

**Revue Internationale de**

ISSN 0980-1472

**systemique**

Vol. 2, N° 2, 1988

**afcet**

**Dunod**

**AFSCET**

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

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

volume 02, numéro 2, pages 215 - 231, 1988

La mécanique comparée  
(suite et fin)

Louis Couffignal

Numérisation Afcset, janvier 2016.



Creative Commons

SAGE, A.P., «Knowledge, Skills and Information Requirements for Systems Design», in Rouse W.B., and Boff, K.R., (Eds), *System Design, Behavioral Perspectives on Designers, Tools and Organizations*, Elsevier, North.

SAGE, A.P. (ED), *System Design for Human Interaction*, IEEE Press, 1987b.

SOMMERVILLE, I., *Software Engineering*, Addison Wesley, 1985.

STEPHANOU, H., and SAGE, A.P., «Perspectives on Imperfect Information Processing», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC 17, No. 3, May 1987.

U.S. Department of Defense, DOD-STD-2167, Military Standards for Defense Systems Software Development, June, 1985.

U.S. Department of Defense, DOD-HDBK-287, Handbook of Defense System Software Development, 1985.

YAU, S.S., and TSAI, J.J.P., «A Survey of Software Design Techniques», *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 12, No. 6, oo. 713-721, June 1986.

YOURDON, E., and CONSTANTINE, L.L., *Structured Design*, Prentice Hall, 1979.

ARCHIVES

LA MECANIQUE COMPAREE <sup>1</sup>  
(suite et fin)

Louis COUFFIGNAL

-----

Nous publions ici la fin de l'article de Louis Gouffignal dont nous avons donné le début dans le précédent numéro de cette revue. Ce texte, emprunté au numéro de *Thalès* consacré à la cybernétique (tome 7, 1951, paru en 1953, Presses Universitaires de France), présente, en particulier, un intérêt historique. Il montre, entre autres, quel était le point de vue de l'auteur sur certains aspects de la théorie de l'information. Par ailleurs, il y est parlé d'une machine à calculer, de type arithmétique (donc non analogique), alors en cours de conception (1950), machine dont la construction fut, par la suite abandonnée.

L'ouvrage «Cybernétique», cité pour signaler un texte de Pierre Chavasse, intitulé plus précisément «la Cybernétique, théorie du signal et de l'information» (Editions de la Revue d'Optique, Théorique et Instrumentale, Paris, 1951) réunissait les communications présentées au cours du Cycle de conférences organisées, au printemps de 1950, sous la direction de Julien Lœb, dans le cadre du «Séminaire de Théories Physiques de l'Institut Henri Poincaré», sous la Présidence de Louis de Broglie (un cycle de ce genre, sous la même présidence, avait alors

1. Texte publié dans *Thalès*, tome 7, année 1951 (paru en 1953), pp. 24-36. Nous remercions les Presses Universitaires de France de nous avoir autorisés à reproduire ce document.

lieu chaque année, depuis 1944, et était consacré à un sujet d'actualité se rapportant aux théories physiques). Louis de Broglie s'était intéressé, à cette époque, à la théorie de l'information et à la cybernétique. C'est lui qui proposa de traduire negentropy par neguentropie (et non pas négentropie ambigu par sa prononciation). Louis Couffignal fait allusion à sa thèse consacrée aux machines à calculer, elle faisait jouer un rôle important à la numération binaire. Plus loin il signale son ouvrage «Les machines à penser», précisons qu'il fut publié, en 1952, aux Editions de Minuit (Paris).

Robert Vallée

La cybernétique s'apparente étroitement à l'étude des régulateurs, mais la définition qu'en donne M. Norbert Wiener est assez imprécise, plusieurs auteurs l'ont déjà noté. On lit dans *Cybernetics*, p. 19 :

We have decided to call the entire field of control and communication theory, whether in the machine or in the animal, by the name *Cybernetics*.

Il semblerait que la régulation tout entière doive entrer dans le domaine de la cybernétique ; la commande (control), que M. N. Wiener différencie de la communication, serait sans doute la composante de la fonction de régulation que nous avons appelée la fonction logique ; mais on ne voit pas clairement, dans ce cas, ce que pourrait être — car elle n'est pas encore édiflée, tant s'en faut — la théorie (au singulier) de fonctions mécaniques aussi dissemblables par essence que les fonctions de transmission et la fonction logique des régulateurs. Mais, ajoute M. N. Wiener dans la phrase qui suit celle que nous venons de citer :

In choosing this term, we wish to recognise that the first significant paper on feed-back mechanisms is an article on governors, which was published by Clerk Maxwell in 1868... We also wish to refer to the fact that steering engines of a ship are indeed one of the earliest and best developed forms of feed-back mechanisms.

Il semblerait, d'après ce texte, que M. N. Wiener réduit la cybernétique à l'étude des feed-back, qui sont croyons-nous, des régulateurs dans lesquels une partie de l'action motrice est ajoutée à l'action du milieu extérieur, jouant le rôle d'une information interne ; la cybernétique

que serait alors la théorie de cette espèce particulière de régulateurs. Nous avons déjà montré comment une application non explicite du principe de comparaison de Schweitzer a conduit à donner au mot feed-back une signification nouvelle à laquelle correspond un domaine accru ; dans les machines naturelles appartenant à cette classe, c'est, non plus l'action du feed-back considéré, mais l'état des organes de la machine entière provoqué par l'action de ce feed-back *et de milliers d'autres* agissant en même temps qui constitue l'information interne ; il faudrait donc appeler feed-back toute machine composée de feed-back, au sens de la première extension de ce terme pour faire entrer l'étude du système nerveux dans la cybernétique. Or il semble bien dans la pensée de M. N. Wiener d'englober dans la cybernétique toute machine qui contient des feed-back et de faire de la possession des feed-back une condition pour entrer dans la cybernétique, du moins lorsqu'il dit, à la p. 36 de *Cybernetics*,

It has long been clear to me that the modern ultra-rapid computing machine was in principle an ideal central nervous system to an apparatus for automatic control ; and that its input and output need not to be in the form of numbers or diagrams, but might very well be, respectively, the reading of artificial sense-organs such as photo-electric cells or thermometers, and the performance of motors or solenoids. With the aid of strain gauges or similar agencies to read the performance of motor organs and to report, to feed-back, to the central control system as an artificial kinaesthetic sense, we are already in a position to construct artificial machines of almost any degree of elaboratedness of performance.

La machine à calculer, si nous comprenons bien, n'intéresse la cybernétique que dès le moment où on l'a complétée par un organe d'information interne qui permette à l'ensemble d'exécuter des opérations de régulation : nous voici revenus aux régulateurs. Il serait donc extrêmement désirable que les cybernéticiens qui se reconnaissent pour tels donnent une définition précise au moins de ces deux termes : *feed-back* et *cybernétique*.

De toute façon, théorie des feed-back et cybernétique, si on leur demande de servir à étendre les connaissances de l'homme en matière de biologie, ne pourront éviter d'appliquer les principes et méthodes de raisonnement que nous avons déjà énoncés et que nous reprenons ci-après sous une forme plus systématique :

**1. Définition d'une machine :** *On appelle machine un ensemble d'éléments matériels agencés de manière à exécuter une opération définie.*

**II. Définition d'une fonction mécanique :** *On appelle fonction mécanique toute opération qui peut être réalisée par une machine.*

**III. Définition d'une classe de machines :** *On dit que les machines destinées à exécuter la même opération constituent une classe de machines ; cette classe est définie par la fonction de ces machines.*

**IV. Principe de Hiérarchisation :** *(Principe de comparaison de Schweitzer). Si les fonctions mécaniques de plusieurs classes de machines ont des fonctions composantes communes, on peut constituer une classe contenant les machines de ces diverses classes, dont la fonction est composée de ces composantes communes.*

**V. Méthode d'analogie :** *Si deux machines appartiennent à une même classe on peut présumer qu'elles possèdent des attributs identiques, fonctions mécaniques et structures d'organes, autres que ceux qui figurent dans la définition de leur classe.*

**VI. Principe d'économie :** *De deux machines réalisant la même fonction, on estime meilleure celle qui nécessite la plus faible dépense d'énergie pour sa construction ou dans son fonctionnement.*

L'application de ces principes a pour domaine l'ensemble des machines, naturelles et artificielles, existantes ou possibles. Ce domaine couvre certainement le domaine dévolu à la partie de la cybernétique qui concerne les machines, et, sans doute, le déborde largement.

Nous proposons d'appeler la discipline qui s'attacherait à l'application systématique de ces principes : la *mécanique comparée*.

A titre d'exemples, nous voudrions exposer brièvement comment se situe la théorie de l'information au regard de la mécanique comparée, et quelles suggestions permet dès à présent l'application de la méthode d'analogie aux machines à calculer arithmétiques et au système nerveux.

Il sera utile, auparavant, de formuler 3 principes complémentaires qui dérivent du principe d'économie.

**VII. Principe du cumul des fonctions :** *Un même organe participe, autant qu'il est possible, à la réalisation de plusieurs fonctions mécaniques.*

**VIII. Principe du maximum d'automatisme :** *Dans une machine naturelle, si un guidage n'est pas nécessaire, il n'existe pas.*

**IX. Principe du raisonnement le plus court (ou des passerelles) :** *Lorsque deux raisonnements complets sont tels que le premier comporte une passerelle du second, le premier (le plus court) est généralement plus efficace.*

Le problème fondamental des communications, dit M. C.E. Shannon, est de reproduire en un point, soit exactement, soit approxi-

mativement, un message élaboré en un autre point. La question est placée sans ambiguïté sur le terrain de l'art de l'ingénieur : il s'agit de construire une machine propre à reproduire un message. Bien que M. Shannon ne le dise pas de façon explicite, il est demandé à cette machine de posséder, au plus haut degré possible, les trois qualités que l'on demande à toute machine : *sécurité* et *rapidité* de fonctionnement, *faible prix de revient du travail* qu'elle effectue ; cette dernière qualité étant généralement une conséquence des deux premières, c'est à celles-ci qu'il convient de s'attacher d'abord. Si l'on met en évidence la valeur sémantique du message, qui est, au fond sa seule raison d'être, et la véritable « chose » qu'il s'agit de transmettre, le problème fondamental des communications est de reproduire en un point un message proposé en un autre point, avec assez d'exactitude pour que la valeur sémantique du message ne soit pas altérée, et dans une durée la plus brève possible.

C'est d'abord la transmission télégraphique d'un texte écrit dans une langue connue qui a posé ce problème. Un télégraphe possède les fonctions mécaniques ci-après : représentation matérielle des mots à reproduire par des *signaux*, appelée aussi *codage*, transmission des signaux, reconstitution des mots à partir des signaux, appelée aussi *décodage* ; à ces fonctions correspondent trois organes appelés l'émetteur, le canal, le récepteur.

L'ensemble des mots d'une langue étant fini, ainsi que l'ensemble des symboles graphiques distincts dont la combinaison permet une écriture de ces mots, une représentation abstraite parfaite de l'ensemble de ces symboles consiste à les numéroter. Le message à transmettre est donc équivalent à une suite de nombres pris dans un segment de la suite des entiers, et l'on démontre en quelques lignes que le minimum des signaux nécessaires pour représenter ces nombres s'obtient en les écrivant dans le système binaire (système de numération de base 2). Les signaux sont alors de deux espèces, 1 et 0 ; il faut aussi pour séparer les mots, un signal d'une troisième espèce, dit signal de *fin de mot*.

L'écriture de la combinaison de signaux 0 et 1 représentant une lettre est identique à l'inscription d'un nombre sur un clavier complet binaire ; ces combinaisons se répartissent donc en groupes formés par les nombres que l'on peut écrire sur des chiffreurs binaires des capacités 1, 2, 3, ..., *k*, comme l'indique le tableau ci-après :

1. L. Couffignal, thèse, 1938, p. 86.

Numéro des symboles	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11, etc.
Symboles	0	I	00	IO	OI	II	000	I00	OIO	IIO	OOI, etc.
Capacité	I		2		3		3		3		etc.

Les signaux de lettres sont séparés par un signal spécial d'une quatrième espèce, dit signal de *fin de lettre*.

Si l'on désigne par  $f_i$  la fréquence du symbole de rang  $i$  dans un message de  $N$  symboles et par  $t_i$  sa durée, la durée moyenne totale de transmission des symboles du message est :

$$T = N \sum f_i t_i$$

Or, si l'on se donne  $p$  nombres  $t_i$  et  $p$  nombres  $f_i$ , si on les range en deux suites

$$(t) \quad t_{\alpha 1}, t_{\alpha 2}, t_{\alpha 3}, \dots, t_{\alpha j} \dots$$

$$(f) \quad f_{\beta 1}, f_{\beta 2}, f_{\beta 3}, \dots, f_{\beta j} \dots$$

et si l'on associe le nombre  $t_{\alpha i}$  au nombre  $f_{\beta i}$ , on démontre aisément que la somme  $\sum f_{\beta i} t_{\alpha i}$  est minima lorsque la suite  $(t)$  est non décroissante et la suite  $(f)$  non croissante.

La règle très simple que voici définit donc le meilleur code : On range les symboles binaires dans l'ordre croissant de leurs durées de transmission, les fréquences des lettres dans l'ordre décroissant, et l'on représente une lettre par le symbole binaire de même rang que la fréquence de cette lettre.

Dans le cas où les signaux 0 et I ont la même durée de transmission (cas du télétype) elle conduit, pour l'alphabet français, avec les fréquences données par M. Chavasse dans *Cybernétique*, p. 165, au code indiqué dans le tableau ci-après, col. 4, sous le nom de code direct.

Nous avons indiqué, col. 3, le code qui résulte de l'application de la règle de M. Fano, laquelle donne le même résultat que la règle donnée par M. C.E. Shannon pour démontrer que le nombre  $H$  qu'il appelle entropie par symbole mesure le quotient du nombre minimum de signaux nécessaires pour transmettre un message de  $N$  symboles par le nombre  $N$  de ces symboles. La comparaison des deux codes montre que le code de M. Shannon n'est pas le meilleur possible du point de vue de la rapidité de transmission. Dans l'exemple même de M. Shannon, le code de 4 nombres de fréquences  $1/2, 1/4, 1/8, 1/8$  proposé par M. Shannon en application de sa méthode de codage : 0, IO, II, III qui a une «entropie» de  $7/4$  de signal par symbole peut être remplacé par le suivant : 0, I, 00, II, qui demande seulement  $5/4$  de signal par symbole.

1 lettres	2 fréquence en %	3 code Shannon	4 code direct	1 lettres	2 fréquence en %	3 code Shannon	4 code direct
e.....	15,09	000	0	q.....	1,34	IIIOII	OIOO
s.....	8,50	00I	I	f.....	1,11	IIIOO	IIOO
i.....	7,38	OIOO	00	b.....	0,87	IIIOIO	OIOO
n.....	7,24	OIOI	IO	h.....	0,81	IIIOII	IOIO
t.....	7,08	OIIO	OI	g.....	0,77	IIIOO	OIOO
a.....	6,94	OIII	II	j.....	0,60	IIIOIO	IIIO
u.....	6,83	I000	000	à.....	0,45	IIIOII	000I
r.....	6,33	I00I	I00	è.....	0,40	IIIOO00	I00I
l.....	5,69	IOIO	OIO	x.....	0,37	IIIOO0I	OIOI
o.....	5,37	IOII	IO	é.....	0,28	IIIOIO	IIOI
d....	3,67	II000	00I	y.....	0,267	IIIOOII	00II
c....	3,09	II00I	IOI	z.....	0,131	IIIOO	IOII
m...	3,04	II0IO	OII	d.....	0,08	IIIOOIO	OIII
p....	2,76	II0II	III	ç.....	0,07	IIIOOIO	III
é.....	1,89	IIIOO	0000	ô.....	0,03	IIIOOIO	00000
v....	1,52	IIIOIO	I000	w.....	0,002	IIIOOIII	10000

On ne saurait conclure de cet exemple que les raisonnements de M. C.E. Shannon sont faux, ou sa théorie utile. Nous voudrions seulement, à cette occasion, attirer l'attention sur l'importance des quelques notions que nous avons définies au début de cette étude. M. C.E. Shannon représente la structure d'une information *quelconque* par un certain nombre de variables empruntées au calcul des probabilités ; les résultats qu'il obtient répondent mal, dans le cas des communications télégraphiques, à la question posée ; la conclusion correcte à tirer de cette constatation est que la représentation symbolique adoptée est trop abstraite, qu'elle néglige des propriétés des êtres à propos desquels était posé le problème qui ont une influence non négligeable sur la solution de ce problème : M. C.E. Shannon a établi une théorie de problèmes posés par une technique ; les raisonnements qu'il a faits se schématisent dans la partie gauche de notre figure 1 ; mais un problème technique n'est résolu que par un raisonnement complet : la comparaison des solutions que l'on peut donner de ce problème sous-entendue dans le théorème 9 de M. C.E. Shannon n'est pas efficace parce qu'elle ne s'applique pas à des raisonnements complets. En des termes voisins, on pourrait dire que la télégraphie n'appartient pas au domaine dans lequel on peut appliquer la théorie de M. Shannon avec une efficacité technique acceptable. Le raisonnement que nous avons

fait et qui donne de meilleurs résultats, est une passerelle du raisonnement fait par M. Shannon en application de ses théories ; il est plus efficace parce que les symboles représentent les êtres soumis au raisonnement de façon moins imparfaite ; c'est en ce sens que doit s'interpréter souvent le principe du raisonnement le plus court (Principe IX, ci-dessus).

Une application plus stricte de la définition d'une machine conduit encore à concevoir la solution du problème de la transmission télégraphique dans le cas où des erreurs de transmission des signaux sont possibles de façon assez différente de celle de M. Shannon.

La transmission télégraphique doit conserver la valeur sémantique de chaque message, nous l'avons déjà noté. Or, il suffit d'un exemple pour s'assurer qu'une même erreur de transmission de signaux prend des valeurs sémantiques très différentes selon le message dans lequel elle se rencontre. La substitution de *é* à *i* peut être grave de conséquences si elle se produit dans le mot *décidé*, qui devient ainsi *décédé*, mais est d'effet négligeable dans le mot *décidément*, que tout le monde saura rétablir s'il a été écrit par accident *décédément*.

Une simple statistique du nombre des erreurs ne donne donc aucune indication valable sur la valeur sémantique des messages reçus ; une analyse très détaillée de l'influence de chaque erreur possible est nécessaire, et des mesures prises pour éviter « avec une probabilité aussi voisine de 1 qu'on le veut » les erreurs de grande conséquence. Ces mesures, même, seront adaptées au mode d'introduction des messages dans la machine ; en particulier si l'application du code est faite par une opération intellectuelle, comme dans la transmission par manipulateur Morse, il est aisé d'attirer l'attention de l'opératrice sur les mots où peuvent se glisser des erreurs graves ; et cette précaution peut s'ajouter à celle qui consiste à coder les lettres qui peuvent provoquer des erreurs (*é* et *i* de notre exemple) par des combinaisons de signaux 0 et 1 très différentes ; cette dernière précaution est la seule possible quand le codage est mécanique, comme dans le télétype.

Des relations logiques étroites existent bien entre les propriétés mécaniques de la voie de transmission, la structure du code et la valeur sémantique des signaux transmis, et ce sont ces relations que la technique doit prendre en considération, mais elles échappent en ce qui concerne les voies discrètes de transmission tout au moins, à la théorie de M. C.E. Shannon.

Les remarques que nous venons de faire montrent en outre quelle importance peuvent prendre les fonctions d'une machine artificielle au

moyen desquelles s'établissent les relations, inévitables, entre la machine et l'homme, et que l'on peut appeler les *fonctions de relations* (ou *fonctions relatives*) de la machine ; elles ont généralement pour organes, à l'entrée de la machine, des leviers, des manettes, des volants, des curseurs, des claviers, etc. à la sortie, des cadrans, des viseurs, des imprimeries, ou d'autres organes.

Il est assez aisé de voir, à la lumière de la mécanique comparée, la place occupée par les transmissions dans le système nerveux, et la place que pourrait occuper dans la physiologie une théorie des transmissions.

On peut, d'abord, reconnaître au système nerveux deux fonctions qui conduisent à considérer comme des machines les parties de ce système qui les réalisent. L'une est le maintien de certaines grandeurs physiologiques, température du corps, acidité du sang, etc. entre les limites fixes et très voisines qu'exige la conservation de la vie de l'individu. Or les organes dont le fonctionnement tend à écarter ces grandeurs de leur valeur normale ne sont pas les mêmes que ceux qui peuvent les y ramener : par exemple, les combustions qui enrichissent le sang en acide carbonique se produisent dans les masses musculaires, tandis que l'oxygénation compensatrice se produit dans les poumons. L'une des fonctions du système nerveux est de constater les variations de ces *constantes biologiques* et de régler par conséquence l'action des organes correcteurs.

Le système nerveux joue un rôle analogue dans la réalisation des fonctions de relation, celles qui assurent les mouvements des membres de l'animal et de l'animal entier. Lorsqu'un chat étend avec précaution la patte pour saisir sans être vu un morceau mal gardé, c'est assurément le système nerveux qui commande et règle la contraction lente de chacun des muscles dont l'action coordonnée réalise le geste voulu. L'organisation et la régulation de ce geste est un objet, un but, proposé pendant quelques instants au système nerveux ; atteindre ce but est une fonction du système.

Maintenir les constantes biologiques et assurer la coordination des mouvements sont donc deux fonctions clairement définies du système nerveux, lequel en conséquence satisfait, en certaines de ses parties, à la définition d'une machine.

Le maintien des constantes biologiques paraît différer de la coordination des mouvements, car la première de ces fonctions consiste à réduire des écarts accidentels et la seconde à réaliser des configurations très différentes des configurations initiales, à faire atteindre à

certaines parties du corps des points fort éloignés des points initialement occupés par eux. Cette différence est tout extérieure : dans les deux cas, la machine est informée de l'état du milieu extérieur et de son état propre, et elle déduit de ces informations les informations à transmettre aux ordres moteurs ; dans le cas du maintien des constantes biologiques, il figure parmi les informations internes la valeur de la constante à maintenir, et dans le cas de la coordination des mouvements, la configuration du corps qu'il faut réaliser. Dans les deux cas, donc, la machine naturelle que constitue la partie du système nerveux considéré appartient à la classe des régulateurs : les organes d'information motrice sont les *nerfs moteurs* (moteurs des sécrétions glandulaires, des contractions musculaires, etc.), les organes d'information externe les *nerfs sensoriels*, les organes d'information interne les *nerfs propriocepteurs* et aussi les nerfs qui apportent l'information du but à atteindre et qui, dans le cas de la coordination des mouvements, pourraient être appelés les *nerfs volontaires*, car ils apportent généralement des informations issues du cerveau et qui sont de la nature des manifestations de l'esprit que l'on groupe dans la catégorie de la volonté.

Les régulateurs naturels peuvent, comme les régulateurs artificiels, ne point comporter toutes les fonctions composantes de la fonction régulatrice : dans le cas d'une réaction musculaire commandée par arc réflexe simple, dont l'existence semble bien expérimentalement établie, il n'y a pas d'action des nerfs propriocepteurs, la fonction d'information interne manque, comme dans le régulateur de Watt. Dans la mesure où nous comprenons exactement le sens du mot *feedback*, nous dirions que les régulateurs naturels de ce type ne sont pas des *feedback*.

Par contre, la fonction logique ne saurait être absente, car c'est elle qui déduit des informations reçues les informations motrices émises par le régulateur.

Dans les cas des régulateurs naturels constitués par des parties du système nerveux, les organes de transmission sont les nerfs. Une propriété essentielle d'un neurone est que les caractéristiques électriques de l'impulsion qui le parcourt dépendent uniquement du neurone lui-même et aucunement de l'excitation qu'il subit ; trop faible, l'excitation ne produit aucun effet ; à partir d'un seuil, quelle que soit son intensité et son origine, l'excitation produit toujours après un certain délai, le même effet. Cette loi, dite du tout ou rien, résout les problèmes de communication dans les nerfs, qui relèvent de l'analyse des fonctions mécaniques ; le détail des conditions physiques et chimiques

de la production de l'influx nerveux et les lois précises de son cheminement le long d'un neurone dépendent de l'électroneurologie, ils n'interviennent pas immédiatement dans le fonctionnement de l'ensemble de nerfs qui constitue un régulateur naturel. La fonction logique d'un tel régulateur a donc ses organes là où peuvent se combiner les effets des impulsions transmises par des nerfs. Or, on sait que les extrémités des nerfs voisinent mais ne se touchent pas. Elles s'enchevêtrent en une inextricable complexité dans un très petit volume, sans jamais entrer en contact ; cette portion de tissu vivant — au reste assez mal définie — où se rencontrent les extrémités nerveuses a reçu le nom de *synapse*.

La fonction logique des régulateurs naturels constitués par les parties du système nerveux qui assurent la coordination des mouvements et le maintien des constantes biologiques est donc l'une des fonctions physiologiques des synapses. Les principes généraux de mécanique comparée que nous avons mis en évidence conduisent à scinder en deux le problème de la biologie des synapses : le premier consiste à rechercher selon quelles lois doit se faire la combinaison des impulsions, apportées dans une circonstance précise par les nerfs, qui crée l'impulsion de commande du mouvement (par exemple) que l'on sait répondre dans cette circonstance à l'excitation subie par l'animal ; le second consiste à rechercher par quels moyens l'animal réalise cette combinaison au sein des synapses intéressés. La mécanique comparée peut certainement apporter une importante contribution à la résolution du premier problème ; son rôle dans l'étude du second sera sans doute plus restreint.

Le principe du cumul des fonctions apporte cependant, dans les deux cas, cette indication précise que l'organe de la fonction logique des systèmes nerveux régulateurs, qui comprend essentiellement les synapses, peut comprendre aussi certains nerfs, que l'on sait remplir également une fonction d'information externe, interne ou motrice. De ce point de vue, il ne se poserait plus de problème de *transmission synaptique*, si ce n'est dans le cas, rationnellement possible, où une synapse constituerait seulement un relais de transmission pour un nerf trop court, à la manière d'un relais téléphonique, mais l'existence de neurones dont les axones parcourent dans toute leur longueur les animaux les plus grands, de la tête à la queue, rend ce cas peu probable ; la conception d'une synapse comme un point de transfert d'impulsions d'un nerf prédéterminé à un ou plusieurs autres nerfs prédéterminés, par exemple de nerfs sensoriels à des nerfs moteurs, sous des conditions d'inhibition ou de facilitation déterminées par l'action d'au-

tres nerfs semble en disharmonie avec l'anatomie des régions synaptiques ; les diverses influences que subit une région synaptique de la part des nerfs afférents ont la même valeur logique au regard de la combinaison de ces influences qui fixera l'action de la synapse sur des nerfs efférents.

Il ressort de cette analyse que le fonctionnement des synapses ne saurait recevoir une explication efficace d'une théorie des transmissions. Une théorie de la fonction logique des synapses se rattache à la logique au sens classique du mot. On conçoit difficilement qu'elle puisse être une application du calcul des probabilités, malgré la tentative de M. Pitt et McCulloch et malgré l'exemple connu des singes dactylographes de M. E. Borel.

Si l'on prend pour l'un des termes de comparaison les machines à calculer arithmétiques, la mécanique comparée conduit à considérer comme des fonctions mécaniques certaines fonctions du système nerveux et notamment du cerveau, que l'on range de coutume parmi les fonctions psychologiques supérieures.

Les machines arithmétiques les plus complètes possèdent les fonctions mécaniques ci-après : *fonction opérative*, par laquelle des nombres donnés sont combinés selon les règles de l'arithmétique pour former leur somme, leur produit ou leur quotient algébrique, certaines machines pouvant aussi calculer la racine carrée d'un nombre ; *mémoire*, par laquelle sont conservées les règles d'opérations et les résultats intermédiaires, nombres obtenus au fur et à mesure que se déroule la suite des calculs pour servir de données à de nouveaux calculs ; *programme*, par lequel la machine sait quelles opérations elle doit effectuer et dans quel ordre ; enfin, *fonctions relatives*, inscription des données numériques et du programme, prélèvement des résultats, par lesquelles s'établissent les relations entre l'homme et la machine.

Celle de ces fonctions qui apparaît d'abord comme analogue d'une fonction psychologique est la mémoire.

Le problème de la construction des mémoires mécaniques n'a attiré l'attention, du point de vue technique, que lorsque la rapidité de fonctionnement des organes calculateurs a apporté la certitude que les machines pourraient résoudre des problèmes insolubles jusqu'alors. Une machine telle que celle de l'Institut Blaise-Pascal, en cours d'achèvement, qui semble devoir être la plus rapide, peut faire 1 000 opérations par seconde environ, sur des nombres de 15 chiffres décimaux. Pour l'alimenter et en recueillir les résultats à cette cadence, il faut, pour

certain problèmes, une mémoire de milliers de nombres, capable de conserver des dizaines, ou même des centaines de milliers de chiffres.

Afin de faire tenir un si grand nombre de signes dans un volume de matériel non excessif, on choisit toujours pour l'écriture des nombres le système binaire, qui, nous l'avons vu, est celui qui exige le moins d'organes.

Ainsi, les machines arithmétiques binaires possèdent, comme le système nerveux, une mémoire, et les organes de ces machines, comme ceux du système nerveux, suivent une loi de tout ou rien. Si l'on ajoute que l'économie de matériel que permet le système binaire s'harmonise d'heureuse façon avec la loi d'économie de matière dont nous avons déjà donné des exemples, on peut estimer que ces similitudes entre les mémoires mécaniques et le système nerveux sont suffisantes pour justifier l'application plus étendue de la méthode d'analogie.

Les machines à calculer ont deux espèces de mémoire. L'une conserve le souvenir des règles des opérations élémentaires, dont la combinaison constitue les longs calculs dont la machine est capable ; elle conserve aussi certains nombres d'usage universel,  $\pi$ ,  $e$ ,  $M$ , etc. Cette mémoire peut justement être appelée *mémoire permanente*. L'autre mémoire, dite *temporaire*, conserve les résultats intermédiaires.

L'esprit humain, lui aussi, a deux mémoires : les règles de la vie en société et les connaissances qu'elle exige, acquises par l'éducation, appartiennent à la mémoire permanente, ainsi que nombre de souvenirs personnels. Mais combien de perceptions atteignent la conscience, qui sont bientôt oubliées ? Et, au cours d'un raisonnement, combien d'être logiques sont édifiés, dont le souvenir ne dure que quelques instants, jusqu'à ce qu'ils cèdent la place à d'autres auxquels ils ont ouvert la voie ? Ces souvenirs dont la durée, bien que brève, n'est pas nulle, appartiennent à la mémoire temporaire.

Cette similitude fonctionnelle se retrouve dans les organes. Les biologistes ont reconnu que certains concepts sont conservés par des systèmes neuroniques spécialisés, nettement localisés en des régions déterminées du cerveau ; tels sont les centres moteurs du langage, où les mots s'élaborent en forme d'ordres donnés aux muscles des doigts, pour l'écriture, ou aux organes de la phonation. Ces systèmes neuroniques sont des organes de la mémoire permanente. On ne les connaît pas encore tous. La mémoire temporaire fonctionne, au contraire, dans ces vastes régions de l'écorce cérébrale où se combinent les influx messagers de sensations ou de souvenirs, régions que l'on appelle les *zones d'association*. Là s'écoule, selon l'image de William James, le

torrent de la pensée, torrent d'ondes électriques aiguillées selon des voies inextricablement enchevêtrées.

On peut pousser plus avant la comparaison des structures.

Dans les machines à calculer modernes c'est l'organe calculateur et non l'organe de mémoire qui conserve le souvenir permanent des règles d'opérations. Ce mécanisme est constitué par des circuits contenant des tubes électroniques et les règles d'opérations ont pour représentation mécanique la structure géométrique, le dessin de ces circuits, complété par la loi d'intercommande des tubes les uns par les autres. Or l'application de ces règles d'opérations est un raisonnement. Les concepts mis en jeu sont de la même espèce : les nombres algébriques. Que, par un simple jeu de numéros, on fasse représenter à ces nombres des concepts plus divers ou des propositions, et la machine, dans la codification choisie, c'est-à-dire dans son langage à elle, construira des enchaînements de propositions. Ainsi que nous l'avons montré<sup>2</sup> : le dessin des circuits peut être établi de manière que ces enchaînements observent les lois de la logique usuelle. Ces circuits, de plus, sont une image des circuits nerveux. Une description des circuits des machines à calculer équivalent à les décrire comme formés de tubes électroniques reliés par des fils conducteurs, est de dire qu'ils sont formés de tronçons de fils conducteurs ramifiés, dont les extrémités, qui constituent les électrodes des tubes électroniques, viennent voisiner sans se toucher à l'intérieur des tubes. Les fils ont pour analogues les nerfs ; les tubes dans lesquels voisinent leurs extrémités, non jointives, ont pour analogues les synapses. Du point de vue des structures, la méthode analogique conduit donc à considérer que, dans le système nerveux, la mémoire de la logique a pour siège le réseau même des synapses et des nerfs, ces derniers cumulant des fonctions de transmission et des fonctions logiques, ainsi que nous l'avons déjà pressenti. Et nous avons même pu montrer que le dessin de circuits électroniques capables d'opérations logiques se retrouve dans certains circuits nerveux du cerveau.

L'analogie peut même atteindre des structures plus fines. On sait que M. N. Wiener a proposé de considérer les circuits fermés découverts par M. Lorente de No dans le système nerveux comme analogues des circuits fermés des éléments des mémoires à tubes de mercure de certaines machines à calculer. Et nous avons nous-mêmes signalé que l'anatomie d'une région synaptique est semblable à la structure des transis-

2. L. Couffignal, *Les machines à penser*, Paris.

tors, appareils électroniques formés de fils très fins dont les extrémités voisinent au contact d'un cristal de germanium. L'électricité apportée par certains fils se répand dans le cristal selon une distribution compliquée tenant à la structure moléculaire de ce corps et peut atteindre ou non d'autres fils, selon l'état électrique de l'ensemble du système. De façon analogue, lorsqu'un train d'ondes atteint l'extrémité d'un nerf, il déverse dans le tissu synaptique une certaine quantité d'électricité, qui imprègne ce tissu, et s'écoule en observant des lois qui tiennent à la structure du tissu synaptique. Cette analogie ouvre une voie dans la recherche de l'explication de ces deux phénomènes d'apparence singulière : que les influx nerveux qui parcourent les nerfs inhibiteurs et ceux qui parcourent les nerfs facilitateurs sont de même nature, et que dans certaines synapses, le même influx apporté par le même nerf produit tantôt une inhibition tantôt une facilitation. La fonction logique d'une région synaptique aurait ainsi pour représentation biologique certaines propriétés du tissu synaptique.

L'émission de l'influx efférent, édifié dans la synapse à partir des influx afférents, ne se produit qu'après un certain délai. Ce délai doit être considéré, à notre avis, comme une mise en mémoire des concepts représentés par les influx afférents, mise en mémoire de brève durée, sans doute, et bientôt suivie d'oubli ; mais nous avons vu que la propriété d'oublier aussi bien que d'acquiescer est la définition même de la mémoire temporaire.

Ainsi, des organes élémentaires des machines à calculer, circuits fermés de mémoires à mercure et transistors, suggèrent des représentations biologiques des phénomènes de mémoire permanents et de mémoire temporaire. Notons que les synapses, qui seraient à la fois organes de la fonction logique des systèmes nerveux régulateurs et de la mémoire temporaire, offriraient un nouvel exemple de cumul de fonctions.

Une machine à calculer, enfin, a un programme, qui, l'une après l'autre, dicte les opérations à faire à la mémoire et au mécanisme calculateur, lequel est, pour la machine, l'organe du raisonnement. L'homme, par contre, fabrique lui-même son programme, librement et par sa volonté ; ainsi en jugerait, du moins, un observateur extérieur.

Mais pensons à cette abeille maçonner, observée par Henri Fabre, qui sait construire un nid, le remplir de miel, pondre un œuf et fermer le nid, mais qui, si l'on perce le fond de la bâtisse, y verse la quantité de miel prévue, sans s'apercevoir qu'il s'écoule à mesure, dépose l'œuf, qui se perd par le trou, et clôt le haut de la demeure, puis s'envole, satisfaite dans un rayon de soleil.

Pour un observateur extérieur, l'abeille maçonne réalise un programme de gestes successifs et n'est pas capable, ou n'a pas le droit, de le modifier.

Mais l'homéostat de M. Ross Ashby, qui est une machine, est plus intelligent. Quand on confie, dit M. Ross Ashby, la conduite d'un avion à un pilote mécanique, capable de percevoir les écarts de stabilité et d'agir sur les ailerons de manière à corriger ces écarts, si l'on permute les liaisons du pilote aux ailerons, le pilote mécanique agira à contre-sens et l'avion chavirera. Mais un homéostat, à la place du pilote mécanique, sentirait la défektivité des liaisons et permutterait aussitôt ses ordres. Voici apparaître la différence : le pilote mécanique suit des règles rigides, il a un programme ; l'homéostat a un but et il est capable de choisir les actes à accomplir pour atteindre ce but prédéfini. Il en est de même de la tortue artificielle Elsie, construite par M. Grey Walter. Pour un observateur extérieur, cependant, à qui on n'aurait pas dit par avance quel est ce but, la tortue Elsie et l'homéostat auraient un comportement global identique d'aspect à celui qu'un esprit libre imposerait à un être vivant, celui que l'on attribuerait encore à l'abeille maçonne si Henri Fabre n'avait point fait l'expérience célèbre que nous avons rapportée.

Nous atteignons ici la limite actuelle où la méthode de raisonnement analogique cesse de s'appliquer. Il suffit, pour préciser la nature de cette limite, de se souvenir que la méthode analogique se borne à comparer des machines, et qu'une machine, artificielle ou naturelle, est définie par le but qui lui est assigné. On connaît le but d'un modèle mécanique, parce qu'on se l'est fixé *a priori* ; on donne pour but à un organe d'un être vivant, par convention tacite, la fonction qu'on voit qu'il remplit. Mais on ne sait pas dire, sans quitter le domaine de la pensée scientifique, quel est le but de l'animal entier, que l'on voudrait considérer comme une machine ; pas plus le but que poursuit l'abeille maçonne, bien que l'on sache qu'elle a un programme, que le but de l'activité de l'esprit humain. Pour le moment, donc, c'est pièce par pièce, fonction par fonction, que l'on peut tenter de soumettre le système nerveux et les problèmes de la vie à la méthode d'analogie.

Cette constatation donne une signification plus précise à l'inquiétude que pouvait susciter, avons-nous dit, l'ambition d'expliquer au moyen de théories mathématiques déjà construites, la physiologie du système nerveux et le comportement des sociétés humaines. Egalement, elle nuance de prudence l'application du principe du maximum d'automatisme. En application de ce principe, si l'on sait construire

un modèle mécanique automatique pour une fonction d'une partie du système nerveux, on est fondé à avancer que cette partie du système nerveux est une machine naturelle automatique. En particulier, si l'on construit un jour une machine automatique capable de raisonner, on devra de ce jour considérer comme des machines automatiques les parties du cerveau qui fabriquent les mêmes raisonnements.

D'aucuns, à cette conséquence, verront dans le principe du maximum d'automatisme un postulat du matérialisme. L'esprit scientifique est indifférent à de telles interprétations. L'homme capable de séparer en lui-même le méta-physicien de l'homme de science admettra le postulat du maximum d'automatisme comme partie d'une méthode d'investigation permettant de faire progresser la connaissance du système nerveux et d'accroître nos moyens d'action sur cet organe du corps humain aux fins générales de cette action, qui comprennent notamment l'éducation et la guérison des maladies. Mais toute liberté reste au métaphysicien d'admettre l'existence de guidages selon d'autres principes que ceux de la mécanique, même si, du point de vue de la mécanique, ces guidages sont superflus. C'est dire — on n'en est point surpris — que la mécanique comparée n'apporte pas le moyen de résoudre les problèmes de la métaphysique. Elle peut seulement, comme tous les progrès de la science, contraindre à poser en de nouveaux termes ces problèmes éternels.