

2. **Analyse de l'information.** — L'information est une notion fondamentale pour la cybernétique; tous les mécanismes cybernétiques ont pour matière d'œuvre des informations: une analyse plus profonde de l'information est donc justifiée.

1° **RELATIONS ENTRE SÉMANTIQUE ET SUPPORT.** — C'est la *sémantique* qui constitue l'*élément essentiel d'une information*. Si la même nouvelle est reçue par la voie d'un télégramme et par la voie d'une conversation téléphonique de la part de personnes différentes, on reconnaîtra dans le télégramme et la conversation téléphonique la même information

parce que l'effet psychique produit a été le même, bien que les supports soient différents.

a) On appellera donc :

- *informations équivalentes* : des informations qui ont la même sémantique et des supports différents ;
- *informations distinctes* : des informations qui n'ont pas la même sémantique ;
- *transformation* d'une information : l'opération consistant à *changer le support de l'information sans en changer la sémantique* ;
- *mutation* d'une information : l'opération consistant à *changer la sémantique* de l'information sans en changer le support ;
- *information univoque* : une information qui fait correspondre à un support une seule sémantique ;
- *informations voisines* : des informations distinctes dont l'effet psychique est considéré comme voisin ;
- *altération* d'une information : la mutation qui fait passer d'une information à une information voisine ;
- *écart* d'une information altérée : l'information qu'il faut adjoindre à l'information altérée pour rétablir l'information initiale.

b) Une objection pourrait être faite, qu'il convient d'abord d'écarter. Le support d'une information est un phénomène physique, qui peut être décrit en termes objectifs ; discerner si les supports de deux informations sont différents ou non est une opération technique simple. Mais l'effet psychologique produit par l'action physique du support est subjectif ; on le constate aisément pour des sémantiques d'ordre esthétique : la même œuvre musicale, exécutée par le même musicien, produit un effet différent sur des auditeurs différents. Or, il en est de

même pour des informations aussi objectives qu'une loi scientifique : énoncée par le professeur, elle est comprise ou non selon les élèves.

En réalité, il s'agit, dans ces exemples, de « transmission d'informations », et de la comparaison de la transmission émise à la transmission reçue, et ce n'est plus seulement la nature de l'information qui est en cause, mais aussi le mécanisme de transmission qui peut altérer l'information transmise.

c) Un exemple typique de mutation d'information se rencontre dans certaines machines à calculer binaires, où la multiplication est faite par répétition de l'addition du multiplicande. Comme le chiffre du multiplicateur, dans un ordre binaire déterminé, ne peut être que 1 ou 0, le multiplicande est ajouté une fois ou non ajouté selon que le chiffre du multiplicateur est 1 ou 0. Les chiffres sont représentés par des impulsions électriques circulant l'une derrière l'autre dans des circuits, l'amplitude d'une impulsion ayant une valeur haute, désignée par U, si le chiffre est 1, et une valeur nulle ou très faible, désignée par 0, si le chiffre est 0. Mais on peut aussi convenir qu'une suite déterminée de 0 et de 1 représente un autre concept qu'un nombre, ce que l'on peut encore décrire en disant que l'on a donné un numéro à chacun des concepts qui ne sont pas des nombres. Dès lors, le fonctionnement du dispositif de multiplication est le suivant. Le multiplicande est conservé dans un circuit fermé et, à chaque tour la première impulsion se présente à un organe intercalé dans le circuit, qui dirige les impulsions constituant le multiplicande vers l'organe d'addition, s'il reçoit en même temps d'un circuit, dit « de commande », une impulsion qui représente « l'ordre » d'admettre le multiplicande dans le totalisateur. Le multiplicateur est conservé dans un

autre circuit fermé, et, à la fin de chaque cycle, la dernière impulsion se présente à un organe d'aiguillage qui la dirige vers le circuit de commande de l'addition du multiplicande. Si elle est d'amplitude haute elle provoque l'addition, sinon, elle l'empêche. Cette impulsion est donc le support de l'information que constitue un « chiffre » du multiplicateur tant qu'elle est dans le circuit où est conservé le multiplicateur ; et elle devient le support de l'information que constitue un « ordre de commande » dès qu'elle est entrée dans le circuit de commande. Il y a eu au passage par l'organe d'aiguillage un changement brusque de la sémantique de l'information, qui n'est pas une altération de l'information convoyée précédemment par le support.

2° STRUCTURE DES SUPPORTS :

a) *Langages*. — Le support usuel d'une information est un langage. Le terme de langage englobe, non seulement les langues parlées ou écrites, qui sont le plus universellement utilisées, mais encore les langages particuliers que constituent l'écriture braille pour les aveugles, l'alphabet des mains des sourds-muets, les codes de signaux maritimes, les codes télégraphiques commerciaux, etc.

Dans l'écriture, les mots sont constitués par des suites de signes d'écriture qui confèrent à chaque mot une structure graphique qui lui est propre. Le cas des langues d'Extrême-Orient, où chaque mot s'écrit par un signe d'écriture particulier, ne constitue pas une exception : le nombre des signes d'écriture est plus grand, et la structure des mots à partir des signes d'écriture, plus simple.

Les « signes » d'écriture peuvent être remplacés par des « signaux ». Dans la transmission à bras à bord des bateaux, par exemple, les signaux sont les

positions diverses des bras du matelot. Ils se structurent comme les signes d'écriture quand ils représentent les lettres de l'alphabet. Mais il existe aussi un système de signaux, le code maritime international, où chaque signal a une signification déterminée, qui s'exprime dans le discours par plusieurs mots ou même par une phrase complète.

La distinction entre les termes « signe » et « signal » est qu'un signal est passager, transitoire, tandis qu'un signe, généralement marqué dans une matière durable, est destiné à durer, lui aussi. Cette distinction s'étend nécessairement aux supports d'informations formés soit de signes, soit de signaux.

On est ainsi conduit à définir les termes suivants :

- *information persistante* : information dont le support subsiste dans l'espace longtemps après l'instant où elle s'est manifestée ;
- *information temporaire* (ou *transitoire*) : information non persistante ;
- *langage* : support d'information formé d'éléments de structure déterminée ;
- *signe* et *signal* : élément insécable d'un langage, signe désignant un élément persistant, signal un élément transitoire ;
- *catène* : ensemble de signes ou de signaux constituant le support d'une information.

Les notions d'information persistante et d'information temporaire sont relatives à la situation dans laquelle on les emploie. L'accord est certain pour qualifier de persistante l'information conservée dans un texte écrit, un enregistrement sur disque phonographique ou magnétique, un film de cinéma et pour qualifier de transitoire l'information apportée par la parole ou la vue, ou convoyée par les ondes de la radiodiffusion. Toutefois, l'information appor-

tée au *spectateur* par un film de cinéma est transitoire ; elle est persistante par la possibilité qu'offre le film de renouveler la suite d'informations transitoires que constitue la vue de ce film.

La mémoire de Williams, dans les machines à calculer, constitue un cas assez analogue. Dans cet appareil, les signes 0 ou 1 de la représentation binaire des nombres sont enregistrés sur un tube de télévision sous la forme d'un point rond pour le signe 0 et d'un petit trait pour le signe 1. Le faisceau de rayons cathodiques balaie les lignes successives sur lesquelles traits et points sont inscrits, lit au passage si le signe est un point ou un trait et réinscrit aussitôt le même signe à la même place ; le succès de ce procédé tient à ce que l'électrisation de la surface d'un point ou d'un trait subsiste pendant la durée du balayage de tout l'écran. Pour le technicien chargé de l'entretien ou de la mise au point de l'appareil, l'information enregistrée sur l'écran est transitoire puisqu'il faut la recopier sur place plusieurs centaines de fois par seconde. Pour l'utilisateur de la machine, cette information est persistante, car elle reste à disposition aussi longtemps que la machine est en fonctionnement, et cette durée peut atteindre plusieurs journées consécutives.

Pour le cybernéticien, le domaine d'action d'une information précisera suffisamment la signification à donner aux termes d'« information persistante » et « information transitoire » pour éviter toute difficulté. Cela tient à ce qu'une action se rapporte toujours à un environnement limité et bien déterminé.

Dire qu'un signe ou un signal est un élément « insécable » d'un langage appelle également explication.

Dans une phrase de la langue courante qui apporte une information, les éléments que l'on reconnaît

d'abord sont des « mots », ou des groupes de mots présentant une individualité et qui constituent des « expressions » ; ces éléments peuvent être définis par la propriété d'être, chacun, le support d'une contribution bien déterminée à la sémantique de l'information convoyée par la phrase considérée. Mais les mots et les expressions se décomposent en des éléments graphiques ou verbaux, qui sont les lettres de l'alphabet ou les sons fondamentaux du langage parlé structurés selon des lois précises, par exemple, les lois de la morphologie grammaticale pour la construction des mots. Ce sont ces éléments, que l'on ne décompose pas en éléments plus simples (si ce n'est peut-être dans l'apprentissage de l'écriture, qui, au reste, ne ressortit pas à l'usage courant de la langue, mais lui est préalable), qui sont qualifiés d'« insécables » et qui constituent les « signes » ou les « signaux » au moyen desquels le langage est construit.

Le support d'une information est donc formé, en général, d'« éléments » d'un langage, qui sont les mots, expressions, etc., formés eux-mêmes de signes ou de signaux. Mais une combinaison d'éléments d'un langage n'est pas nécessairement le support d'une information, même si ces éléments sont structurés selon les règles de ce langage. On connaît l'exemple amusant imaginé par Carnap : la suite de mots : « Napoléon est triangulaire », formée de mots ayant séparément un sens et structurée sans enfreindre les règles de la grammaire, est cependant dépourvue de signification : ne pouvant recevoir aucune sémantique, elle n'est pas le support d'une information.

Ce sont des remarques de cet ordre qui ont conduit à créer le terme de *catène*. Pour la cybernétique, l'intérêt de ce terme est profond.

Dans le problème de la traduction mécanique d'une langue dans une autre, par exemple, une correspondance doit être établie entre le texte donné dans une première langue et le second texte de façon que les informations convoyées par ces deux textes soient équivalentes. Les informations élémentaires en lesquelles se décompose la totalité des informations contenues dans le texte donné sont supportées par des mots ou des expressions qui ne se correspondent pas chacun à chacun dans les deux langues ; la traduction mot à mot est insuffisante. Par contre, si la traduction est correcte, une correspondance est établie entre certaines informations équivalentes. Un cas typique est celui de la correspondance de deux idiotismes équivalents, tels que : « Comment allez-vous ? » et « How do you do ? », qui constituent chacun une catène.

Dans le même ordre d'idées, des mécanismes constructeurs de phrases, tels que la machine « Caliope » d'Albert Ducrocq, doivent être agencés, si l'on veut que leurs phrases soient sensées, de manière que les mots écrits à un instant n'appellent que des mots pouvant entrer avec eux dans des catènes.

Ces exemples, faisant apparaître sous un jour peut-être imprévu le sens profond et la valeur du terme de catène, en justifient l'adoption. Mais ils attirent en même temps l'attention sur la nécessité de resserrer les relations d'ordre grammatical qui doivent être observées dans l'enchaînement des éléments d'une langue destinée à constituer le support d'une information. Car, s'il n'est pas nécessaire de faire figurer dans la grammaire, au chapitre de l'adjectif attribut, de règle interdisant d'écrire : « Napoléon est triangulaire », les réactions naturelles du lecteur faisant à cette proposition le sort qui lui convient, il faut au contraire expliciter toutes les règles que

devra observer une machine dont la matière d'œuvre serait des informations ; on n'admettrait pas qu'une telle machine mélange des phrases sensées et des phrases absurdes.

D'où les définitions ci-après :

- *information dialectique* (ou *discursive*) : information formée de catènes d'un langage déterminé ;
- *syntaxe cybernétique d'un langage* : les lois de structuration des catènes de ce langage.

b) *Nature physique des supports d'informations.* — Dans les techniques des télécommunications, on appelle « modulation » d'une vibration permanente, une modification temporaire des caractères physiques de cette vibration. Cette modification, représentant un ensemble de signaux, est généralement le support d'une information. La vibration permanente, appelée *porteuse*, est une vibration sinusoïdale ou une résultante de vibrations sinusoïdales. On peut admettre, à la limite, qu'un état physique invariable dans le temps ou dans l'espace est une vibration d'amplitude nulle ou une vibration de période infinie. Cette extension du sens de certains mots permet de dire :

- *le support d'une information est une « modulation » d'un état de régime.*

Le cas limite consiste à dire, par exemple, que marquer des lettres sur une feuille blanche est une « modulation » de l'état de régime de la feuille, lequel est d'être de couleur blanche, cette couleur se modifiant selon une vibration d'amplitude nulle (c'est-à-dire ne se modifiant pas).

3° STRUCTURE DES SÉMANTIQUES :

a) *Patterns.* — L'effet psychique produit par une action physique extérieure est généralement

perçu globalement. On adoptera, pour cet effet psychique global, le terme anglais de *pattern*. L'importance de la notion de *pattern* tient à ce que, dans de nombreux cas, le support d'une information n'est pas un langage. Nombre d'exemples conduiront même à penser que les langages n'expriment que de façon très incomplète, et souvent mutilée, la richesse des *patterns*.

Premier exemple : l'apprentissage par imitation. Bien souvent le moniteur ne peut décrire les opérations qu'il effectue, soit qu'il ignore les termes précis nécessaires, soit qu'il connaisse mal la langue de l'apprenti. L'élève parvient à réaliser correctement l'opération en voyant faire le moniteur et s'exerçant à faire comme lui. On ne peut dire que l'élève ait construit en lui-même pour son propre usage une description de l'opération, car, en général, il manque des termes nécessaires plus encore que le moniteur, et, même avec des mots à lui, il ne peut décrire ce qu'il fait. L'apprentissage poursuivi dans ces conditions atteint cependant son but.

Deuxième exemple : les représentations graphiques de phénomènes naturels. En particulier, le tableau numérique des températures d'un malade mesurées le matin et le soir demande au médecin un effort d'interprétation considérable. Même un graphique tracé avec des échelles quelconques est peu parlant. Par contre, le graphique tracé sur les feuilles de température normalisées que fournissent les pharmaciens donne immédiatement au médecin qui l'examine un *pattern* de l'état du malade, qui peut se combiner avec d'autres *patterns* en un diagnostic qui, lui, sera exprimé dans un langage. De même, certains dessins, apparaissant globalement dans un enregistrement électro-encéphalographique, sont caractéristiques de certaines maladies.

Troisième exemple : J. Payot notait, il y a presque un demi-siècle, que : « L'on ne sait pas ce que signifie le mot barrir si l'on n'a jamais entendu crier un éléphant. » L'expérience personnelle de chacun confirme surabondamment cette observation ; en particulier, chacun a conscience qu'il ne peut pas tenter d'imiter le cri de l'éléphant s'il ne l'a jamais entendu.

Quatrième exemple : Des *patterns* naissent encore et se présentent à la conscience comme résultats de l'action des mécanismes mentaux. Ils sont particulièrement perceptibles dans le phénomène pathologique de l'hallucination, dans l'argumentation d'un paranoïaque, dans le cauchemar et même le rêve. On les retrouve dans les phénomènes normaux du raisonnement où ils sont liés à des « modèles dialectiques », selon la terminologie qui va être introduite. Dans tous ces cas, l'esprit construit une image de même nature que celles que provoquent des actions physiques extérieures, et lui attribue le rôle coutumier de telles images : représenter des êtres de l'environnement et leur comportement.

Un *pattern* est généralement représenté par un *symbole* : mot simple ou catène, dessin, statue, etc. Le symbole, vu ou entendu, évoque le *pattern*.

b) *Modèles dialectiques*. — Quand l'évocation du *pattern* d'un être du milieu extérieur ne suit pas immédiatement la perception de son symbole, on peut en donner une *description*, qui consiste sous sa forme la plus simple dans l'énumération d'un ensemble de symboles de *patterns* de connaissance immédiate. Les adjectifs composés en sont des exemples : jaune-orangé, vert-olive, etc. Une telle description est appelée un *modèle dialectique élémentaire*. Si l'être décrit se rencontre fréquemment, on lui attribue un symbole. Ce symbole, ou la description

entière peuvent entrer dans la description d'un être moins simple ; la description d'un tel être est appelée un *modèle dialectique*.

Les *patterns* évoqués par les symboles utilisés dans la description d'un être sont des *attributs* de cet être. Ceux de ces *patterns* qui ne peuvent être décrits au moyen de *patterns* plus simples sont appelés *prédicats* ; on dit encore que les prédicats sont des *attributs insécables*.

Il n'y a pas de différence essentielle, pour l'usage d'un langage notamment, entre un être et l'ensemble d'attributs qui le décrivent. Cela apparaît dans les observations qui viennent d'être faites ; et de nombreuses observations du Pr Jean Delay le confirment. La langue courante le met en évidence en attachant trois mots fondamentaux à chaque radical, marquant la qualité, l'existence, l'action ; par exemple : grand, grandeur, grandir. La langue philosophique en use couramment en utilisant comme substantif, symbole d'un être, un adjectif ou un verbe : le beau, le devenir.

c) *Terminologie*. — On appelle :

- *information descriptive* (ou *description*) : une information relative à la connaissance d'un être ou de son comportement ;
- *pattern* : la sémantique d'une information descriptive ;
- *pattern de connaissance immédiate* : la sémantique d'une information non dialectique ;
- *symbole* d'un *pattern*, d'un être, etc. : un être dont l'action évoque ce *pattern*, cet être, etc. ;
- *modèle dialectique* : une description faite dans un langage (donc au moyen de symboles) ;
- *attribut* : le *pattern* correspondant à un symbole utilisé dans un modèle dialectique ;

- *prédicat (ou attribut insécable)* : un attribut qui ne peut être décrit par d'autres attributs ;
- *modèle dialectique élémentaire* : la description d'un pattern de connaissance immédiate.

3. Opérations informationnelles. — On appelle :

- *opérations informationnelles* : les opérations que l'on peut faire subir à des informations ;
- *mécanismes informationnels* : les *mécanismes qui exécutent des opérations informationnelles*.

Les opérations informationnelles sont celles qui ont pour *matière d'œuvre* des informations, et non, nécessairement, toutes celles où interviennent des informations.

1^o TRANSFORMATION D'UNE INFORMATION. — La *transformation d'une information* consiste, on l'a vu, à *changer le support de l'information sans en changer la sémantique*, ou encore à *remplacer une information par une information équivalente*.

a) La transformation de l'information est presque toujours nécessaire à la transmission de l'information ;

b) La traduction d'un texte écrit d'une langue dans une autre est un nouvel exemple de transformation d'information.

On appelle *code*, la *loi de transformation d'un langage en un autre langage*.

Si l'information est univoque, le code est constitué par un ensemble de règles de correspondance de catène à catène. Tel est le cas des codes cryptographiques (langage chiffré), des codes maritimes ou des codes commerciaux.

Si l'information n'est pas univoque, comme il se présente dans la traduction d'un texte littéraire, même descriptif, il n'est plus possible, pratiquement,

de formuler un code énonçant des règles suffisantes pour assurer une bonne conservation de la sémantique. La traduction effectuée par voie humaine comporte une « assimilation », une « compréhension profonde », de la pensée de l'auteur qui semble consister en la disjonction de la sémantique et du support, pour donner un nouveau support à la sémantique sans se laisser contraindre par le premier. On est enclin à penser que la sémantique reçoit au sein de l'être humain un support différent à la fois de la langue initiale et de la langue seconde — à moins qu'elle n'ait plus de support. On peut citer ici l'expérience faite par Van der Pol, de la traduction d'un texte alternativement en anglais — français — anglais — français — anglais. Il s'agissait d'un texte de quelques pages d'anglais moderne de bon auteur sans caractère technique. Les traducteurs étaient de classe exceptionnelle. Après les cinq traductions alternées, le texte comportait plus de 80 % de phrases sans faux sens. Mais aucune phrase ne s'était moulée dans sa forme initiale.

c) *Transformation inverse*. — On appelle :

- *transformation inverse* d'une transformation d'information (ou *restitution*), une transformation, qui, appliquée à l'information résultant de la première transformation, redonne l'information initiale ;
- *transformation réversible*, une transformation d'information qui admet une transformation inverse.

Ces définitions visent des transformations techniquement réalisées ou réalisables avec les moyens actuels, à l'exclusion de la seule considération logique de la possibilité de ces transformations ; en effet, on ne peut savoir si la sémantique d'une trans-

formation est conservée ou non au cours d'une opération que l'on applique au support de cette information que si l'expérience ou une prévision par le raisonnement garantie par des expériences antérieures donnent l'assurance qu'elle est ou sera réellement conservée.

A noter aussi qu'une transformation et la transformation inverse sont généralement réalisées par des moyens techniques très différents ; par exemple, la transformation de la parole en vibration électrique est réalisée par un microphone, la transformation inverse par un haut-parleur.

2^o TRANSMISSION DE L'INFORMATION. — L'opération de *transmission d'informations* d'un point de l'espace à un autre se comprend immédiatement.

La transmission de l'information se fait, dans tous les cas, par le procédé suivant : l'information donnée est transformée, au départ, en une information de support mobile, qui est elle-même transformée, à l'arrivée, en une information de forme adaptée à l'usage auquel elle doit servir (connaissance ou action).

La transmission de l'information nécessite donc le matériel suivant :

- un *canal d'information*, système physique reliant de façon continue dans l'espace et le temps le point de départ et le point d'arrivée ;
- un *émetteur*, appareil qui transforme l'information donnée en une « modulation » du phénomène physique constituant le canal, et, en outre, crée le canal, s'il y a lieu ;
- un *récepteur*, appareil qui, d'une part recueille la « modulation » constituant l'information, d'autre part la transforme en une information de la forme demandée.

Les principaux canaux d'information sont :

- les moyens de transport de toute nature, au moyen desquels on peut transporter un document d'un point à un autre, la poste constitue un canal de cette sorte ;
- l'air, à l'état calme ou peu agité, la modulation consiste en vibrations acoustiques ;
- une vibration électrique, dans un conducteur ou un diélectrique, qui constitue la porteuse, la modulation consiste en trains d'oscillations électriques superposées à la porteuse, c'est, en particulier, sous cette forme que l'information chemine le long des nerfs.

Enfin, *l'émetteur et le récepteur doivent être accordés*, c'est-à-dire que le récepteur doit être sensible au support, modulation constituant une action physique, émis à l'autre extrémité du canal. La sensibilité du récepteur doit être suffisante pour que l'effet psychologique produit soit assez voisin de la sémantique de l'information émise, et que l'écart entre les deux soit négligeable. Le canal peut, aussi, provoquer une altération de l'information transmise.

Les altérations du support dues à des phénomènes physiques sont généralement appelées des *bruits*, terme issu des techniques téléphoniques. L'accord dû au réglage du récepteur ou à des organes automatiques (antiparasites, par exemple), annule les bruits.

3^o CONSERVATION DE L'INFORMATION. — L'opération de *conservation de l'information* consiste à *donner à la sémantique d'une information un support permanent*.

Elle consiste donc en une transformation d'infor-

mation. Il y a lieu cependant de lui donner une place à part, pour l'importance capitale que revêt cette opération dans la vie sociale : textes écrits, dessins et maquettes en relief, phonographes, enregistreurs magnétiques, circuits de retard fermés, photographie et cinéma en sont les types usuels.

4^o COMBINAISONS D'INFORMATIONS. — On appelle *combinaison d'information*, une opération qui, appliquée à plusieurs informations distinctes, a pour résultat une information distincte des informations données.

L'élaboration d'une loi physique, qui résulte généralement d'un ensemble de mesures particulières dont aucune ne figure dans l'énoncé de la loi, est un exemple de combinaison d'informations.

L'opération de combinaison d'informations vise exclusivement la combinaison des sémantiques des informations données.

Dans le cas où les informations mises en jeu sont toutes univoques, l'opération idéale de combinaison des sémantiques peut se trouver en correspondance parfaite avec une opération matérielle de combinaison des supports des informations. Le report des retenues dans une machine à calculer mécanique en est un exemple simple. La roue des unités ayant tourné successivement de nombres de dents inférieurs à 10, mais dont la somme est supérieure à 10, la roue des dizaines avance d'une dent. Les déplacements angulaires successifs de la roue des unités sont des opérations mécaniques ; il correspond univoquement à chacun de ces déplacements un nombre, écrit dans le système décimal, qui est la sémantique de l'information qui a pour support ce déplacement. Le résultat des rotations successives, qui comporte une rotation de la roue des dizaines, est aussi une opération mécanique, à laquelle corres-

pond la combinaison d'informations constituée par la somme des nombres, écrits dans le système décimal. Inversement, à chacune des sémantiques données et à l'opération de report des retenues correspondent dans la machine les opérations mécaniques décrites et nulle autre. Il revient donc au même d'effectuer l'opération idéale que constitue l'addition des nombres ou bien l'opération matérielle que constitue le déplacement des roues ; dans les deux cas, à deux nombres écrits dans le système décimal, correspond leur somme écrite dans le système décimal.

Dans le cas d'informations univoques, on peut donc, fréquemment sinon universellement, remplacer l'opération idéale de combinaison des sémantiques, par une opération appliquée aux supports des informations, qui est une opération mécanique.

5^o CRÉATION D'INFORMATIONS. — La création d'une information consiste à *associer un support et une sémantique*.

a) *Emission d'information*. — La sémantique étant d'essence psychique, le support le plus fréquemment utilisé pour convoier des idées à transmettre est un langage.

b) *Réception par l'être humain*. — Mais les actions physiques du milieu extérieur sur l'être humain qui ont pour effet psychique des *patterns* du milieu extérieur sont aussi créatrices d'information. Elles provoquent le cheminement le long des nerfs centripètes d'ondes électriques et l'on considère, dans l'état actuel des connaissances, qu'elles constituent, pour le trajet de la périphérie du corps aux centres nerveux, le support des informations qui ont ces *patterns* pour sémantique. On ignore toutefois si les *patterns* sont associés à quelque support au niveau des centres nerveux supérieurs.

c) *Appareils créateurs d'informations.* — Un compteur d'eau ou un compteur d'électricité crée une information : la quantité d'eau ou d'électricité débitée.

On se récriera que l'appareil ne pourrait créer aucune information s'il n'avait été préparé par l'homme. Certes, un appareil ou une machine qui « crée » une information a été doté d'organes appropriés. Mais ces organes, à vrai dire, sensibles à certaines actions physiques, agissent en conséquence sur des organes sensoriels de l'homme, et l'information se crée par le procédé expliqué ci-dessus. On peut donc dire :

- ou bien que l'appareil est un prolongement du système sensoriel de l'homme ;
- ou bien qu'il transmet une information qui se trouve dans le milieu à l'action duquel il est sensible.

d) *Informations objectives.* — Une information qu'on localise dans le milieu extérieur à l'homme est appelée *information objective*. La notion d'objectivité se rencontre sous deux formes, selon qu'elle concerne la création d'informations descriptives au sein de l'être humain et pour son unique usage, ou bien dans un groupe social.

Une information est *objective pour un individu, si, placé à nouveau dans la même situation, il recueille à nouveau la même information.*

Une information est *objective, si tout groupe d'hommes appartenant au même milieu social que le groupe d'hommes qui a recueilli cette information, placé dans la même situation, recueille la même information.*

Un exemple simple et typique a été donné par P. de Latil. Une petite troupe s'avance en file indienne. L'homme de tête, passant devant une

source, reconnaît qu'elle est empoisonnée et dit à l'homme qui le suit : « La source est empoisonnée » ; le second le répète au troisième, et ainsi de suite. Chacun des hommes serait capable de reconnaître, tout comme le premier, que la source est empoisonnée et, à la place du premier, il ferait la même constatation : l'information donnée par l'homme de tête est objective.

VI. — L'analogie

1. **Valeur cybernétique de l'analogie.** — La cybernétique, en tant que l'art de rendre efficace l'action, a besoin de raisonnements plus souples que ceux qui ressortissent à la catégorie des « raisons » qui prouvent. Un mouvement de pensée qui aboutit à un programme d'action efficace est pleinement satisfaisant quelle que soit la voie qu'il ait suivie, même s'il n'en a suivi aucune d'encore cataloguée. La « preuve » de sa valeur est la constatation de son efficacité. Ainsi se justifie l'élaboration d'une méthodologie du raisonnement analogique.

2. Définitions :

- *mécanismes analogues* : deux mécanismes sont analogues si certains de leurs organes se correspondent deux à deux par la condition de remplir des fonctions identiques ;
- *analogie* : au sens dénombrable, toute fonction commune à deux organes qui se correspondent dans deux mécanismes analogues ; — au sens non dénombrable, la propriété de deux mécanismes analogues.

Le principe général ci-après facilite l'analyse et la description de mécanismes analogues :

Principe général : les fonctions identiques de deux

mécanismes analogues sont désignées par le même terme, ainsi que, autant que possible, les organes correspondants.

— *modèle d'un mécanisme ou d'une fonction : mécanisme artificiel comportant certaines analogies avec un mécanisme donné et ayant pour but de faire apparaître d'autres analogies.*

Par rapport au modèle le mécanisme donné est appelé *l'original* du modèle.

Pour déterminer les caractéristiques d'une turbine hydraulique à construire, par exemple, on en construit un modèle réduit dont on fait l'essai : les mesures des grandeurs caractéristiques d'une turbine que l'on relève sur le modèle donnent des indications numériques qui servent de base aux raisonnements par lesquels on choisit les caractéristiques de la turbine projetée.

On distingue deux catégories de modèles :

- *les modèles physiques, modèles dont les organes sont des systèmes matériels en interaction ;*
- *les modèles dialectiques, modèles constitués par la logique de l'original, décrite dans un langage.*

La condition, qui pourrait paraître inutilement restrictive, que la logique de l'original soit « décrite dans un langage » trouve sa justification dans la distinction déjà faite entre information discursive et *pattern*.

3. Simulateur. — Une place à part doit être faite aux simulateurs, que l'on confond souvent avec des modèles.

Un *simulateur* d'un mécanisme ou d'une fonction, est un *mécanisme matériel ayant pour seule analogie avec l'original d'atteindre le même but.*

Par exemple, dans l'organisation d'exercices de tir contre avion, on peut disposer d'un avion qui se déplace selon un programme imposé (trajectoire et vitesse fixées à l'avance), d'un radar qui l'observe et mesure à chaque instant des grandeurs caractéristiques de la position de l'avion (distance, azimuth et site), et d'un mécanisme transmettant ces données numériques à une machine à calculer qui détermine la position à donner aux pièces, l'instant et le rythme de la mise à feu. Mais on peut remplacer l'avion et le radar par une machine à calculer auxiliaire, à qui l'on fournit le programme de vol de l'avion et qui élabore les données numériques résultant des mesures qu'aurait faites le radar. Cette machine à calculer auxiliaire est un « simulateur de vol d'avion ». Son rôle, évident, est de simplifier les opérations auxiliaires de l'essai du matériel de tir, et nullement, comme serait le rôle d'un modèle, de faire apparaître des propriétés jusqu'alors inconnues du système avion-radar.

4. **La mentalité.** — La notion de mentalité, au sens de la cybernétique, est le résultat d'un raisonnement typiquement fondé sur une analogie. Elle a été progressivement dégagée par le neurologue anglais Grey Walter, au cours de diverses études.

1° L'un des termes de l'analogie est la *fonction d'assimilation*, considérée par les biologistes.

Le tube digestif transforme par voie chimique des matériaux, les aliments, en des produits différents, le chyle notamment, et les déverse dans le sang. L'appareil respiratoire puise dans l'air l'oxygène nécessaire et débarrasse le sang du gaz carbonique. Le sang est encore épuré par l'action des reins, des glandes sudoripares, et d'autres organes. Et le système circulatoire le transporte jusque dans les

parties les plus profondes de l'organisme, où il fournit aux cellules les matières nécessaires à leur activité. Ces opérations s'exercent sur des données, le sang, l'air, les aliments ; elles produisent des résultats. Caractériser les résultats est plus difficile que de caractériser les données : le sang fournit, par exemple, du glycogène au foie et aux muscles qui le mettent en réserve, de l'électricité aux noyaux neuroniques. La physique a dégagé la notion d'une entité, l'*énergie*, qui peut être *conservée* par des êtres matériels divers, être *transmise* des uns aux autres, ce que l'on appelle des *transformations* de l'énergie en attribuant à l'énergie des formes correspondant aux êtres matériels qui la conservent : énergie mécanique, énergie chimique, énergie électrique, énergie thermique, etc. Dans cette terminologie, on peut dire que les organes constitués par le tube digestif, l'appareil respiratoire, le système circulatoire, ont pour *matière d'œuvre* l'énergie, qu'ils extraient des données constituées principalement par l'air et les aliments, et qu'ils fournissent aux autres organes. La fonction de ces organes est de donner à l'énergie, reçue sous forme d'énergie chimique, les formes qui conviennent à chaque cellule : cette fonction est la fonction d'*assimilation*.

Or, il est une autre matière d'œuvre que l'organisme reçoit du milieu extérieur, au même titre que l'énergie : c'est l'information. Toutes les opérations informationnelles, transmission, conservation, combinaison d'informations, l'être humain, au profond de lui-même, peut les réaliser. A ces opérations, qui s'appliquent à une matière d'œuvre particulière et clairement définie, Grey Walter fait correspondre une fonction biologique particulière, qu'il a appelée la fonction de *mentalité*, ou par abréviation, la *mentalité*.

La fonction de mentalité peut être considérée, à l'instar des autres fonctions biologiques, comme constituée de fonctions composantes. Chacun des organes de la fonction d'assimilation a sa propre fonction, digestion, respiration, circulation ; cette fonction peut aussi être attribuée à l'opération qu'effectue cet organe. On pourra définir de même une fonction relative à chaque opération informationnelle.

2° On définit ainsi, de façon précise :

- *mémoire* : fonction qui assure la conservation des sémantiques des informations recues ;
- *imagination* : fonction qui assure la combinaison des sémantiques ;
- *volonté* : fonction qui élabore les décisions ;
- *mentalité* : fonction dont la mémoire, l'imagination, la volonté sont des fonctions composantes ;
- *mémorisation* : opération qui réalise la fonction de mémoire ;
- *imagination* : opération qui réalise la fonction d'imagination ;
- *commande* ou *commandement* : opération qui réalise la fonction de volonté ;
- *opération mentale* : opération qui réalise une fonction de mentalité.

3° La notion de mentalité conduit à diverses remarques :

a) Les fonctions biologiques prises pour terme de comparaison correspondent à des opérations réalisées par des *organes* : les organes de la circulation, par exemple, sont, principalement, le sang, le cœur, les artères et les veines ; ceux de la digestion, le tube digestif, les glandes annexes. Or aucun organe n'a été attribué à la fonction de mentalité. Mais la

biologie n'est pas encore bien assurée des fonctions de certains organes, ou des organes auxquels il faut attribuer certaines fonctions : Claude Bernard a découvert la fonction glycogénique du foie, on a découvert ensuite que les muscles possèdent aussi cette fonction. Pour les fonctions de mentalité, on peut seulement dire, dans la situation du moment, que leur siège biologique est le système nerveux (y compris les synapses, c'est-à-dire, peut-être, une grande partie du tissu interstitiel). Cette situation est certes regrettable du point de vue de la connaissance profonde de l'être vivant. Mais ce point de vue n'est pas exactement celui de la cybernétique. L'analyse des conditions de l'action, et l'établissement d'un programme d'action n'exigent pas la spécification détaillée des agents d'exécution. Le système des agents d'exécution prête à des variantes, entre lesquelles le programme laisse choisir : l'être vivant lui-même, au moins de structure assez complexe, peut remplacer un geste par un autre, et une partie blessée de son corps par une autre partie, même lorsque l'organe blessé appartient à l'encéphale. C'est donc au moyen d'autres concepts que ceux qui définissent les agents d'exécution d'une action que cette action s'organise. Ces concepts sont les fonctions qui interviennent, doivent ou devraient intervenir dans l'action. Grey Walter et les cybernéticiens qui le suivent ne donnent point d'autre valeur aux notions groupées sous le terme général de mentalité. Dépouillées des évocations dont une métaphysique ou une théorie psychologique peut nuancer les termes qui les désignent, elles prennent la valeur de notions objectives, à l'usage des cybernéticiens.

C'est en ce sens que la cybernétique les considère comme des *fonctions biologiques*.

b) Ces notions permettent, par application du

principe général, d'énoncer pour les opérations informationnelles que peuvent réaliser certains mécanismes des analogies correctes, écartant d'avance toute ingérence d'autres notions dans les relations entre les êtres et les événements : la mémoire d'un mécanisme reste la fonction qui consiste à conserver des informations, l'imagination est la fonction qui consiste à combiner des informations. On pourra donc parler de la mémoire d'une machine à calculer, de l'imagination d'une machine à jouer aux échecs, sans crainte d'empiétement sur les « facultés de l'esprit humain ».

c) La décomposition de la fonction de mentalité en trois fonctions composantes principales vaut pour la situation du moment, mais peut se modifier au cours d'études nouvelles.

Dès à présent, l'individualité de la fonction de volonté n'est pas admise par tous les biologistes. Grey Walter lui-même estime que la décision est le résultat d'une combinaison d'informations. Comme telle, elle ressortirait à la fonction d'imagination. On a préféré ici conserver son individualité à la fonction de volonté, dans le souci que le modèle constitué par la notion de mentalité reste plus voisin des notions couramment admises. Un autre argument est que les informations dites motrices ne sont déclenchées, dans l'être humain, qu'après qu'a été prise la décision d'agir. La fonction de décision aurait alors pour caractéristique que ses résultats sont les informations motrices.

VII. — Propos d'étape

Une première analyse des éléments où s'alimente la pensée cybernétique a donné les notions de base. Comment les utiliser pour « assurer l'efficacité de

l'action » ? Quels résultats ont été obtenus jusqu'à présent, assez marquants pour justifier que l'on s'attache aux méthodes de pensée cybernétique ? Telles sont les questions auxquelles seront consacrés les chapitres suivants.

CHAPITRE III

LA PENSÉE CYBERNÉTIQUE

Fonction d'un raisonnement. — On peut au départ caractériser l'activité mentale par sa fonction : elle sert généralement à prouver, ou à convaincre. De toute façon, elle est un moyen d'action, un mécanisme dont on peut analyser la *structure* et le *fonctionnement*.

I. — Classifications

1. **Classes.** — Les connaissances sont réparties en *classes*.

Une classe est l'ensemble des êtres qui ont un même jeu d'attributs, que l'on appelle les propriétés de la classe.

L'ensemble des propriétés d'une classe est appelé la *compréhension* de cette classe.

On dit que les propriétés d'une classe s'*appliquent* à chacun des êtres qui la constituent, et que la classe, en tant qu'ensemble d'êtres, est le *domaine d'application* ou l'*extension* de l'ensemble de propriétés qui en constitue la compréhension.

2. **Définitions d'une classe.** — On dit que :

1° Un ensemble de propriétés d'une classe qui n'appartient qu'à cette classe constitue une *définition*.

tion. Si l'attention s'attache à la définition, les propriétés de définition sont dites *caractéristiques* ;

2° Une énumération de propriétés non limitée à une définition constitue une *description*.

Une classe peut avoir plusieurs définitions. Ces définitions sont dites *définitions équivalentes*.

Les propriétés de définition sont appelées *propriétés essentielles* ; les autres, *propriétés accidentelles*.

On dit souvent que les propriétés accidentelles sont des *conséquences* des propriétés essentielles, ou bien que les propriétés essentielles *entraînent* ou *impliquent* les propriétés accidentelles.

3° Les éléments d'une classe possèdent, tous, toutes les propriétés de la classe. Si l'on ne considère que ces propriétés, les éléments de la classe sont indiscernables et interchangeables : on peut prendre l'un de ces éléments comme définition de la classe, on dit alors que la classe est définie par un *spécimen*.

Il faut entendre que les propriétés du spécimen considérées sont aussi, et exclusivement, celles de la classe.

3. Classification. — Une classe d'êtres peut jouer le rôle d'un être particulier, et, notamment, devenir un élément d'une autre classe.

1° Cette nouvelle classe est *définie par les propriétés communes à plusieurs classes*. Sa définition est *abstraite* des définitions des classes données (ou « par rapport » aux définitions...), elle *s'obtient en négligeant des propriétés de chacune des classes données*. Les définitions des classes données sont *concrètes* par rapport à celle de la nouvelle classe.

2° La compréhension de la nouvelle classe est *moindre* que celle d'une classe donnée quelconque (du moins non supérieure) ; son *extension* est *plus*

grande (du moins non inférieure). On dit que la nouvelle classe est *plus générale* que chacune des classes données.

3^o Les classes composantes d'une classe plus générale sont appelées des *sous-classes* de cette dernière, et l'on dit qu'une sous-classe est *incluse* (ou *contenue*) dans la classe considérée.

4^o Les êtres peuvent donc être groupés en classes de telle sorte que chaque classe soit incluse dans une classe plus générale et contienne des classes moins générales. Un tel édifice est appelé une *classification*.

Les attributs des êtres classés appartiennent eux-mêmes à des classes d'attributs que l'on appelle des *critères de classification*. Le tableau des critères d'une classification constitue une *systématique*.

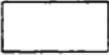
5^o *Un même être peut appartenir à plusieurs classifications.*

4. **Exemples.** — Les êtres géométriques qui possèdent les attributs suivants : quatre côtés, côtés deux à deux parallèles, côtés opposés égaux, diagonales se coupant en leur milieu, angles droits, inscriptible dans un cercle constituent la classe des rectangles ; ces attributs sont les propriétés de la classe des rectangles ; leur ensemble constitue la compréhension de cette classe. Un rectangle particulier, par exemple celui dont les côtés ont pour longueur 20 cm et 15 cm, possède les propriétés énumérées ; ces propriétés lui sont applicables.

Les propriétés ci-après : quatre côtés, côtés deux à deux parallèles, angles droits, sont des propriétés caractéristiques de la classe des rectangles ; elles en constituent une définition. Si on y ajoute côtés opposés égaux, inscriptible dans un cercle, on obtient une description de la classe des rectangles. Le tableau suivant montre trois définitions de la classe

des rectangles, en séparant les propriétés essentielles correspondantes des propriétés accidentelles.

	Propriétés essentielles	Propriétés accidentelles
Première définition	Quatre côtés, côtés deux à deux parallèles, un angle droit.	Côtés opposés égaux, diagonales se coupant en leur milieu, inscriptible dans un cercle.
Deuxième définition	Quatre côtés, diagonales se coupant en leur milieu, un angle droit.	Côtés opposés égaux, côtés deux à deux parallèles, inscriptible dans un cercle.
Troisième définition	Quatre côtés, inscriptible dans un cercle, deux angles droits consécutifs.	Côtés deux à deux parallèles, côtés opposés égaux, diagonales se coupant en leur milieu.

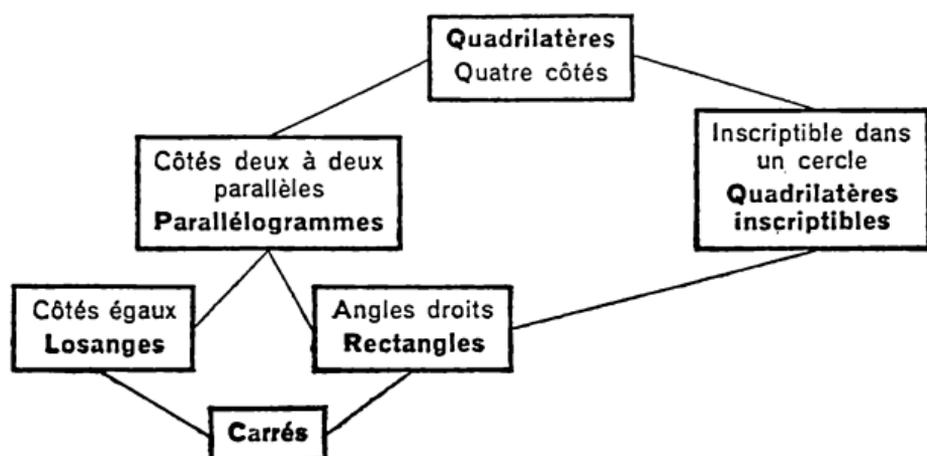
Une définition par spécimen consiste dans la figure d'un rectangle particulier : 

Si l'on retient seulement, de la première définition, les caractères : quatre côtés, côtés deux à deux parallèles, on définit la classe des parallélogrammes, qui contient la classe des rectangles (et aussi d'autres classes, celle des losanges notamment).

Si l'on retient seulement, dans la définition des parallélogrammes le critère, quatre côtés, on définit la classe des quadrilatères.

Si l'on retient seulement, dans la troisième définition des rectangles, les caractères : quatre côtés, inscriptible dans un cercle, on définit la classe des quadrilatères inscriptibles.

La classe des quadrilatères peut donc se subdiviser en sous-classes de deux façons qui donnent les classifications suivantes :



La classe des rectangles appartient à deux classifications différentes des quadrilatères, la classe des carrés à 3 classifications différentes.

Les catégories d'attributs : nombre de côtés, inscription dans un cercle, angles droits, égalité des côtés, sont les critères de l'une de ces classifications. L'ensemble de ces catégories d'attributs en constitue la systématique.

5. Comparaison. Sélection. — L'opération de *comparaison* (ou d'*identification*) consiste à déterminer quels attributs d'un être appartiennent aussi à un autre être. Une comparaison a donc pour résultat l'analogie, fonctionnelle et structurale, des deux êtres, c'est-à-dire l'ensemble de leurs attributs communs.

Si l'un des deux êtres est une classe, et si la comparaison concerne les attributs caractéristiques des deux êtres, elle est appelée *sélection*. Selon le but poursuivi, on sélectionne soit les classes auxquelles appartient un être déterminé, soit les êtres

appartenant à une classe déterminée. Une sélection du premier type est un élément essentiel d'un raisonnement ; une sélection du second type a pour résultat le domaine d'application de la définition de la classe considérée.

II. — Le raisonnement déductif

1. **Mécanisme d'un raisonnement déductif.** — Un *raisonnement déductif* consiste :

- à *sélectionner une classe à laquelle appartient un être déterminé ;*
- puis à *attribuer à cet être des propriétés accidentelles de la classe.*

Exemples. — Le raisonnement du médecin : sélectionner une classe de maladies à laquelle appartient le cas en question, défini par l'ensemble d'attributs que constituent les signes et symptômes observés, et appliquer à ce cas une thérapeutique attachée à la classe de maladies sélectionnée.

— Le raisonnement du juriste : sélectionner une classe de cas, répertoriés dans les textes de lois, de doctrine ou de jurisprudence, à laquelle appartient le cas particulier en cause, et appliquer à ce cas une décision indiquée ou suggérée par la classe de cas sélectionnés.

— Le raisonnement du mathématicien : sélectionner une classe d'êtres à laquelle appartient l'être considéré, au moyen des propriétés essentielles de cet être, et lui attribuer les propriétés accidentelles de cette classe : par exemple, on constate qu'un quadrilatère appartient à la classe des parallélogrammes parce que ses côtés opposés sont parallèles, et on affirme (ou conclut) que ses diagonales se coupent en leur milieu.

2. **Efficacité d'un raisonnement déductif.** — Le but d'un raisonnement se manifeste dans son mécanisme : c'est de découvrir quelque propriété d'un être que l'on étudie.

1^o **RIGUEUR DU RAISONNEMENT.** — Une première condition d'efficacité d'un raisonnement tient aux opérations dont il est constitué, qui doivent être effectuées correctement. On dit alors que le raisonnement est *rigoureux*.

Les fautes contre la rigueur les plus fréquentes sont :

a) Dans la sélection d'une classe à laquelle appartient un être, oublier l'un des attributs caractéristiques de la classe ;

b) Dans l'attribution de propriétés à l'être étudié, prendre pour propriété de la classe une propriété qui appartient seulement à une sous-classe.

Par exemple : a) Prendre pour définition de la classe des parallélogrammes : côtés opposés parallèles et égaux, oubliant la convexité du quadrilatère ;

b) Dire que la figure classée parallélogramme a ses diagonales égales, alors que cette propriété est propre à la sous-classe des rectangles.

2^o **PUISSANCE DE LA CLASSE.** — Une deuxième condition d'efficacité d'un raisonnement tient à la structure de la classification sur laquelle il s'appuie. Si les classes dont est constituée cette classification possèdent peu de propriétés accidentelles, un raisonnement faisant appel à ces classes ne pourra guère faire apparaître de propriétés nouvelles de l'être étudié.

On dira donc qu'une classe est plus puissante qu'une autre si ses propriétés accidentelles sont plus nombreuses.

3^o FINALITÉ D'UNE CLASSIFICATION. — La notion de la puissance d'une classe est étroitement liée à la finalité de la classification à laquelle elle appartient.

Une classification est faite pour un but déterminé.

Par exemple, la zoologie classe les poissons en familles, genres, espèces, variétés, selon les critères que l'on sait, tandis que l'art culinaire les classe en comestibles et non-comestibles, et les comestibles en maigres, gras et demi-gras. Et les critères de comestibilité et de richesse en lipides ne font pas partie de la systématique de la zoologie.

Dès lors une condition d'efficacité d'un raisonnement est qu'il s'appuie sur une *classification établie pour le même but que le raisonnement.*

3. **Théories. Technologies.** — 1^o Une classification dont les classes ont des définitions qui s'impliquent les unes les autres constitue une *théorie*.

Les théories s'établissent de deux manières :

- ou bien, disposant d'êtres dont les caractères ont été observés, on constitue des classes de plus en plus abstraites dans lesquelles on fait entrer ces êtres ;
- ou bien on se donne la définition de la classe la plus abstraite et l'on en construit des sous-classes en ajoutant à la définition d'une classe des propriétés arbitrairement choisies sous condition de non-contradiction.

Les théories de la première espèce sont souvent appelées *théories empiriques*. Elles sont voisines des classifications des naturalistes. Elles ont pour fondement des modèles dialectiques élémentaires d'êtres extérieurs à l'homme.

Les théories de la seconde espèce sont appelées *théories axiomatiques*. Elles sont voisines des théories mathématiques. Elles ont pour fondement les modèles dialectiques d'êtres imaginés par l'homme.

2^o Les attributs qu'il faut ajouter à la compréhension d'une classe d'êtres pour obtenir la compréhension d'une sous-classe constituent la *technologie* de cette sous-classe pour la classe considérée. Généralement, on ne considère qu'une seule classification et l'on définit la technologie d'une sous-classe pour la classe la plus abstraite : le terme de technologie est alors employé dans un sens absolu.

4. Relations entre théorie et technologie. —

1^o Dans la construction d'une théorie, les propriétés technologiques d'un être sont négligées quand on le considère comme appartenant à une classe. Ces propriétés ne sont pas des conséquences de la définition de cette classe. Par suite :

— *un raisonnement déductif ne peut pas retrouver les propriétés technologiques négligées dans la constitution de la théorie.*

Par exemple, les théories de la résistance des matériaux qui servent au calcul d'un pont supposent le terrain sur lequel le pont repose parfaitement rigide et infiniment résistant, négligeant les propriétés du terrain qui tiennent à sa nature physico-chimique. Le calcul d'un pont particulier par les méthodes de la résistance des matériaux ne peut retrouver ces propriétés et en tenir compte.

2^o Les théories déductives — qui composent la quasi-totalité des théories scientifiques — ne représentent que très imparfaitement les phénomènes observés, parce que, en vue de sauvegarder l'édifice de raisonnements que la théorie constitue :

- ou bien on néglige des phénomènes observés qui ne rentrent pas dans la théorie ;
- ou bien on attribue à des êtres observés, pour leur permettre d'entrer dans la théorie, des propriétés qu'ils ne possèdent pas.

Comme exemple du premier cas : le phénomène dit « de l'entraînement de l'éther par la matière », découvert par Fizeau au milieu du XIX^e siècle, avait disparu de tous les cours de physique parce qu'il n'était pas explicable par la théorie ondulatoire de la lumière, jusqu'à ce que Einstein l'explique par la théorie plus générale de la relativité, vers 1912.

Comme exemple du deuxième cas : lorsque la théorie ondulatoire de la lumière eut représenté les phénomènes lumineux par des équations de même forme que les équations des vibrations mécaniques, on postula l'existence d'un être physique particulier, l'éther, qui représentait « la chose qui vibre », auquel on accepta d'attribuer des propriétés contradictoires selon les phénomènes considérés.

Une théorie est donc un édifice dialectique établi à propos de phénomènes observés, mais qui ne constitue pas une image fidèle de ces phénomènes.

Les théories sont établies par quelques hommes et acceptées par les autres, soit après vérification de leur objectivité, soit par obligation scolaire. De toute façon, *les théories* — les théories scientifiques autant que les autres — *sont des conventions sociales*.

3^o Les diverses classes en lesquelles on range les êtres naturels constituent des êtres nouveaux auxquels on attribue un symbole ; par exemple : les mammifères, les poissons.

a) Dans une théorie axiomatique, les classes sont des résultats de raisonnements déductifs. On leur attribue encore un symbole. Lorsqu'il s'agit de raisonnements dont les hypothèses sont des symboles ou des modèles dialectiques d'êtres naturels, il est commode de préférer, pour le résultat du raisonnement, un symbole rappelant les hypothèses ; mais ce symbole évoque alors, à l'usage, ou même dans l'esprit de son créateur, un *pattern* que l'on considère

comme celui d'un être naturel. On appelle ce *pattern* une *réification* de sa définition.

Par exemple, ayant observé que tous les gaz, dans les conditions courantes, vérifient à peu près la loi $PV = RT$, où P, V, T sont la pression, le volume et la température du gaz, R une constante universelle, on appelle « gaz parfait » un être physique qui vérifie *exactement* la loi $PV = RT$. Le terme de « gaz parfait » évoque le *pattern* d'un être matériel de la classe des gaz ; ce *pattern*, que l'on suppose implicitement être celui d'un être existant véritablement, est une réification de la formule $PV = RT$.

b) Une réification se construit donc en ajoutant à un résultat théorique une technologie imaginée. Mais l'être d'imagination ainsi construit peut ne pas exister physiquement. Il faut donc distinguer :

- l'*existence physique* (ou *réelle*), qui est celle d'un être dont *les attributs de définition sont observables* par les moyens physiques connus ;
- l'*existence fictive*, que l'on peut attribuer à un être dont *les attributs de définition ne sont pas contradictoires avec les lois des êtres naturels*.

Une réification d'une théorie passe de l'existence fictive à l'existence physique par une *vérification expérimentale*.

c) Les romans de science-fiction mettent en jeu des réifications de lois naturelles ou de leurs conséquences logiques, qui ont seulement une existence fictive.

d) La science use couramment de réifications qui n'ont qu'une existence fictive. Tel est le cas des êtres définis comme *causes* de phénomènes physiques : la chaleur, cause des variations de température, les forces, causes des variations de vitesse,

la lumière, cause des phénomènes qu'étudie l'optique. Denis Gabor a présenté en 1955 une théorie des phénomènes optiques dans laquelle la « substance » communément appelée lumière n'a aucune part.

Les causes considérées par les sciences de la nature sont définies par des attributs communs à un ensemble d'êtres d'existence physique : par exemple, la « chaleur » est la propriété commune aux systèmes physiques (réchaud, radiateur, bain-marie, etc.), capables d'agir sur un thermomètre. Cette action s'exprime en disant que : « Un apport de chaleur à un corps implique une élévation de la température de ce corps » (sauf cas de modification d'état). L'implication apparaît donc comme l'expression dialectique de la relation de cause à effet. On peut donc distinguer deux catégories de théories : — les *théories causales*, qui expriment l'action d'un être d'existence physique ; — les *théories explicatives*, qui décrivent des relations entre des êtres physiques et aussi des êtres dont l'existence physique n'est pas établie.

5. Efficacité des théories. — L'efficacité d'une théorie dans un raisonnement dépend du but visé. L'activité mentale de l'homme se propose l'une ou l'autre de deux fins :

- accroître les connaissances de l'individu ;
- préparer ou guider une action de l'individu sur le milieu extérieur ;

ou bien l'une et l'autre à la fois.

Les termes de « méditation » et d' « action » distinguent généralement l'une de l'autre ces deux activités dans la langue courante, bien que la méditation soit une action de l'homme sur sa propre mentalité, notamment lorsqu'elle a pour résultat un accroissement des connaissances. L'activité de

méditation a pour l'un de ses résultats l'édification de classifications et de théories, généralement de théories explicatives. Une théorie explicative, quelles que soient les fictions qu'elle comporte, satisfait le désir de savoir.

L'action sur le milieu extérieur exige la connaissance la plus complète et la plus détaillée possible de ce milieu. En particulier, les propriétés technologiques des êtres ne peuvent être négligées car elles risquent d'intervenir de façon décisive : l'importance, pour la construction d'un pont, des propriétés technologiques du terrain sur lequel le pont sera édifié est un exemple typique.

Quelque observation conduit aux propositions suivantes, qui ont la valeur de lois expérimentales :

1^o POUR L'ACTION SUR LE MILIEU EXTÉRIEUR :

- *une théorie est d'autant moins efficace qu'elle est plus abstraite ;*
- *le guidage d'une action exige la connaissance de la technologie du milieu sur lequel s'exerce l'action ;*
- *les lois de la nature constituent des limites que doit respecter l'imagination créatrice de l'homme dans l'élaboration de programmes d'action.*

C'est exceptionnellement que les lois de la nature peuvent prendre la forme de règles techniques. Ce cas ne se rencontre presque jamais dans l'action sur un milieu à comportement aléatoire, notamment dans l'action de l'homme sur l'homme.

2^o POUR LA CONNAISSANCE :

- *une classification est d'autant plus efficace qu'elle facilite davantage la mémorisation ;*
- *une théorie axiomatique, qui paraît se réduire à la connaissance d'un système d'axiomes et de règles de logique, est préférable à une théorie empirique ;*

— *il faut retenir, toutefois, qu'une théorie axiomatique n'atteint que des réifications de ses énoncés, qui possèdent seulement les propriétés de la classe la plus compréhensive à laquelle ils appartiennent, et n'ont d'existence réelle que sous réserve de vérification expérimentale.*

III. — Le raisonnement analogique

1. **Classes et modèles.** — La sélection d'une classe contenant un être donné revient à la détermination d'analogies entre l'être donné et l'être que constitue cette classe. Ces deux êtres sont remplacés, pour le raisonnement, par leurs définitions. On applique ainsi la règle d'or donnée par Pascal à propos de la démonstration mathématique : « Remplacer le défini par la définition. » Et cette règle, qui suppose un « défini » qui soit un être, rappelle qu'une classe est, dans son utilisation courante, conçue sous la forme d'un spécimen.

Un modèle, être que l'on construit selon les besoins, le munissant d'éléments analogues à des éléments de l'être que l'on explore, ne diffère en rien, pour l'usage que l'on en fera, du spécimen d'une classe prise dans une classification déjà établie. Au reste cet être artificiel peut être considéré comme le spécimen d'une classe dont l'extension n'est pas encore précisée.

Toutefois la sélection d'une classe contenant un être particulier établit l'*identité des propriétés caractéristiques* des deux êtres, ce qui justifie d'attribuer à l'être particulier les propriétés accidentelles de la classe. Quand on construit un modèle, on fait en sorte qu'il possède des propriétés de l'être étudié, qui sont autant d'analogies entre ces deux êtres. Mais ces propriétés ne constituent généralement,

ni une définition de l'original, ni une définition du modèle. Par suite, les propriétés accidentelles du modèle que l'on peut observer ne sont pas nécessairement des propriétés de l'original.

2. Mécanisme du raisonnement analogique. — Le raisonnement alors effectué comprend quatre phases :

1° *Construction d'un modèle* ;

2° *Mise en fonctionnement du modèle*, qui fait apparaître des propriétés de ce dernier ;

3° *Réification des propriétés du modèle nouvellement découvertes* ;

4° *Vérification* que les réifications appartiennent à l'original.

On appelle un tel raisonnement un *raisonnement analogique*.

3. Efficacité d'un raisonnement analogique.

1° Par comparaison avec un raisonnement déductif, un raisonnement analogique présente les avantages suivants :

a) *On peut mettre dans un modèle des propriétés technologiques négligées par la théorie.*

Cet avantage est particulièrement marqué s'il s'agit d'un modèle physique.

b) *Les éléments dont on constitue un modèle peuvent être pris dans des classifications différentes.*

L'imagination créatrice a libre disposition de toutes les connaissances, sans observer les barrières et les limites constituées par leur répartition en catégories préétablies : physique, chimie, biologie, psychologie, etc.

c) *Le fonctionnement du modèle permet d'observer des propriétés du modèle qui ne figurent pas encore dans les classifications établies.*

Le fonctionnement d'un modèle dialectique est une opération mentale ; il peut provoquer la découverte de propriétés comme résultats de raisonnements. Le fonctionnement d'un modèle physique est une opération physique : il peut provoquer la découverte de propriétés sous forme de *patterns* de connaissance immédiate. Il arrive souvent que le modèle physique atteigne des propriétés que ne peut atteindre le raisonnement. Tel est le cas des machines à calculer analogiques (calcul rhéostatique, analyseurs différentiels) qui font des opérations d'analyse mathématique qui ne peuvent être effectuées autrement.

En bref, *le raisonnement analogique permet de découvrir des propriétés de l'original qui ne peuvent être déduites des théories.*

2° Un raisonnement analogique ayant pour élément essentiel un modèle, on peut énoncer quelques conditions pour qu'un modèle soit efficace.

a) *Un modèle doit être fidèle.* On veut entendre par là qu'il doit y avoir entre le modèle et l'original des analogies suffisantes pour que les suggestions faites par le fonctionnement du modèle soient valables pour l'original.

On notera que la fidélité d'un modèle est un attribut qualitatif autant que quantitatif. Un exemple typique de modèle insuffisamment fidèle est le « Canard de Vaucanson ». Cet animal artificiel bien connu n'a pas été conçu, comme on le dit communément, comme un jouet de la lignée des automates de l'époque, mais bien, à la demande de médecins, comme un modèle pour servir à l'étude de la digestion. L'animal artificiel picore, broie les grains et expulse le produit, donnant une image des phénomènes mécaniques de la digestion. Mais la digestion est essentiellement faite de phénomènes chimiques,

dont le « canard » ne donne aucune image. Modèle peu fidèle, il n'a rien suggéré.

b) *Un modèle doit être simple.* Cette notion de simplicité est souvent prise dans un sens relatif, étant entendu que de deux modèles comportant les mêmes analogies avec un original, il faut préférer le plus simple.

c) *Ne pas oublier qu'une analogie est fonctionnelle.* Cet énoncé est une condition de prudence dont l'utilité tient à ce que les analogies de structure se réduisent généralement à des images, voire des dessins semblables, auxquels on suppose le même fonctionnement.

d) *Le fonctionnement d'un modèle doit respecter les lois naturelles vérifiées par l'expérience.*

Cette condition joue plus particulièrement dans le fonctionnement des modèles dialectiques.

IV. — La pensée cybernétique

1. **Caractères.** — L'analyse précédente fait apparaître les traits caractéristiques d'un type particulier d'activité mentale, que l'on appellera la *pensée cybernétique* :

- 1° *Son but : l'efficacité dans le guidage de l'action ;*
- 2° *Sa méthode : le raisonnement analogique.*

2. **La connaissance cybernétique.** — La pensée cybernétique organise d'une façon particulière, dans la construction de chaque modèle, les éléments de connaissance qu'elle met en œuvre. La codification de ces raisonnements et de leurs résultats constitue, à partir des informations données par les sens, un édifice de connaissances que l'on appellera la *connaissance cybernétique*.

La connaissance cybernétique retient :

- *principalement, au titre de matière d'œuvre de l'imagination inventive, les modèles du milieu extérieur à la mentalité dont l'expérience peut vérifier l'objectivité, et les modèles de divers degrés d'abstraction qui leur sont reliés par des relations causales ;*
- *complémentairement, pour contrôle de l'efficacité des raisonnements, les lois de la nature expérimentalement vérifiées quel que soit leur degré d'abstraction ;*
- *et même, au titre d'information individuelle, des patterns qui n'ont pas la forme de modèles dialectiques.*

3. Domaine d'application. Domaine d'efficacité.

— De façon générale, c'est autour des buts que l'on a pu atteindre jusqu'à présent que se construiraient les modèles retenus pour figurer dans un tableau cybernétique des connaissances, sous la forme la plus propre à provoquer l'invention.

1° A chaque concept, modèle, théorie ou symbole, est ainsi associé :

- son *domaine d'application* ;
- son *domaine d'efficacité*, qui est l'ensemble des êtres auxquels ce concept peut être appliqué avec efficacité.

Les activités qui se développent au cours du temps modifient le domaine d'application et le domaine d'efficacité d'un concept. Tenant compte de cette observation :

2° *Un tableau cybernétique des connaissances doit présenter chaque modèle accompagné de son domaine d'efficacité.*

CHAPITRE IV

L'IMPACT DE LA CYBERNÉTIQUE

Préliminaires. — Un trait caractéristique de la pensée cybernétique est de prendre les éléments avec lesquels elle construit un modèle en tout domaine des connaissances où il peut se trouver. Elle est indifférente aux catégories établies.

Elle est particulièrement apte, par suite, à découvrir entre les phénomènes des relations nouvelles qui constituent, *in se*, de nouveaux éléments de connaissance, et, si elles sont efficaces au sein d'une recherche finalisée, de nouveaux éléments de connaissance cybernétique.

Un tableau des questions où la pensée cybernétique peut apporter une contribution ne saurait donc être ni classifié, ni complet. Dans les pages qui suivent on trouvera, classés par centre d'intérêt, des résultats nouveaux ou quelque aspect nouveau de résultats connus dus à la cybernétique.

I. — Les machines

1. **La notion de machine.** — Les machines constituent une classe de mécanismes répondant à la définition que voici :

Une machine est un mécanisme physique artificiel

finalisé dont le but est de remplacer l'homme dans l'exécution d'une action.

Cette définition, dont les attributs appartiennent aux notions de base de la cybernétique, se retrouve, de façon plus ou moins complète, dans toutes les définitions qui ont été proposées au cours du temps.

Pour Monge, qui, le premier, énonça une définition dans son cours de l'Ecole polytechnique, en 1808, les machines 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 voulus. La machine à vapeur et les systèmes de corps matériels en mouvement conduisirent peu à peu à séparer la « théorie » d'une machine de sa « description ». La conviction était établie, en 1864, avec Haton de La Goupillère, que l'invention d'une machine n'était que l'application de théories « scientifiques » à des mécanismes particuliers. Et Reuleaux, en 1877, proposait un tableau des mécanismes en forme de théorie déductive formalisée. Par exemple, une transmission par poulies et courroies s'écrivait :

$$T_p^\pm \dots \cong < \dots, T_p^\mp, R^+ \dots | \dots C^+ = \\ C^- \dots || \dots C^- = C^+ \dots | \dots R^+$$

Le terme de « machine » désigne seulement, dans la conception de cette époque, un mécanisme soumis à des efforts (termes pris au sens de la résistance des matériaux). Mais Maurice d'Ocagne découvrait en 1895 la belle collection de machines à calculer du Conservatoire des Arts et Métiers, et, ne pouvant les expliquer comme application d'aucune théorie de la mécanique, il empruntait ses critères de classification à la biologie, parlant d'une « anatomie comparée de ces machines ». L'étude de cette classe de machines apparaissait ainsi comme objective, rationnelle. Elle était dans la ligne de la pensée de Reuleaux, pour qui, dans une machine à vapeur, la vapeur ne fait pas partie de la machine. Mais comment prétendre que, dans une fusée, où le fluide est le seul élément interne mobile, ce fluide ne fait pas partie de la machine ? Dès lors, tandis que des mathématiciens, tel Turing, poursuivaient l'édification d'une théorie axiomatique d'êtres de fiction qu'ils appelaient des machines, Kœnigs, dès 1905, rappelait que les machines étaient construites par l'homme, disant : « Le machinisme est une véritable zoologie artificielle où le créateur est l'homme lui-même, guidé par une large et mystérieuse intuition », et

Louis Couffignal marquait, en 1938, que l'impact de l'homme consistait aussi à munir ses machines d'une finalité. La cybernétique est venue ensuite, qui a précisé les notions de base et donné la définition énoncée en tête de ce paragraphe.

Une machine est un mécanisme *physique*. Dès l'origine, on a désigné une machine soit par le résultat qu'elle doit obtenir ou l'opération qu'elle doit effectuer à la place de l'homme, soit par le matériau qu'elle doit œuvrer. On dit, pour le premier cas : perceuse, machine à coudre, moteur ; pour le second, machine à bois ; et les deux caractérisations se cumulent dans les expressions « tour à bois » ou « scie à métaux ». L'attribut « physique » écarte de la classe des machines les mécanismes dialectiques qui ne rejoignent pas le réel. Cette limitation de la définition est conforme à la condition que le modèle dialectique résulte d'une théorie admette une réification vérifiée par l'expérience ; par exemple, dans la représentation matricielle des circuits électriques, qu'un circuit défini par une matrice comme résultat d'un calcul soit matériellement réalisable. Les théories que construisent les mathématiques constituent des lois que l'inventeur d'une machine ne doit pas transgresser.

L'étude des machines apparaît ainsi comme *l'étude de l'activité inventive de l'homme dans son besoin ou son désir d'action sur son environnement*.

Cette activité est bornée non seulement par les lois naturelles, que formulent la science et la technologie, mais encore par celles qu'imposent à l'homme la vie en société, économie et influences sociales, que Gaston Berger réunit sous le terme de *civilisation*. Nouvelle raison de faire une place à part à cette catégorie de mécanismes qui sont l'œuvre de l'homme.

2. **La matière d'œuvre.** — Les machines les plus couramment connues agissent, dans leur fonction essentielle, sur un matériau : ce sont des machines-outils. Mais les organes cybernétiques de la machine opèrent sur la matière d'œuvre très différente que constitue l'information.

Des machines ont aussi été construites, dont la fonction essentielle s'applique à l'information. Le guidage en est encore assuré par des organes informationnels, mais la matière d'œuvre est constituée, elle aussi, par des informations. Tels sont le télégraphe, le phonographe, les machines à calculer. On les appellera *machines informationnelles*.

Elles présentent avec les machines-outils usuelles une autre différence importante : leur fonctionnement n'exige qu'une très faible quantité d'énergie. Les machines-outils seront dès lors groupées dans la classe des *machines énergétiques*. Toutefois, il faut aussi mettre dans cette classe :

- les machines ou appareils qui changent la nature chimique ou physique des corps, que l'on appellera *machines d'élaboration* ;
- les machines qui servent au transport des objets (et des personnes), dites *machines de transport* ;
- les machines dont la matière d'œuvre est l'énergie elle-même, moteurs, générateurs, transporteurs d'énergie, que l'on peut appeler *machines motrices*.

Parmi les machines informationnelles, une place à part doit être faite aux *machines créatrices d'informations*, dont les instruments de mesure constituent le groupe le plus nombreux. D'une part, ces machines ne reçoivent pas des informations, mais des actions physiques non liées à des sémantiques ; d'autre part, elles tirent leur énergie du système physique

sur lequel elles œuvrent, au lieu de le recevoir d'une machine motrice auxiliaire.

Les informations que fournissent les organes de guidage d'une machine ont pour support une modification de l'état de certains organes de la machine, notamment d'organes énergétiques. Ces mécanismes informationnels sont appelés des *servo-mécanismes*. Les autres machines informationnelles, dont les résultats sont exprimés dans un langage de manière à être immédiatement intelligibles à l'homme, sont appelées *machines sémantiques*.

La cybernétique répartirait donc les machines dans les grandes classes suivantes :

Machines énergétiques, qui agissent :

- sur la matière : machines d'élaboration,
machines-outils,
machines de transport ;
- sur l'énergie : machines motrices,

et qui consomment une notable quantité d'énergie.

Machines informationnelles, qui, selon une première classification,

— créent de l'information : instruments de mesure,

— conservent, transmettent, transforment, combinent de l'information : machines informationnelles proprement dites ;

ou qui, selon une deuxième classification :

— agissent sur des organes de machines : servo-mécanismes ;

— expriment dans un langage les informations résultats : machines sémantiques,

et qui consomment une très faible quantité d'énergie.

Le lecteur accoutumé à un balancement esthétici-

que des critères de classification sera peut-être surpris des subdivisions proposées dans l'ensemble innombrable des machines, et de la terminologie adoptée. Classification et terminologie sont cybernétiques, en ce sens qu'elles font d'abord appel aux caractères à considérer les premiers, pour l'action sur l'environnement : un ingénieur chargé d'organiser une action sur le milieu extérieur, considère d'abord la matière d'œuvre, matériau, énergie, information, à laquelle il appliquera des machines.

3. Les machines informationnelles.

a) *Les informations mécanisables sont univoques.* C'est un fait d'observation : les informations que l'on a pu jusqu'à présent traiter mécaniquement sont des informations univoques.

Cette loi technologique est, comme toute loi naturelle, une limite à l'extension des machines informationnelles. Elle permet aussi de considérer que *la matière d'œuvre des machines informationnelles est constituée par des êtres physiques pouvant devenir support d'informations.*

b) *On peut réaliser mécaniquement toutes les opérations informationnelles.*

— *La conservation de l'information* est assurée par des moyens très divers. Nombre d'entre eux, bien connus, sont employés depuis des millénaires : le dessin, la sculpture, l'écriture, les signaux des gens de mer. L'enregistrement des nombres par la position d'organes mécaniques mobiles date de trois siècles (Machines de Schickart, 1628, de Pascal, 1642). Certains de ces procédés datent de quelques décades : la photographie, l'enregistrement des sons sur disques ou sur bandes magnétiques, l'enregistrement des mouvements par le cinématographe. Les plus récents ont une technologie électronique,

telles les mémoires matricielles des machines à calculer universelles construites depuis dix ans.

— Pour la *transmission de l'information*, les moyens anciens : transmission orale, transport par courrier d'un document écrit, subsistent à côté des moyens modernes : le télégraphe, le téléphone, la transmission d'images fixes, par fil et sans fil, la télévision.

— La transformation de l'information est une opération composante de la plupart des *transmissions d'information*. Par exemple, dans la transmission par radiotéléphonie, l'information reçoit successivement les supports suivants : vibration des cordes vocales de l'émetteur, vibration de l'air dans la cavité buccale et à l'extérieur, vibration mécanique de la plaque du microphone et des pièces mécaniques qui lui sont liées, vibrations électriques dans les conducteurs constitués par le microphone et l'émetteur radioélectrique qui les incorpore à l'onde porteuse, ondes hertziennes dans le diélectrique qui remplit l'espace reliant l'antenne de l'émetteur et l'antenne du récepteur, ondes électriques jusqu'à la plaque du haut-parleur, vibrations mécaniques de la plaque du haut-parleur, de l'air reliant le haut-parleur à l'oreille de l'auditeur, du tympan de son oreille, du train des osselets, des organes de Corti, vibrations électriques dans les nerfs auditifs.

La transformation d'information peut aussi être la fonction essentielle de la machine. Le cas le plus important semble être la traduction d'une information d'un langage dans un autre. Des machines existent qui, par exemple, traduisent une courbe en tableau de nombres ou inversement, d'autres, les « machines à traduire », reçoivent un texte dans une langue et fournissent une traduction de ce texte dans une autre langue.

— Les machines sémantiques réalisant des *combinaisons d'informations* sont assurément les plus étonnantes. Les premières en date sont les machines à calculer.

Rappelons le principe de la machine de Pascal : les chiffres de chaque ordre de numération sont représentés par la position d'une roue dentée dont les dents sont numérotées ; chaque fois qu'une roue termine un tour elle fait avancer d'une dent la roue suivante, ce qui réalise le report des retenues.

Si l'on analyse le fonctionnement de la machine : la machine comporte les informations élémentaires constituées par les chiffres de 0 à 9 inscrits sur chaque roue que recouvre un capot percé de lucarnes à travers lesquelles on peut lire un seul chiffre de chaque roue ; elle a donc une mémoire contenant tous les chiffres des nombres d'un intervalle déterminé ; les informations élémentaires constituées par les chiffres possibles sont *virtuelles* pour l'observateur, à l'exception de celles qui sont sous les lucarnes, qui sont *réelles* ; et le fonctionnement de la machine consiste à transmettre certaines informations élémentaires du point où elles se trouvent à l'état virtuel au point où elles deviennent réelles, soit par l'action de l'homme qui inscrit les données, soit automatiquement.

Cette transmission est effectuée, dans les machines électroniques, par le cheminement continu, à vitesse constante, des supports d'information, dans des circuits en certains points desquels ils sont aiguillés vers d'autres circuits dans lesquels ils se combinent en de nouveaux supports d'information.

Mais un nombre peut avoir une autre signification que la mesure d'une grandeur. Si l'on remplace chacun des termes de la définition d'un être (individu ou classe) par sa définition, la définition de l'être

se présente comme une suite d'attributs insécables. On peut établir une liste de tous les attributs insécables, appelés encore *prédicats*, d'une classification déterminée, et représenter l'être considéré en remplaçant, dans la liste générale, les prédicats qui figurent dans sa définition par le signe 1 et les prédicats qui n'y figurent pas par le signe 0. On a ainsi réalisé un *codage binaire* des êtres appartenant à une classification déterminée. Enfin, les signes 0 et 1 peuvent être remplacés par la suppression ou la conservation d'une impulsion dans un train d'impulsions régulier émis dans un circuit d'entrée par un générateur d'impulsions.

La technique des impulsions offre une grande richesse de moyens pour aiguiller un train d'impulsions vers un circuit déterminé ou construire un train d'impulsions à partir de deux autres, selon une loi donnée, c'est-à-dire pour effectuer une combinaison de supports d'impulsion.

En particulier, la sélection des classes auxquelles appartient un être consiste à rechercher quelles définitions des classes possèdent des signes 1 en même place que la définition de l'être. Cette opération peut aussi être réalisée par les « trieuses » des « équipements à cartes perforées », qui opèrent sur des supports d'information matériels. Ces machines ont été utilisées par le Dr Paycha pour la détermination d'un diagnostic probable correspondant à un syndrome donné.

c) *Le domaine d'efficacité des machines informationnelles.* — Sans pouvoir, dans le cadre limité de cet ouvrage, donner une démonstration complète, les exemples précédents permettront de comprendre que :

— *tout être classé peut être représenté en codage binaire dans le champ des prédicats de la classification ;*

— toute combinaison d'informations peut être réalisée par une machine automatique comme combinaison de suites binaires de signes ou de signaux.

En toute généralité, on peut dire que toute opération qui peut être décrite au moyen d'informations univoques et qui est appliquée à des informations univoques peut être réalisée par une machine.

4. Les mécanismes de guidage. — Les organes de guidage d'une machine, pris isolément, sont aussi des machines, parce qu'ils ont un but déterminé. On donnera ci-dessous la description des fonctions les plus typiques qu'ils remplissent.

a) *Amplification*. — On qualifie d'*amplificateur* tout organe qui accroît une grandeur caractéristique d'un signal : par exemple, le levier dont une extrémité en forme d'aiguille se déplace sur le papier d'un baromètre enregistreur, et qui accroît jusqu'à la rendre visible à l'œil nu l'amplitude du déplacement de la capsule barométrique.

Dans les organes cybernétiques des machines, les amplifications s'effectuent presque toujours avec apport d'énergie.

L'un des premiers amplificateurs qui ait comporté des organes cybernétiques est l'amplificateur de couple de l'analyseur différentiel de Vanevar Bush, basé sur la loi d'adhérence des fils.

L'électronique a donné une solution presque parfaite au problème de l'amplificateur. Un *filament* de matière réfractaire chauffé à l'incandescence dans le vide émet des électrons. Ces électrons sont chargés négativement par rapport au filament ; si on les place dans un champ électrique, en entourant le filament d'une « plaque » et en portant la plaque à un potentiel supérieur à celui du filament, les électrons remontent le champ et il s'établit un courant

électrique entre le filament et la plaque ; si, enfin, on place entre le filament et la plaque une « grille », portée à un potentiel différent de celui du filament, il s'ajoute au champ créé par la plaque un champ supplémentaire et le débit d'électrons se trouve modifié : on a réalisé une *triode*. La structure de la triode peut faire qu'une très faible variation du potentiel de grille entraîne une forte variation de l'intensité du courant. Aux bornes d'une résistance de sortie, traversée par ce courant, on peut donc recueillir une variation de la différence de potentiel beaucoup plus grande que celle qui a été appliquée à l'entrée. L'apport d'énergie est fait par le chauffage du filament.

L'amplificateur électronique possède sur les amplificateurs d'autre nature un avantage capital : la variation du phénomène amplifié suit de façon quasi instantanée le phénomène de commande. Cet avantage a permis à des machines informationnelles ou à des organes d'automatisation dont la rapidité de fonctionnement est égale et souvent supérieure à celle de l'esprit humain de remplacer l'homme dans des opérations de guidage où la spontanéité et la présence d'esprit étaient indispensables.

b) *Contre-réaction*. — Le signal de sortie d'un organe cybernétique doit présenter des caractères physiques déterminés, notamment pour qu'il convienne comme signal d'entrée d'un autre organe cybernétique. Par exemple, l'amplitude du signal de sortie doit présenter un rapport assez grand avec l'amplitude de l'altération d'amplitude due au fonctionnement du mécanisme — on appelle cette altération un *bruit*, par analogie avec la transmission des phénomènes acoustiques.

La présence d'amplificateurs dans la plupart des mécanismes cybernétiques permet une solution sim-

ple de ce problème. Le signal d'entrée étant amplifié, on peut prélever sur le signal de sortie l'énergie suffisante pour renvoyer à l'entrée un signal correctif qui s'ajoute au signal d'entrée et qui, *après amplification*, rétablisse le signal de sortie dans sa valeur véritable. Par exemple, si le signal d'entrée est amplifié dans le rapport 10, et si le signal de sortie est trop grand de 1 %, on ajoute au signal d'entrée un signal de sens contraire égal à 1/1 000 de la valeur du signal d'entrée. Le signal de sortie reste donc altéré de 1/1 000 de sa valeur, ce qui est généralement négligeable. Ce procédé est appelé *contre-réaction*.

En réalité, comme la durée de transmission des signaux n'est jamais nulle, la correction est appliquée au signal non dans l'état qui a déterminé la correction, mais dans un état ultérieur ; mais dans les mécanismes électroniques la durée de l'opération de correction est très brève : l'état ultérieur du signal est voisin de l'état initial et le signal ultérieur corrigé reste très voisin du signal ultérieur initial. C'est ainsi que le *fading* des transmissions radiophoniques, qui consiste dans un affaiblissement de l'énergie transportée par les ondes, peut être corrigé par contre-réaction dans les appareils récepteurs en un temps assez court pour que les vibrations du haut-parleur n'en soient pas affectées de façon appréciable à l'oreille.

Tous les mécanismes cybernétiques à contre-réaction fonctionnent sur ce principe. Ils sont l'élément fondamental de la classe des *machines réflexes*, selon la terminologie proposée par Georges-R. Boulanger, et leur présence caractérise cette classe de machines.

c) *Efficacité de l'automatisme*. — Lorsque l'homme se fait remplacer par des machines, il exige d'elles de faire au moins aussi bien que lui. Parmi les qualités que le constructeur est ainsi appelé à

conférer aux machines qu'il réalise deux classes sont d'importance primordiale : celles qui concernent la sécurité du travail, et celles qui accroissent le débit.

La *sécurité* concerne non seulement le soin d'éviter tout acte préjudiciable à la machine et au personnel qui l'environne, mais aussi la garantie que le résultat sera exactement le résultat désiré. La sécurité, par suite, résulte d'un bon guidage de l'action de la machine.

En ce qui concerne la prévention d'incidents de marche ou d'accidents de personne, le déclenchement automatique des dispositifs de sécurité lorsque s'amorce un acte dangereux est le moyen le meilleur de parer à l'accident ou d'en limiter les dégâts : on citera les limiteurs de couple qui débraient un moteur quand la charge devient trop forte, les grilles qui se rabattent sur les mains de l'ouvrier qui conduit une presse et empêchent la mise en marche de la machine si les mains ne sont pas encore retirées, les vannes fusibles noyant un local en cas de commencement d'incendie. Pour les qualités techniques du résultat, l'automatisme est aussi le moyen de guidage le meilleur ; la raison principale est que l'attention de l'homme est sujette à défaillance et que l'acuité de ses sens est inférieure à celle des instruments de mesure enregistreurs qui peuvent le remplacer dans le contrôle des grandeurs physiques définissant le résultat.

L'automatisme accroît également le *débit*, et souvent dans d'énormes proportions. Les machines à outils multiples, les machines transferts en sont des exemples frappants.

Ainsi les machines automatiques l'emportent en efficacité sur les machines à guidage humain.

d) *Structure des machines efficaces.* — Il faut encore noter, dans cette comparaison de la machine

avec l'homme qu'une machine efficace ne procède pas comme l'homme dans les actions où elle a charge de le remplacer.

Chacun sait, par exemple, qu'une automobile se déplace sur des roues et non sur des jambes mécaniques, qu'une machine à faire de l'électricité ne frotte pas des peaux de chat sur des barres d'ébène, qu'une machine à coudre ne fait pas le même point que l'ouvrière.

Pour les machines énergétiques, la mécanique donne des justifications satisfaisantes.

D'une part, une machine énergétique qui copierait l'homme copierait des gestes humains. Or les membres du corps humain sont composés de barres, les os, reliées par des articulations à trois degrés de liberté. On est tenté de les remplacer par des barres à articulations sphériques. Mais, à l'intérieur de l'articulation, les deux os sont reliés par un ligament analogue au biseau d'une huître, et le tout est enfermé dans une capsule étanche où la sécrétion permanente d'un liquide visqueux produit une sorte de graissage à film d'huile. Reproduire l'articulation naturelle exige la mise en œuvre des techniques de lubrification les plus délicates et de l'appareillage le plus compliqué que l'on ait réalisé pour la sécurité de fonctionnement des articulations de pièces mécaniques.

D'autre part, les barres du système mécanique que constitue le squelette sont maintenues en place et actionnées par les muscles. Les muscles sont des organes contractiles. Chacun d'eux est attaché sur deux os par ses extrémités et il exerce un effort de traction dans le plan défini par les deux os lorsqu'il est excité par les nerfs qui l'atteignent. Pour le mouvement contraire, il y a un second muscle, dit antagoniste du premier (exemple : le biceps et le triceps). Mais la disposition du corps permet rarement que le second muscle soit dans le même plan que le premier ; d'autres muscles sont nécessaires : en réalité, à chaque articulation sont attachés une dizaine de muscles. Or, les seuls éléments contractiles que l'on trouve dans la mécanique des machines sont l'électro-aimant à plongeur et le système d'un piston dans un cylindre : ils sont l'un et l'autre efficaces. Mais il faut encore, pour chacun de ces éléments mécaniques, une tuyauterie ou un câblage apportant de l'énergie (qui serait l'analogue des artères et des veines)

et un dispositif de commande par rhéostats ou vannes, analogues aux nerfs, et qui devraient eux-mêmes être commandés par le programme des opérations.

Mais, dans le corps humain, le réglage ne se fait pas seulement par un programme. A chaque instant au cours d'un mouvement d'un membre, les sens, tous ensemble, envoient aux centres nerveux supérieurs des informations sur la situation relative du membre et de la posture à atteindre — définie, elle, par le programme. En même temps, des nerfs spéciaux renseignent sur l'état de contraction de chaque muscle ; ces informations sont combinées dans les centres nerveux supérieurs pour donner des ordres de contraction plus marquée, ou de détente, à chacun des muscles intéressés, de manière à corriger le mouvement en cours. Le mécanisme de commande des positions relatives de deux os est donc un mécanisme réflexe, une contre-réaction. Pour un appareil réalisant automatiquement les mouvements d'une barre du système osseux, il s'agirait de combiner des informations reçues de palpeurs et d'appareils de mesures physiques à télélecture avec des informations reçues d'un programme où est précisée la posture à atteindre et des informations sur l'état des organes remplaçant les muscles (pistons et plongeurs d'électro-aimants) afin de formuler les ordres à donner aux régulateurs (pression pour les pistons, intensité pour les relais). Comme le nombre des systèmes élastiques nécessaires pour positionner une barre est au minimum de trois, c'est une véritable machine logique dont il faudrait équiper le robot. Et l'on n'a considéré que la commandes des mouvements d'un os. Quelle débauche de mécanique ou d'électronique s'il fallait commander les doigts d'une main artificielle !

Voici maintenant un exemple relatif à des machines sémantiques. L'algèbre de Boole est une théorie mathématique qui peut représenter correctement les opérations de logique que fait l'esprit humain. H. H. Aiken a élaboré une théorie, dont Puig Adam a montré qu'elle était logiquement équivalente à l'algèbre de Boole, qui permet de déterminer un circuit électronique réalisant une fonction logique donnée. Pour la fonction couramment réalisée par la bascule d'Eccles-Jordan, la théorie d'Aiken donne une bascule précédée d'un inverseur et suivie d'un

autre inverseur : le mécanisme qui suit de plus près le fonctionnement de l'esprit est moins efficace, parce que plus compliqué, que celui qui avait été imaginé précédemment.

De nombreux exemples pourraient être donnés dans toutes les classes de machines : on admettra donc comme une loi d'observation que *les mécanismes cybernétiques efficaces ne copient pas le fonctionnement de l'esprit humain*. Recevant les mêmes données, ils fournissent les mêmes résultats, mais les obtiennent par d'autres moyens : ce sont des *simulateurs*.

5. La construction d'une machine. — La construction d'une machine est une action de l'homme. Cette action comporte les phases de préparation et d'exécution déjà reconnues. Le résultat est un programme d'action prévisionnel, qui, en l'espèce, s'appelle un *projet*.

On a distingué la logique d'une machine et sa technologie. Il semblerait que l'on puisse scinder en deux le projet d'une machine, l'un relatif à la logique, l'autre à la technologie. Mais la logique de la machine résulte souvent de l'application de théories, pour l'élaboration desquelles les considérations de technologie ont été négligées. Dans la plupart des cas, la technologie qu'il faut ajouter à la logique de la machine doit satisfaire à des conditions sévères :

- conditions de robustesse (fonctionnement correct en milieu corrosif, ou soumis à de grandes ou brusques variations de température, à des perturbations mécaniques, etc.) ;
- possibilité de réalisation (matériaux convenables, possibilité d'usinage, etc.) ;
- conditions de *rendement économique*.

En outre, l'observation du fonctionnement des machines énergétiques a conduit à rechercher une condensation du mécanisme qui fasse jouer à un même organe plusieurs rôles simultanément ; c'est ce que l'on appelle un *cumul de fonctions*. Dans un régulateur de Watt, par exemple, le système formé par les boules et le losange articulé est un appareil de mesure de la vitesse de rotation de l'arbre, qui est représentée par la hauteur du collier sur l'arbre. De même, l'angle dont tourne le robinet de vapeur mesure la vitesse que prendra la machine pour une charge donnée. La logique de la machine comporte le calcul de l'angle fixant la position du robinet à partir de la hauteur du collier. Ce calcul est effectué par la tringlerie reliant le collier et le robinet, fonctionnant comme un appareil de calcul analogique. Mais cette tringlerie effectue aussi le positionnement matériel du robinet. Elle cumule les deux fonctions d'appareil de calcul analogique et d'agent (énergétique) d'application des résultats du calcul.

Le cumul de fonctions est très fréquent dans les machines énergétiques ; la plupart des « simplifications » apportées à une machine au cours de son évolution ont consisté dans la substitution à des dispositifs affectés séparément à des fonctions nécessaires, d'un nouveau dispositif cumulant ces fonctions.

Ce dernier trait, plus peut-être que la recherche de technologies robustes, réalisables et de bon rendement économique, met en relief que le *projet technologique résulte d'une activité mentale*, autant que le projet logique. Le projet logique est un modèle dialectique ; lui adjoindre une technologie donne une réification, un *prototype*, acceptable sans doute, mais qui peut n'être pas techniquement et économi-

quement valable. Ainsi les conditions technologiques obligent souvent à modifier la logique. Un projet ne peut être établi que par la collaboration étroite d'hommes connaissant à la fois les théories et les technologies. Pour créer une machine nouvelle ou perfectionner une machine existante, *la voie qui conduit à une solution efficace est la méditation du but à atteindre*, et l'imagination de mécanismes appropriés, notamment par analogie avec des mécanismes connus, *les lois naturelles et les lois de la cybernétique définissant des bornes à l'imagination créatrice des inventeurs*.

6. Le dépassement de l'homme par la machine. — Que la machine fasse mieux que l'homme est d'observation banale.

La sécurité des machines-outils s'accroît à mesure qu'augmente leur automatisme. Les machines motrices atteignent des puissances qu'aucun homme ni aucun groupe d'hommes faisant effort ensemble ne pourraient atteindre et les machines de transport ont progressé de conserve.

Les machines à calculer ont, elles aussi, une sécurité plus grande que l'opérateur humain si, du moins, on évalue la sécurité de façon comparable dans les deux cas, par exemple par le rapport du nombre d'erreurs au nombre de chiffres engagés dans les opérations. Et le débit d'une de ces machines est infiniment supérieur à celui de l'opérateur humain.

Pour les machines informationnelles aussi bien que pour les machines énergétiques on constate donc un *dépassement de l'homme par la machine*.

Les conséquences en sont diverses.

1^o L'AUTOMATION. — Dans sa fonction normale, la machine est faite pour remplacer l'homme. Cette

substitution s'est produite en de multiples circonstances : dans des travaux fins et précis, par exemple le taillage d'une lentille, où l'homme guide la machine, dans des travaux que l'homme ne pourrait réaliser, même en groupe nombreux, par exemple la production d'énergie, dans des travaux qu'il pouvait faire, mais où elle accroissait le rendement économique, une machine étant substituée à une multiplicité de travailleurs humains : une machine transfert ou une calculatrice électronique remplacent quelques centaines d'ouvriers ou de calculatrices travaillant à la main, un banc de filature conduit par une seule ouvrière remplace plusieurs milliers de fileuses au rouet.

Dans ce dernier cas, la mécanisation a pu provoquer quelque déséquilibre social : on sait quelles émeutes souleva l'apparition du métier Jacquard. A l'époque présente, les problèmes de tout ordre, technologique, économique, social et humain que peut poser le développement de plus en plus rapide de l'automatisme des machines et l'emploi généralisé de ce matériel se désignent d'un terme de naissance récente — et dont la signification couvre un si vaste domaine qu'elle semble même n'être pas encore parfaitement définie : l'*automation*.

L'analyse poursuivie jusqu'à présent a montré que :

- l'automatisation d'un travail consiste dans la mécanisation de fonctions mentales ;
- toute opération mentale qui applique des règles constituant une information univoque peut être mécanisée.

Il n'y a donc aucune exagération à dire que tout le travail des hommes peut être effectué par des machines — étant exclue, pour le moment, de l'extension du mot « travail » la création artistique et la construction de modèles dialectiques, scientifiques, philosophiques ou autres.

Du point de vue technique, l'automatisation permet :

- un travail plus précis ;
- une réduction du nombre de pièces manquées ;
- des fabrications impossibles d'autre façon.

Du point de vue financier, les conséquences sont plus diverses ; elles peuvent se résumer, semble-t-il, sous les rubriques suivantes :

- réduction des investissements en immeubles ;
- accroissement des investissements en machines ;
- réduction des stocks de produits demi-fabriqués ;
- réduction du nombre des ouvriers ou des employés et, par suite, du montant total des salaires.

Du point de vue humain, le développement de l'automatisation du travail industriel et commercial, touchant d'abord les travaux les plus simples, entraîne et entraînera de plus en plus :

- suppression du travail monotone, tel que le travail à la chaîne, et, corrélativement ;
- accroissement du niveau intellectuel de base du personnel effectivement employé.

Du point de vue social, si l'automatisation se poursuit à un rythme accéléré, on peut prévoir :

- une réduction du nombre total d'heures de travail humain nécessaire à l'industrie et au commerce du pays, portant principalement sur le travail des manœuvres ;
- un accroissement des richesses disponibles pour l'ensemble des citoyens.

Les conséquences peuvent en être très diverses. Les heures de travail restant nécessaires pourraient être réparties entre les citoyens ayant la qualification professionnelle voulue : chacun disposerait alors de loisirs de longue durée. Dès lors, il pourrait survenir un comportement des travailleurs réclamant le développement de l'automatisation, afin de profiter au plus vite des avantages que l'on peut en espérer. Ou bien, l'automatisation du travail pourrait se poursuivre seulement, ou presque, en vue d'accroître la productivité. Dans ce cas, un chômage étendu pourrait survenir. Et il semble que cette situation est celle que craignent les masses ouvrières. Jusqu'à présent, l'automatisation d'un travail a été décidée lorsque les prévisions concernant l'accroissement de la productivité, les investissements, la réduction des stocks, les débouchés, se

combinaient en une prévision d'accroissement des bénéfiques, par l'abaissement des prix de revient. Il en a été ainsi dans tous les pays industriels, y compris l'U.R.S.S., où l'abaissement des prix de revient n'est pas toujours utilisé aux mêmes effets que dans les autres pays.

En résumé, dans les circonstances présentes : *l'automation est une opération d'organisation du travail ayant pour but d'abaisser le prix de revient d'une fabrication en remplaçant des hommes par des machines.*

L'automation se situe ainsi pleinement dans le domaine de la cybernétique, selon la définition qui en a été donnée : l'art de rendre efficace l'action.

Il ne semble pas que les hommes qui ont pouvoir de décision en matière d'automation se soient inquiétés des effets sociaux de leurs décisions autrement que pour les considérer comme des conséquences regrettables que l'on pallie au mieux de l'opportunité. La cybernétique, au sens large que l'on vient de dire, et qui comprend l'action de l'homme sur l'homme, individuellement et dans le domaine social tout entier, les considère comme égales en intérêt aux conséquences économiques préparées. C'est ainsi que les journées d'études organisées en décembre 1957 par l'Association internationale de Cybernétique ont réuni une centaine de chefs d'entreprises, d'ingénieurs, d'organiseurs-conseils, de juristes, d'économistes, d'universitaires et de représentants des syndicats ouvriers internationaux qui ont unanimement conclu que l'automation ne doit pas se développer dans l'anarchie : *la concentration des moyens industriels qu'elle nécessite doit être organisée sur le plan national, et sur le plan international lorsqu'il est utile, en tenant compte de toutes ses implications sociales et humaines.*

2° LES MACHINES A PENSER. — Les machines sémantiques, dont le fonctionnement produit des informations, peuvent remplacer l'homme dans l'exercice de fonctions mentales. Elles peuvent appliquer à des informations univoques toutes opérations qui peuvent être décrites au moyen d'informations univoques. Comme machines, c'est-à-dire conçues pour

remplacer l'homme, elles font de multiples opérations de l'esprit : les opérations arithmétiques, l'intégration d'équations différentielles, toutes les suites possibles de telles opérations, la sélection des classes auxquelles appartient un être de définition donnée et, par suite, toutes opérations de la logique déductive. On a donc pu, sans exagération, les appeler des *machines à penser*.

a) Une question a été posée à propos de telles machines : *si elles pourraient se substituer à l'homme dans l'initiative des opérations qu'elles feraient*, et, un peu d'invention journalistique aidant, si elles pourraient créer une population de machines qui s'oppose à l'homme ou du moins s'organise en une vie sociale particulière.

Les *machines adaptatives*, selon la terminologie de Georges-R. Boulanger, ont l'initiative des opérations qu'elles font ; en termes de psychologie humaine, elles jouissent de liberté d'action.

Par exemple, *la machine à jouer aux échecs* du M.I.T. possède les organes qui permettent de déplacer une pièce sur l'échiquier, une mémoire permanente et une mémoire temporaire, un combinateur d'informations (ordinateur) et des organes qui transmettent à l'ordinateur les informations résultant des actions extérieures, ou transmettent des informations de l'ordinateur à d'autres organes. Quand elle joue une pièce, le déplacement s'enregistre dans la mémoire temporaire ; s'il n'est pas conforme aux règles du jeu, le partenaire humain l'indique en abaissant une touche, la machine alors transfère dans la mémoire permanente le souvenir du mouvement qu'elle a fait, accompagné de l'indication que ce mouvement est interdit ; par la suite elle comparera avant d'agir le mouvement qu'elle se propose de faire aux mouvements interdits et décidera de son action en conséquence. Elle apprend donc les règles du jeu par la méthode du *try and fail*, et parvient à jouer correctement sans que l'on ait mis les règles du jeu dans sa structure. Par le même procédé, elle apprend les suites de coups efficaces et finit par jouer comme un humain, qui, contre un humain, tantôt gagne et tantôt perd.

La machine à jouer aux échecs du M.I.T. apprend de l'homme quelles sont les règles du jeu. *La machine du Dr Sauvan* imagine elle-même ses règles de comportement. Elle possède un organe qui lui présente sous forme de cartes perforées diverses situations, et un organe qui, évoluant entre deux positions limites, représente un certain état de satisfaction ; selon la position de cet organe, la machine répond aux impulsions qui traversent la carte perforée, soit par une modification de sa structure, soit par le changement de la carte excitatrice, soit par l'émission d'impulsions tendant à modifier l'effet des impulsions dues aux cartes. La machine simule ainsi les trois modes de comportement d'un être vivant sous l'influence de son environnement : l'adaptation, la fuite, la lutte ; et le choix fait par la machine, ici encore, n'est pas prévu par l'homme et mis dans la structure de la machine. Mais l'appareil du Dr Sauvan n'est pas une machine ; elle n'est pas destinée à remplacer l'homme dans une action voulue par l'homme ; elle est un *modèle*, qui montre que les *phénomènes instinctifs peuvent être réalisés par des mécanismes automatiques*.

Ces deux exemples éclairent la question posée, et lui donnent une réponse :

— Une machine agit pour atteindre un but fixé par l'homme ; elle est construite par l'homme. L'homme peut la munir d'organes de comparaison de diverses situations et de choix de son comportement ultérieur selon le résultat de cette comparaison : cette suite d'opérations simule une décision (au sens de la psychologie), et l'on peut dire que la machine a une certaine initiative dans le guidage de son action pour atteindre le but assigné.

— Des « machines » qui s'organiseraient en une vie sociale particulière, ne remplaceraient plus l'homme pour quelque but choisi par l'homme : ce seraient des *mécanismes*, mais non des machines ; et, si ces mécanismes possédaient la fonction de reproduction, comme on l'a supposé quelquefois, ce ne seraient plus des mécanismes artificiels dès la 2^e génération. L'appareil de Dr Sauvan montre que de tels appareils peuvent être formés de pièces

mécaniques fabriquées par l'homme. Mais la nature en offre des millions d'exemples, constitués par les êtres vivants.

b) On s'est demandé encore si des machines pourraient créer des œuvres d'art. La réponse est aisée : le jugement esthétique étant par essence « personnel et exclusif », selon l'expression d'Etienne Gilson, c'est l'homme mis en présence d'une œuvre qui lui attribue ou non, à son gré, la qualité d' « œuvre d'art ».

On a construit au moins une machine, « Calliope » de J. Ducrocq, qui, automatiquement, distribue des mots en suites correctement enchaînées selon la grammaire mais non imposées par une loi humaine ou qui répartit des taches colorées selon une distribution géométrique non programmée par l'homme. Dira-t-on que ces suites de mots sont des poèmes, et ces ensembles de taches colorées des tableaux ? C'est affaire de goût. Une mécanique construite par l'homme pour brandir un pinceau, à laquelle serait laissée l'initiative de ses mouvements est aussi étrangère à la « pensée » humaine qu'un pinceau attaché à la queue d'un âne. Les critiques qui ont estimé « œuvre d'art » le badigeonnage fait par l'âne avec sa queue jugeraient aussi, probablement, que ce sont des œuvres d'art que peinturlure la mécanique. Mais le reste des hommes garde la pleine liberté d'en juger autrement. La cybernétique y voit des mécanismes, l'un artificiel, l'autre naturel, dont les actions ne sont pas guidées par l'homme.

c) Enfin, puisque une machine est capable de toutes les opérations logiques que sait faire l'homme, qu'est le *dépassement de l'homme par la machine, dans le domaine de la pensée rationnelle ?*

— Les opérations de la logique déductive effectuées par l'homme sont toutes des opérations dyadiques, c'est-à-dire qui combinent deux propositions en une troisième ; une opération (autre que la conjonction et la disjonction) portant sur plus de deux propositions est toujours remplacée par un système d'opérations dyadiques. On pourrait, au

moyen d'une machine informationnelle, effectuer des opérations portant sur plus de deux propositions. Une machine pourrait même élaborer des opérations logiques plus compliquées que celles qu'a jamais construites l'homme. Le dépassement de l'homme par la machine dans le domaine de la logique peut donc devenir très grand. Mais il s'agit là d'un dépassement de même nature que le dépassement de l'homme par des machines-outils ; c'est l'homme, dans les deux cas, qui met dans la machine les règles de son fonctionnement. Il reste maître de la machine. Si, donc, l'inquiétude est seulement de machines capables de construire des idées raisonnables que l'homme ne pourrait pas construire, une telle inquiétude est pleinement justifiée.

— Mais poussons plus avant. Les « idées » que construit une machine se présentent toujours sous la forme de systèmes de signes résultant de la combinaison de signes donnés, puisque les informations sur lesquelles opère une machine sont univoques. L'homme sera-t-il capable de comprendre ces « idées » c'est-à-dire d'attribuer une sémantique au support qui lui sera présenté par la machine ?

Par exemple, quand une machine à calculer imprime les chiffres 3141592 et cinq mille chiffres à la suite, tout le monde comprend qu'il s'agit des 5 000 premières décimales du nombre π . Mais si une machine logique écrit, en conclusion de ses raisonnements : « Le nombre π est transcendant », quelques lecteurs de ces pages, peut-être, ne comprendront pas cette brève suite de mots. Un plus grand nombre sera au fait si l'on dit : « Le nombre π n'est racine d'aucune équation entière à coefficients réels. » Certains demanderont encore ce que signifie « entière » et ce que sont des coefficients « réels » ; et l'on dira : « Le nombre π n'est racine d'aucune équation où l'inconnue figure autrement que par des produits de cette inconnue par elle-même et dont les coefficients sont choisis dans l'ensemble R des êtres possédant les propriétés suivantes :

« R est muni de deux lois de composition internes ;

« R est un groupe abélien pour la première loi, appelée addition :

$$\begin{aligned} \forall a, b, c \in R : (a + b) + c &= a + (b + c) \\ \exists o \in R, \forall a : a + o &= o + a = a \\ \forall a \in R, \exists (-a) : a + (-a) &= (-a) + a = 0 \\ \forall a, b \in R : a + b &= b + a \end{aligned}$$

« R, privé de 0, est un groupe pour la deuxième loi, appelée multiplication ;

$$\begin{aligned} \forall a, b, c \in R : (ab)c &= a(bc) \\ \forall a, b \in R : ab &= ba \\ \exists 1 \in R, \forall a : 1.a &= a.1 = a \\ \forall a \neq 0, \exists a^{-1} : a.a^{-1} &= a^{-1}.a = 1 \\ \forall a, b, c \in R : a(b + c) &= ab + ac. \end{aligned}$$

Peut-être cette explication demandera-t-elle de nouvelles explications, notamment pour les divers signes qui y figurent ; remplaçant chacun de ces signes par sa définition, ainsi que tous autres mots non compris, on parviendrait à une ultime phrase qui ne contiendrait que des mots connus du lecteur, mais qui serait certainement très longue et, sans doute, paraîtrait embrouillée.

Affirmera-t-on que la lecture de cette longue phrase donnera l'« idée » de la transcendance du nombre π ? Ce sont cependant des suites de signes de ce genre que construira la machine à partir des données qui lui auront été fournies. Pour parvenir à en saisir la sémantique il faudra construire une classification où le symbole de chaque classe évoquera un petit nombre d'informations et de règles de combinaison. Que l'on demande à la machine d'établir elle-même cette classification ou qu'elle soit l'œuvre de l'homme, pour comprendre l'information automatiquement construite par la machine comme résultat d'un très grand nombre d'opérations, l'homme devra faire un énorme effort d'assimilation et retenir dans sa mémoire un nombre d'informations très élevé. Cet effort dépassera quelque jour les forces humaines. *Le dépassement de l'homme par la machine dans des opérations de raisonnement aboutira à construire mécaniquement des raisonnements qu'aucun homme ne pourra comprendre.*

Les hommes construiront-ils des machines qui édifient des théories qu'aucun homme ne puisse comprendre ? Pourquoi non. On conserve bien,

précieusement, l'Apocalypse de Saint Jean qui, depuis 2 000 ans, reste inintelligible.

— Du point de vue de la cybernétique, de telles machines pourront accroître sans limite l'efficacité de l'action humaine sur le milieu extérieur. Elles pourraient être un élément des organes cybernétiques de machines auxquelles l'homme fournirait, comme données, le but à atteindre et la matière d'œuvre, mais non le programme ou même une méthode d'action. Déjà, l'homéostat de Ross Ashby, quittant le laboratoire pour l'industrie, ouvrirait la voie à des machines de ce type. On cite souvent l'exemple suivant de comportement d'un homéostat : si un pilote automatique d'avion était muni d'un homéostat, et s'il arrivait que les tringles de commandes des ailerons soient permutées, l'homéostat modifierait automatiquement les ordres donnés aux moteurs de ces tringles, de telle sorte que l'équilibre de l'avion soit maintenu ; un pilote automatique ordinaire, construit pour réagir à un déséquilibre de l'avion suivant des lois prédéfinies, ne pourrait déceler l'erreur de montage de la tringlerie et précipiterait le déséquilibre vers le désastre. La structure des organes d'un homéostat peut être décrite de façon intelligible ainsi que les lois physiques de leur fonctionnement ; mais la suite de combinaisons d'informations réalisées pour édifier les ordres à donner aux effecteurs afin que le but soit atteint reste inconnue de l'homme, quel que puisse être cet homme, même le constructeur de l'homéostat.

— Ainsi, et pour conclure : *Les raisonnements, inconnus de l'homme, que pourrait faire une machine dépassant l'homme dans la richesse des combinaisons d'informations peuvent être utilisés efficacement au guidage d'actions voulues par l'homme.* Elles ne

causent, par suite, aucune inquiétude à la cybernétique. Au contraire. Que l'édification par des machines de théories inaccessibles à l'intelligence humaine doive être pour l'homme un sujet d'inquiétude est matière de jugement, individuel ou collectif, où la cybernétique ne peut apporter ni lumière, ni secours : cela n'est point de son domaine.

II. — Les êtres vivants

1. La notion de l'être vivant. — Pour la cybernétique, un être vivant est un *mécanisme naturel finalisé*.

L'homme ne le fabrique pas. Il le trouve dans son environnement, l'observe et le décrit.

Les descriptions du monde vivant se formulent en des classifications, de systématiques diverses. Une systématique cybernétique prendrait pour critères principaux les fonctions que remplissent les organes, la structure de ces organes, variable pour la même fonction, étant un critère secondaire ; en d'autres termes la physiologie prendrait le pas sur l'anatomie. Mais, une classification étant faite pour un but déterminé et précis, l'ordre des critères peut être valablement modifié, par exemple pour la chirurgie.

La finalité d'un organe vivant est d'invention humaine. L'homme dit qu'un organe a pour but les résultats de son fonctionnement. Comme l'homme ne fabrique pas l'être vivant, il ne peut affirmer, à la différence des organes de machines, que les organes de l'être vivant ont la finalité qu'il leur attribue. Attribuer un but à un organe d'être vivant est un raisonnement analogique, qui peut être fécond pour l'explication du vivant, sous réserve des précautions à prendre dans l'emploi de l'analogie.

2. Le *feed-back*. — On rencontre, répété des millions de fois, le mécanisme dont le fonctionnement consiste, un programme d'action ayant reçu un commencement d'exécution, dans la transmission à un centre nerveux d'informations sur les relations de l'être avec son environnement et d'informations sur la situation de l'être lui-même (tension des muscles et vitesse du mouvement des membres, par exemple), la combinaison de ces informations ayant pour résultat des informations envoyées aux muscles impliqués dans l'exécution de l'action. Ce mécanisme est appelé un *feed-back*.

On a décrit un mécanisme analogue à propos des machines, la contre-réaction. Mais les deux mécanismes présentent des différences profondes. La contre-réaction est utilisée dans les mécanismes artificiels pour la régulation des phénomènes, c'est-à-dire pour assurer la stabilité du fonctionnement, but que poursuit le constructeur d'une machine. La contre-réaction est presque toujours *négative*, c'est-à-dire de sens contraire aux écarts constatés. Dans les êtres vivants, il ne s'agit pas d'une correction régulatrice, mais d'un moyen normal de conduite ou de comportement ; aussi le *feed-back* est-il fréquemment *positif*, par exemple pour concentrer temporairement l'énergie de l'individu sur une action particulière, et même, par suppression de la limitation apportée à un *feed-back* par certains organes du système nerveux, le *feed-back* devient à la limite le *runaway*, qui, par exemple, bloque les commandes de mouvement dans le phénomène de la peur, ou au contraire les libère pour la fuite éperdue. Le phénomène de *feed-back* qui décrit le comportement de l'être vivant ou de ses organes dans la quasi-totalité des circonstances, comme l'a montré Stanley Jones, est donc beaucoup plus riche et divers en ses manifes-

tations que la contre-réaction de l'ingénieur automatique.

Etendu, récemment, à l'explication du métabolisme cellulaire et moléculaire, notamment par le Dr Laborit et ses élèves, il apparaît comme le phénomène fondamental de la physiologie.

3. Les modèles. — La complexité des êtres vivants a conduit dès longtemps à leur appliquer le raisonnement analogique, au moyen de modèles.

a) *Modèles dialectiques.* — La description des phénomènes dans la langue ordinaire complétée par des termes techniques et des éléments de langages techniques spéciaux, notamment les mathématiques, est en usage depuis toujours ; elle remplace les phénomènes par des modèles dialectiques, mais généralement sans intention d'en user comme modèles. Par contre, depuis quelques années, l'usage se répand de descriptions, en langage ordinaire, de modèles, considérés et utilisés comme tels. Il s'y est ajouté des modèles constitués par des schémas, tels les schémas de *feed-back* du type de Latil utilisés par le Dr Laborit, qui ont conduit à des découvertes. Enfin, divers modèles mathématiques ont été tentés, les premiers en date étant ceux de Norbert Wiener, qui ont joué un rôle important dans l'élaboration de la notion même de cybernétique. Au niveau de l'initiation à la connaissance de l'être vivant, nombreux sont les ouvrages qui conduisent l'étudiant de l'observation sensorielle ou de l'image photographique au schéma fonctionnel d'un organe ou d'un système. *La description des phénomènes dont l'être vivant est le siège se fait donc, de plus en plus, au moyen de modèles dialectiques, tant en vue de l'explication que de la recherche.*

Les modèles les plus efficaces sont les schémas qui

font apparaître les fonctions des divers éléments. Les modèles mathématiques, notamment ceux qui s'inspirent des théories des machines automatiques ou de l'information, paraissent d'efficacité limitée.

b) *Modèles physiques.* — On a construit de nombreux modèles physiques des phénomènes biologiques, depuis Descartes, qui cherchait un modèle de la circulation du sang dans les circuits hydrauliques des fontaines lumineuses et Vaucanson qui construisait son célèbre Canard pour servir de modèle à la digestion ; la plupart n'ont pas apporté de suggestions : ils manquaient de fidélité et n'étaient que des simulateurs. Par contre, nombre de ces simulateurs ont apporté une confirmation à la conception générale que les phénomènes du vivant, psychologie comprise, peuvent être considérés comme des phénomènes physico-chimiques. Le cheminement de la pensée est jalonné par les expériences suivantes :

— Marey (1880) montre que des jets d'eau pulsés se transforment dans un tuyau de caoutchouc assez long en un courant régulier : les biologistes admettent dès lors qu'il n'est pas besoin, pour expliquer le phénomène de régularisation du flux sanguin dans les artères, d'imaginer une commande des artères par des centres nerveux.

— Ralph Lillie (1925) montre qu'un fil de fer pur plongé dans de l'acide nitrique concentré puis placé à demeure dans de l'acide nitrique dilué, transforme une excitation appliquée à l'une de ses extrémités en une onde électrique qui parcourt le fil d'un bout à l'autre : les neurologues admettent dès lors que l'explication de la transmission de l'influx nerveux *n'exige pas* de concept de l'ordre de la psychologie.

— Grey Walter (1948) montre qu'un mécanisme électronique (les fameuses « tortues ») à déplacement autonome et muni d'organes sensibles au contact et aux sons simule le comportement de réflexe conditionné ; les psycho-physiologues admettent, dès lors, que le réflexe conditionné est un phénomène physiologique dont l'explication *n'exige pas* de concept de l'ordre de la psychologie.

— Le D^r Sauvan (1958) présente au Congrès international de Cybernétique un mécanisme qui simule la création de

l'instinct : les psychologues, dès lors, abandonnent à la physiologie les phénomènes attribués à l'instinct.

— Enfin les machines à calculer fonctionnant en machines à raisonner peuvent, de nos jours, effectuer automatiquement toutes les opérations logiques qu'effectue l'esprit humain, notamment construire une théorie déductive : il faut dès lors admettre que le raisonnement déductif, par exemple la construction des mathématiques, *n'exige pas* la mise en œuvre d'une « faculté de l'esprit », par exemple celle que l'on appelle « intelligence ».

Certes, il est loisible à chacun de ne point admettre les suggestions de ces modèles et de préférer d'autres explications. Ce choix peut être fait pour la commodité du langage et de l'association des idées. Il peut aussi résulter de la croyance à des « vérités » ; en ce cas, il reste en dehors de la cybernétique, qui, de deux modèles du même phénomène, d'égale fidélité et d'égale puissance, choisit toujours le plus simple.

III. — Les modèles mathématiques

1. **Les théories mathématiques comme modèles.** — Les mathématiques sont constituées par des suites de propositions qui se déduisent chacune des précédentes, à partir de systèmes de propositions initiales. Une suite de telles propositions est une *théorie mathématique* ; les propositions initiales en sont les *axiomes*.

L'usage des mathématiques pour l'étude de la nature consiste dans la représentation d'un phénomène étudié par un modèle dialectique dans le langage mathématique. Cette opération faite, le déroulement du raisonnement est le même que pour tout autre modèle :

- on construit le modèle ;
- on fait fonctionner le modèle, ce qui consiste en l'espèce à le transformer par les règles du calcul mathématique ;

- on réifie le modèle transformé ;
- on s'assure, par vérification expérimentale, que la réification est valable.

La théorie rencontre donc le réel aux deux extrémités de la chaîne de raisonnements.

Dans la *construction du modèle mathématique* : les êtres sont représentés par des attributs d'espèce particulière, les grandeurs, qui sont déterminées par des appareils de mesure ; les phénomènes sont décrits par des relations entre grandeurs. Le système considéré est donc remplacé par un système de nombres, entre lesquels existent certaines relations.

Dans l'état actuel des connaissances, la *transformation du modèle* peut se faire de trois manières :

- on utilise une machine mathématique ; un analyseur différentiel, par exemple, détermine automatiquement les courbes intégrales d'une équation différentielle donnée ;
- on utilise des tables ; les tables de conversion du calcul opérationnel, par exemple, donnent en correspondance des fonctions usuelles leur transformée de Lagrange, ou inversement ;
- on utilise des règles de transformation que l'on a mises dans sa mémoire, telles les formules de trigonométrie, complétées au besoin par les règles générales d'une algèbre ou les règles du raisonnement déductif.

La *réification* rapproche le résultat théorique d'une technologie ; elle ne peut être féconde que si elle est faite par l'homme de l'art qui a posé le problème.

Plus encore, la *vérification expérimentale*.

La partie purement mathématique de l'utilisation des mathématiques comme modèles consiste donc à disposer de nombreux théorèmes de trans-

formation que l'on conserve soit dans une mémoire de machine à calculer, soit dans des tables imprimées, soit dans la mémoire de sa mentalité.

Dans une organisation du travail tendant à une plus grande efficacité de l'investigation des phénomènes naturels, le rôle du spécialiste des mathématiques est d'accroître la liste des théorèmes de transformation des modèles mathématiques de phénomènes naturels. Il pourrait s'y faire remplacer par des machines.

2. **La forme de Pfaff.** — Les mécanismes prennent, par définition, des états *successifs* : ils évoluent dans le temps. Si l'on se borne à des mécanismes représentés de façon suffisamment fidèle par un système de grandeurs caractéristiques x_1, x_2, \dots, x_n , ces grandeurs ont varié, d'un instant t à l'instant $t + \delta t$, de $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$. La variation d'une grandeur non caractéristique attachée au mécanisme φ , dépend des variations des grandeurs caractéristiques et de l'état du mécanisme pendant la durée δt . On peut l'écrire :

$$(1) \quad \delta\varphi = f_1 \delta x_1 + f_2 \delta x_2 + \dots + f_n \delta x_n$$

où f_1, f_2, \dots, f_n sont des fonctions des variables x_1, x_2, \dots, x_n ; il est entendu que l'on choisit la durée δt assez petite pour que les valeurs du second membre pour les valeurs t et $t + \delta t$ diffèrent entre elles d'un nombre au plus égal à la plus petite valeur *effectivement* mesurable de $\delta\varphi$.

L'expression :

$$(2) \quad f_1 \delta x_1 + f_2 \delta x_2 + \dots + f_n \delta x_n$$

est appelée *forme de Pfaff*.

1° *L'évolution d'un mécanisme fidèlement repré-*

senté par un système de n variables numériques est représentée par une forme de Pfaff.

Cela résulte de la définition même de la forme de Pfaff.

2° L'évolution d'un mécanisme peut être prévue de façon approchée au moyen de sa forme de Pfaff.

Les données numériques sont : d'une part, l'instant t , la variation δt et les variations correspondantes $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$; d'autre part, pour un instant t_0 , les valeurs $(x_1)_0, (x_2)_0, \dots, (x_n)_0$ des variables x_1, \dots, x_n et la valeur φ_0 de la variable φ . On calcule les valeurs $(f_1)_0, (f_2)_0, \dots, (f_n)_0$ des fonctions f_1, f_2, \dots, f_n pour les valeurs initiales $(x_1)_0, (x_2)_0, \dots, (x_n)_0$, puis la variation $\delta\varphi$ par la forme de Pfaff. On prend pour valeurs de $x_1, x_2, \dots, x_n, \varphi$ à l'instant $t + \delta t$:

$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{l} x_1 = (x_1)_0 + \delta x_1 \\ x_2 = (x_2)_0 + \delta x_2 \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_n = (x_n)_0 + \delta x_n \\ \varphi = \varphi_0 + \delta\varphi \end{array} \right.$$

Et l'on itère l'opération en prenant les valeurs obtenues comme nouvelles valeurs initiales. Des méthodes propres à chaque cas particulier permettent de s'assurer que la durée δt a été choisie assez petite. Comme exemple, on peut citer la méthode G.H.M. pour le calcul de la trajectoire du projectile lancé par un canon.

Il est important de noter qu'il n'est pas besoin de connaître l'expression algébrique des fonctions f_1, f_2, \dots, f_n pour appliquer la méthode précédente à un calcul de prévisions ; il suffit de pouvoir déterminer, par exemple expérimentalement, les valeurs successives de ces fonctions.

3° Si les fonctions f_1, f_2, \dots, f_n sont les dérivées partielles d'une fonction $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$ pour les variables x_1, x_2, \dots, x_n , cette fonction peut être prise pour expression de la fonction φ , à une constante additive près.

Dans ce cas, la différentielle de φ est une différentielle totale exacte :

$$(4) \quad d\varphi = \frac{\partial U}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial U}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial U}{\partial x_n} dx_n$$

et

$$(5) \quad \varphi = U + h$$

Si à deux instants t et t' ($\delta t = t' - t$ étant quelconque) les variables prennent les valeurs x_1, x_2, \dots, x_n et x'_1, x'_2, \dots, x'_n ,

$$(6) \quad \delta\varphi = U(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) - U(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

La variation de la grandeur φ ne dépend que des valeurs initiales et des valeurs finales des grandeurs caractéristiques x_1, x_2, \dots, x_n , et non des valeurs intermédiaires par lesquelles elles sont individuellement passées dans l'évolution du mécanisme de l'état représenté par x_1, x_2, \dots, x_n à l'état représenté par x'_1, x'_2, \dots, x'_n .

On dit que la grandeur φ dépend du potentiel $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

4° Il existe une infinité de fonctions M des variables x_1, x_2, \dots, x_n , attachées à une forme de Pfaff, telles que le produit de cette forme par l'une de ces fonctions soit une différentielle totale exacte.

Ces fonctions sont appelées multiplicateurs.

M étant un multiplicateur, il existe une fonction correspondante Ψ , telle que :

$$Mf_1 = \frac{\partial \Psi}{\partial x_1}, \quad Mf_2 = \frac{\partial \Psi}{\partial x_2}, \quad \dots, \quad Mf_n = \frac{\partial \Psi}{\partial x_n}.$$

La fonction Ψ' est une variable (non indépendante) dont la variation entre deux instants t et t' est la différence $\Psi'(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) - \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Si cette variable, mathématiquement attachée au mécanisme, admet une réification valable, elle devient une grandeur attachée à ce mécanisme.

6° Exemple. — Un gaz est enfermé dans un cylindre fermé par un piston mobile ; diverses grandeurs peuvent lui être attachées : deux grandeurs caractéristiques, sa pression p et son volume v , et des grandeurs accidentelles, parmi lesquelles on considérera d'abord la température T du gaz, le travail effectué quand on déplace le piston, W , et l'apport de chaleur Q .

La température est reliée à la pression et au volume par la relation d'origine expérimentale : $pv = RT$, où R est un nombre constant. La chaleur est reliée au travail par la relation :

$$(1) \quad \delta Q = J \delta W$$

où J est un nombre constant.

Si l'on représente par un point m d'un plan rapporté à des coordonnées cartésiennes p, v , l'état du gaz à un instant donné, le travail effectué au cours d'un mouvement de va-et-vient du piston qui le ramène à sa position initiale (cycle), est :

$$(2) \quad \delta W = \frac{1}{2} (p \delta v - v \delta p)$$

Les seconds membres des relations (1) et (2) sont des formes de Pfaff. La première est intégrable et donne $Q = JW + h$. Elle permet de calculer la chaleur fournie pour passer d'un état 0 à un état 1, en fonction du travail reçu entre ces deux états : $Q_1 - Q_0 = J(W_1 - W_0)$; la façon dont se fait le passage d'un état à l'autre est sans influence. La deuxième forme n'est pas intégrable. Elle permet de calculer pas à pas le travail effectué, et ce travail dépend de la façon dont se fait le passage, c'est-à-dire, graphiquement, du chemin parcouru par le point m . Mais si l'on multiplie par $\frac{1}{pv}$ cette

forme de Pfaff, elle devient $\frac{1}{2pv} (p \delta v - v \delta p) = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v}{v} - \frac{\delta p}{p} \right)$ qui est une différentielle totale exacte. On peut lui donner les formes suivantes : $\frac{dW}{pv}$ ou, comme $dW = \frac{1}{J} dQ$ et $pv = RT$:

$\frac{1}{JR} \frac{dQ}{T}$. L'expression $\frac{dQ}{T}$, dont les deux termes ont une signification physique est donc la différentielle d'une grandeur S : on l'appelle l'« entropie ». On attribue à l'entropie une existence physique. Si l'on prend pour multiplicateur $\frac{1}{p^2 + v^2}$ au lieu de $\frac{1}{pv}$, la forme de Pfaff devient $\frac{1}{2(p^2 + v^2)}(p dv - v dp)$, l'expression $\frac{p dv - v dp}{p^2 + v^2}$ est encore une différentielle totale exacte, la différentielle de $\text{arc tg } \frac{p}{v}$, mais on n'a imaginé aucune réification de cette expression. Elle n'est pas considérée comme une grandeur physique.

7° En bref, *la forme de Pfaff est une représentation universelle de l'évolution d'un mécanisme que l'on considère comme bien représenté par un système de variables indépendantes. Elle permet de suivre la variation d'une grandeur dont elle est l'expression. Elle suggère, après transformation par multiplicateur, la définition de grandeurs nouvelles.*

IV. — Les sociétés humaines

1. Analogies et différences entre l'être humain et l'animal. — La cybernétique reconnaît et retient, entre le comportement de l'être humain et celui de l'animal, notamment des vertébrés supérieurs, des analogies étroites et des différences marquées.

1° *Le but des actions de l'homme, comme de l'animal, est de procurer à l'individu quelque satisfaction ;*

2° *L'homme, comme l'animal, réagit à une contrainte de son environnement par :*

- a) *l'adaptation, en modifiant son propre état ;*
- b) *la fuite, en changeant d'environnement ;*
- c) *la lutte, en modifiant son environnement.*

3° *La réaction de l'homme, comme celle de l'animal, est de type aléatoire ;*

4° *La fonction de mentalité* acquiert, chez l'homme, un développement très grand, qui le différencie de l'animal ;

5° *L'action de l'homme sur l'homme se fait par communication d'informations.*

2. Caractères généraux des sociétés humaines

1° *La fonction économique.* — Les sociétés humaines se sont créées aux temps préhistoriques, pour réaliser, par l'association des efforts, des actions qu'un individu ne pourrait réaliser à lui seul. La participation de quelques-uns ou de tous au partage du butin ou aux réjouissances, marque que, dès cette époque, l'action d'une société humaine avait pour effet de procurer des satisfactions à des hommes. Les sociétés de nos jours, qu'elles soient formalisées selon des statuts ou qu'elles constituent des groupements de fait comme un groupe d'amis pour une partie de campagne, ont encore ce caractère. Observant la précaution dialectique, s'agissant d'êtres vivants, de distinguer la fonction du but, on appellera :

— *fonction économique* : la fonction des sociétés humaines de procurer des satisfactions à des humains.

On appellera ces satisfactions des *biens* et l'on en distinguera deux classes :

— les *biens matériels* et les *biens esthétiques*.

Une société humaine est donc, comme un être vivant, un mécanisme finalisé. On l'appellera encore une *entreprise*, plus particulièrement quand on le considérera du point de vue de sa fonction économique. Le terme d'entreprise a un sens très général, allant de l'artisan ou du médecin isolé à une nation entière.

2° *Données pour le fonctionnement d'une entreprise.* — Pour réaliser sa fonction une entreprise reçoit des données et les transforme.

a) *L'entreprise en tant que telle fournit le matériel et l'énergie ;*

b) *Les hommes, individuellement, fournissent des informations.*

Ce schéma établit entre les données matérielles et les données informationnelles une coupure qui peut sembler trop rigoureuse. Une société fournit des informations à chacun de ses organes, ateliers ou bureaux, et à ses membres, individuellement, par des bibliothèques, des films ; un manœuvre fournit l'énergie nécessaire à son effort manuel ; mais les informations fournies aux membres pour guider leur travail ont été élaborées par d'autres membres de la société, et le manœuvre guide ses membres dans leur effort au moyen d'informations qu'il conserve dans sa mémoire. Sauf quelques ajustements minimes, la classification reste vraie.

Ainsi la cybernétique renverse l'ordre traditionnel des valeurs, et considère qu'*une entreprise est une société d'hommes groupés pour remplir une fonction économique déterminée et qui, à cette fin, utilisent un matériel.*

3° *Les unités auto-organisatrices.* — Le fonctionnement et la structure des entreprises présentent un trait particulier : en fonctionnement normal, *une entreprise est constituée par des unités auto-organisatrices* qui s'adaptent par elles-mêmes à leur fonction. Par exemple, l'affectation des divers ouvriers ou des diverses équipes aux travaux qui se présentent successivement sur un chantier de travaux publics, normalement ou accidentellement, modifie à chaque instant l'organisation du travail sur le chantier.

La conception d'une entreprise comme un ensemble d'unités auto-organisatrices attire l'attention sur les points suivants, mis en évidence notamment par Donald Eckmann :

a) Dans la détermination des unités constituant une entreprise, *la notion de fonction prime la notion de structure*, puisque la structure se modifie s'il est besoin pour que la fonction soit accomplie ;

b) *Les fonctions sont déterminées par les résultats à obtenir, c'est-à-dire par les buts à atteindre ;*

c) *Les échanges d'informations entre les responsables des diverses unités auto-organisatrices portent sur les buts ou, ce qui revient au même, sur les résultats.*

Il en est ainsi, en particulier, des informations relatives au contrôle de l'efficacité de l'action de chaque organe.

Un contrôle consiste à comparer les résultats obtenus aux prévisions. Il a pour effet, en cas d'écart, de déclencher des opérations correctives.

Mais, tandis que, dans les mécanismes constitués par les machines et les êtres vivants, la correction est répercutée sur l'entrée du mécanisme par un *feed-back*, la correction, dans une entreprise structurée en unités auto-organisatrices, ne peut se faire parfois qu'en modifiant l'action d'un autre organe ; par exemple, si la fabrication est en retard on accélère la livraison. Le *guidage* d'une entreprise ne se réduit pas à l'automatisme d'un *feed-back*, même au sens large que lui donne la biologie.

3. La qualification professionnelle. L'éducation. — La nature et l'étendue des informations qu'un homme peut fournir pour remplir une fonction déterminée dans une entreprise constituent sa *qualification professionnelle*.

1^o **PROBLÈMES D'ORGANISATION.** — Cette notion suggère plusieurs problèmes :

- déterminer la qualification professionnelle convenant à chacune des fonctions de l'entreprise ;
- assurer le maintien de cette qualification à jour de l'évolution des connaissances ;
- choisir le matériel en harmonie avec la qualification professionnelle du personnel dont on peut disposer.

Ces questions relèvent de l'organisation scientifique du travail qui apparaît ainsi comme une partie de la cybernétique. Mais le critère fondamental de l'efficacité conduit à quelques observations nouvelles :

- l'étendue des connaissances théoriques, souvent appelées « générales », requises pour exercer une fonction déterminée est beaucoup plus faible que ne l'estiment les organisateurs des études scolaires, les économistes et même la plupart des chefs d'entreprises ;
- l'automatisation du matériel élimine, au niveau de l'exécution, les cadres moyens et supérieurs et les manœuvres, au profit de la qualification garantie, en France, par un Certificat d'Aptitude professionnelle (C.A.P.).

On peut citer l'exemple d'un train automatique de fabrication d'acide sulfurique débitant 180 tonnes par jour, qui, depuis la prise des pyrites par les grues jusqu'à la mise de l'acide en touries ou wagons-citernes, est conduit à distance par une équipe de quatre jeunes ouvriers issus d'un Centre d'Apprentissage de Conducteurs d'Appareils de l'Industrie chimique. Il subsiste aussi de l'organisation précédente un ingénieur-chimiste, dont l'inutilité est manifeste, car il n'a jamais à intervenir ; même en cas d'incident de fonctionnement, ce n'est pas lui, mais une équipe de spécialistes de l'entretien du matériel qui assurera les réparations.

2^o **LA TRANSMISSION DE L'INFORMATION.** — La qualification professionnelle pour une fonction donnée comprend, non seulement la connaissance des informations à fournir, mais aussi la connaissance de la façon de les présenter pour qu'elles soient assimilées par l'homme qui les reçoit, et qu'elles soient efficaces. Ce problème a été signalé récemment par les Américains sous le nom de problème des

public relations. La cybernétique voit ce problème simplement résolu par *l'apprentissage des moyens de transmission de l'information*.

L'information est toujours transmise entre un émetteur et un récepteur qui doivent être accordés. Les appareils mécaniques ou électriques *transmettent des supports* d'informations qui convoient ou non une sémantique. Lorsque deux hommes échangent des informations, il s'agit de *transmettre des sémantiques*, auxquelles on donne un support approprié. Cette différence en entraîne une autre, d'importance capitale : dans la transmission de supports, d'appareil à appareil, on accorde le récepteur sur l'émetteur ; au contraire, *dans la transmission de sémantiques*, de mentalité humaine à mentalité humaine, *c'est l'émetteur qui s'accorde sur le récepteur*. En particulier, il faut prendre garde au hiatus qui subsiste généralement entre les façons de s'exprimer des cadres ayant reçu une éducation initiale de pure culture, même scientifique, et des hommes qu'ils ont à informer.

Pour parer à cette grave insuffisance de la formation professionnelle, on a créé, il y a quelques années, au Conservatoire national des Arts et Métiers un enseignement sur *l'expression des connaissances techniques*, confié à P. Ducassé, qui est déjà répété régulièrement dans une dizaine d'entreprises de la région parisienne, pour la promotion intérieure du personnel. Dans le même souci, un enseignement de la pédagogie a été introduit, sous ce titre, dans les programmes de l'École de l'Air, à Salon-de-Provence, où l'on forme des officiers.

3^o CIVILISATION ET CULTURE. — La qualification professionnelle concerne les fonctions que peut remplir un homme dans les différentes entreprises qu'offre à son choix la région qu'il habite, la nation dont il est citoyen, et même, de plus en plus, l'humanité entière. Le sens large du terme d'entreprise veut que sous le vocable de *formation professionnelle* soit entendue d'abord l'acquisition des connaissances communes à toutes les professions possibles ; notamment la connaissance de la langue, du mode de vie des hommes en société et des êtres naturels sur lesquels ils agissent ; ces connaissances communes

seront complétées progressivement par des connaissances de spécialité.

Mais l'activité mentale des hommes a produit au cours du temps une multitude, très diversifiée, de biens, dont la possession ou la connaissance n'est pas nécessaire à la qualification professionnelle, mais qui sont sources de satisfactions esthétiques. Nul ne songerait à priver les hommes de ces satisfactions. Mais beaucoup demandent que quelques-uns de ces biens esthétiques soient le fondement de l'éducation des jeunes, dont la formation professionnelle viendrait en complément.

Ces deux points de vue ont été placés par Gaston Berger sous les vocables de « civilisation » et « culture » :

- *la civilisation est le comportement d'une population d'humains dans une région géographique et à une époque déterminées ;*
- *la culture est la forme personnelle de la vie de l'esprit.*

En ces termes :

- l'activité professionnelle concerne la civilisation, plus particulièrement même la fonction économique que remplit tout groupe humain : tout homme, dans les civilisations actuelles, a une profession, pour laquelle il doit acquérir une *qualification professionnelle* convenable ;
- la culture est une activité mentale libre.

Ainsi la cybernétique, s'appliquant à l'action éducative, a dû examiner les buts de l'éducation. La conception générale de Gaston Berger suggère la méthode générale que voici :

- donner à l'homme une *qualification professionnelle* qui lui permette de remplir une fonction parmi celles que nécessite le maintien et l'amélioration de la civilisation à laquelle il appartient ;
- donner à l'homme les moyens de développer sa *culture*, c'est-à-dire lui offrir les objets d'une activité mentale librement choisie, qu'exige son état d'homme.

4. **La pédagogie cybernétique.** — La *pédagogie*, au sens large du terme, est constituée par les *moyens de*

transmettre des informations qui se fixent dans la mémoire du récepteur.

Des moyens nouveaux sont suggérés par les analyses cybernétiques poursuivies dans les pages précédentes, dont l'essentiel peut se résumer comme suit :

- les *connaissances* sont constituées en *classifications*, conservées dans la mémoire ou dans des documents ;
- l'*utilisation des connaissances* se fait par des raisonnements dont le mécanisme se rattache à deux types : *raisonnement déductif* et *raisonnement analogique*.

Les classifications en usage sont des conventions sociales établies au gré des circonstances. Le conditionnement au raisonnement déductif résulte du développement d'un mécanisme mental. L'aptitude au raisonnement analogique résulte du développement de l'imagination, sous contrôle expérimental.

La cybernétique apporte à la pédagogie le souci de l'efficacité, et sur de nombreux points, des moyens, déjà éprouvés, d'accroître l'efficacité de l'action pédagogique.

1^o MÉMORISATION DES CONNAISSANCES. — L'apprentissage de la machine à écrire suggère une voie pour la mécanisation de la mémorisation des connaissances.

Une élève fait des gammes dactylographiques. Elle lit une lettre sur une gamme, frappe une touche, lit la lettre frappée, puis lit la lettre suivante sur la gamme si la lettre frappée est bonne, sinon se corrige. A ces opérations correspond le schéma suivant d'opérations mentales : la lettre lue sur la gamme déclenche le système d'ordres de commande des muscles qui fait frapper la touche correspondante ; ces ordres, liés à

l'image de la lettre, étaient dans la mémoire, ils constituent une sémantique liée au support constitué par le dessin de la lettre ; la lettre frappée est comparée à la classe de lettres à laquelle appartient la lettre de la gamme ; une décision est prise en conséquence de cette comparaison : notamment, si la comparaison décèle une discordance, les opérations sont répétées jusqu'à ce que la lettre de la gamme tire de la mémoire le jeu d'ordres musculaires qui lui correspond.

On remplace maintenant la lettre lue sur la gamme par une question en langage ordinaire dont la réponse est dans la mémoire, et on fait suivre cette question de quatre propositions de réponse correspondant chacune à une touche différente d'un clavier. Selon que la touche abaissée correspond à la bonne réponse ou non, un viseur indique quelle question on peut prendre pour suivre ou quel paragraphe du cours il faut revoir. L'appareil ainsi conçu est une *machine à enseigner*.

Sans entrer dans un exposé technologique, on rappellera seulement que :

a) *On peut apprendre par ce moyen toutes les matières d'enseignement autres qu'esthétiques ;*

b) Les résultats obtenus aux Etats-Unis où cette méthode a été appliquée à des centaines de milliers d'élèves seraient les suivants :

- statistiquement, *la valeur moyenne des classes ainsi enseignées est supérieure, en fin d'année, à celle des classes qui ont été enseignées selon les méthodes classiques ;*
- individuellement, chaque élève est mis en situation de progresser au rythme qui correspond à ses aptitudes propres, et *l'élite se trouve plus nettement dégagée ;*
- le rôle du *professeur* devient d'exposer les connaissances essentielles auxquelles les mécanismes mentaux sont appliqués ; son action, épurée en quelque sorte et dirigée vers son but véritable, devient ainsi *plus efficace* dans la recherche de ce but.

2^o PRÉSENTATION DES CONNAISSANCES. — Les machines à enseigner assurent la fixation des connaissances dans la mémoire. Le premier contact avec des notions nouvelles peut se faire de manières diverses ; aux deux extrémités de l'éventail des méthodes, on trouve l'exposé oral par un professeur, selon la tradition, et l'exposé par la machine elle-même.

La présentation par les machines et l'enseignement des matières touchant à la technologie ont montré que *la progression* doit être *très lente*, de façon qu'il ne soit présenté à la fois qu'une notion nouvelle, et non une combinaison de notions nouvelles, même si elle s'énonce au moyen d'un seul mot. C'est ce que l'on a appelé l'*atomisation* de l'information. Cette condition doit être observée même pour les élèves à mémorisation rapide : pour eux, c'est le nombre des répétitions nécessaires qui se trouve réduit.

3^o LA CONNAISSANCE CYBERNÉTIQUE. — Cette condition pose le problème suivant : existe-t-il une *classification des connaissances* qui soit *la plus efficace*, soit pour l'utilisation des connaissances, soit pour leur mémorisation mécanique ?

Une telle question ne pouvait être posée que par la cybernétique ; elle n'est de l'ordre de soucis ni de l'esthétique, ni de la science, ni des techniques, que l'on considère couramment comme une « application » de la science : la cybernétique peut dès à présent donner une réponse partielle.

a) Une classification est meilleure qu'une autre, si les classes qui la composent ont un système plus simple d'attributs essentiels ou/et un nombre plus élevé d'attributs accidentels ;

b) La définition d'une classe doit être accompa-

gnée, au moment de sa mémorisation, du domaine d'efficacité de la classe, et de sa compréhension avec l'indication des définitions équivalentes.

Un exposé des connaissances construit selon ces critères constitue *la connaissance cybernétique*. Il est en cours d'élaboration.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- Norbert WIENER, *Cybernetics*, Paris, Hermann, 1948.
— *The human use of human beings*, Cambridge, University Press, 1950.
- Ross ASHBY, *Introduction à la cybernétique*, Paris, Dunod, 1956.
- Louis COUFFIGNAL, *Information et cybernétique. Les notions de base*, Paris, Gauthier-Villars, 1958.
— La cybernétique des machines. *Structure et évolution des techniques*. 39-40 et 43-44, 1956.
— La cybernétique. *Encyclopédie française*, t. IX : *L'univers économique et social*.
- Henryk GRENIOWSKI, *La cybernétique sans mathématiques*, Paris, Gauthier-Villars, 1963.
- Walter GREY, *Le cerveau vivant*, Genève, Delachelle, 1956.
- Stanley JONES, *La cybernétique des êtres vivants*, Paris, Gauthier-Villars, 1962.
- Henri LABORIT, *Physiologie humaine*, Paris, Masson, 1961.
- Gaston BERGER, *Civilisation et culture, Prospective*, 3, 1959.
- François BONSACK, *Information, thermodynamique, vie et pensée*. Paris, Gauthier-Villars, 1961.
- Donald ECKMAN, *On some basic concepts of general system theory, Actes des Congrès internationaux de Cybernétique*, Namur, III^e Congrès.
- R. PRUDHOMME, *La construction des machines automatiques*, Paris, Gauthier-Villars, 1962.
- François PAYCHA, *La cybernétique de la consultation*, Paris, Gauthier-Villars, 1965.

Périodiques :

- Cybernetica*, Namur, Association internationale de cybernétique.
Kybernetik, Berlin, Springer.
Information and Control, New York, Academic Press.
Revue de Pédagogie cybernétique, Paris, Gauthier-Villars.
-

TABLE DES MATIÈRES

	PAGES
CHAPITRE PREMIER. — Historique	5
I. La cybernétique de Wiener, 5. — II. La pensée cybernétique dans les sciences exactes et la construction mécanique, 6. — III. La pensée cybernétique dans les sciences de l'être vivant, 7. — IV. La pensée cybernétique et la métaphysique, 8. — V. Discordances, 8. — VI. Etudes doctrinales récentes, 10.	
CHAPITRE II. — Les notions de base	12
I. Situation de départ, 12. — II. L'être humain. Le milieu extérieur, 14. — III. Première analyse de l'action, 15. — IV. Les mécanismes, 25. — V. L'information, 31. — VI. L'analogie, 52. — VII. Propos d'étape, 58.	
CHAPITRE III. — La pensée cybernétique.....	60
I. Classifications, 60. — II. Le raisonnement déductif, 65. — III. Le raisonnement analogique, 73. — IV. La pensée cybernétique, 76.	
CHAPITRE IV. — L'impact de la cybernétique.....	78
I. Les machines, 78. — II. Les êtres vivants, 105. — III. Les modèles mathématiques, 109. — IV. Les sociétés humaines, 115.	
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	127

Que sais-je ?

Collection dirigée par Paul Angoulvent

Derniers titres parus

1278. Grammaire du russe (J. VEYRENC).
1279. Les philosophes français d'aujourd'hui (P. TROTIGNON).
1280. L'Ancien Testament (Ed. JACOB).
1281. Histoire de la langue latine (J. COLLART).
1282. La cellulose (M. CHENE et N. DRISCH).
1283. La génétique des populations (E. BINDER).
1284. Le Pérou (O. DOLLEUS).
1285. Patois et dialectes français (P. GUIRAUD).
1286. La littérature grecque chrétienne (A.-M. MALINGREY).
1287. La musique concrète (P. SCHAEFFER).
1288. La culture d'organes (M. SIGOT).
1289. Le travail au XIX^e siècle (Cl. FOHLEN).
1290. L'arsenic et ses composés (R. DOLIQUE).
1291. L'athéisme (H. ARVON).
1292. Géographie du Japon (J. PEZEU-MASSARAU).
1293. Les particules élémentaires (T. KAHAN).
1294. L'énergie solaire (R. PEYTURAU).
1295. Crises et récessions économiques (M. FLAMANT et J. SINGER-KEREL).
1296. Les cristaux (R. HOCART).
1297. L'oscillographe cathodique (R. RATEAU).
1298. Sociologie des révolutions (A. DECOUPLÉ).
1299. Les malades et les médicaments (A. LE GALL et R. BRUN).
1300. Les isolants (Cl. HURAUX).
1301. Histoire des doctrines politiques en Allemagne (J. DROZ).
1302. La vie dans l'Egypte ancienne (F. DAUMAS).
1303. L'électronique quantique (D. LAUNOIS).
1304. Histoire de la Tchécoslovaquie (P. BONNOURE).
1305. La médecine agricole (J. VACHER).
1306. La dynamique des groupes (J. MAISONNEUVE).
1307. L'hygiène des voyages (Fr. PAGÈS).
1308. L'Afrique orientale (A. BOURDE).
1309. La guerre de Cent ans (Ph. CONTAMINE).
1310. Histoire de la Corée (LI OGG).
1311. Le structuralisme (J. PIAGET).
1312. L'égyptologie (S. SAUNERON).
1313. La télévision en couleur (R. GUILLIEN).
1314. L'unité allemande (P. AYÇOBERRY).
1315. Les Guyanes (M. DEVÈZE).
1316. Les accélérateurs de particules (D. BOUSSARD).
1317. Le mercure (Cl. DUVAL).
1318. La thermo-analyse (M. HARMELIN).
1319. Les présocratiques (J. BRUN).
1320. La géodésie (M.-P. DUPUY).
1321. L'économie de l'Espagne (M. DRAIN).
1322. L'utilisation des microbes (P. MANIL).
1323. Le commerce extérieur (A. BAVELIER).
1324. La conduite des automobiles (J. RIVES).
1325. Les mois savants (P. GUIRAUD).
1326. Les prêts hypothécaires (C. ALPHANDÉRY).
1327. Le droit public (A. DEMICHEL et P. LALUMIÈRE).
1328. Histoire du Japon (des origines à Meiji) (M. VIÉ).
1329. La balance des paiements (J. WEILLER).
1330. La pollution atmosphérique (P. CHOVIN et A. ROUSSEL).