

Revue Internationale de

ISSN 0980-1472

systemique

Vol. 3, N° 1, 1989

afcet

Dunod

AFSCET

Revue Internationale de
systemique

Revue
Internationale
de Sytémique

volume 03, numéro 1, pages 87 - 103, 1989

Points de contacts entre
neurophysiologie et cybernétique

Alfred Fessard

Numérisation Afscet, décembre 2015.



– Si j'ai bien compris, il s'agit d'espaces dans l'espace qui espacent l'espace, l'espace d'un espace.

– Je vois que vous commencez à comprendre que nous sommes en deçà ou au delà de la compréhension habituelle. Je suis donc rassuré et mon intervention se termine. Maintenant vous êtes capable de voir mon pays. Donc vous ne pouvez plus l'ignorer, le disjoindre, le mutiler comme on écrase l'insecte qu'on ne voit pas. Vous avez fait les premiers pas de votre apprentissage des frontières. Et si vous poursuivez il se développera entre science et pragmatisme, là où la neuropédagogie nous apprend aujourd'hui à voir. A voir ce qui n'est certes pas caché, mais qu'une structuration mentale simpliste escamote.

Nous savons maintenant qu'un être qui se développe durant son enfance dans une cage aux barreaux verticaux se heurtera le reste de sa vie aux

barres horizontales qui ne font pas partie de son univers perçu.

– Vous voulez dire que nos habitudes de tracer des frontières de type A nous a privé de la capacité de voir, percevoir, créer, et maîtriser la TALVERA ?

– Allez donc ! Vous en savez assez pour séjourner au pays des fées et des LAMINAK, au pays de la convivialité entre l'eau et la terre...

Allez donc remplacer le culte de la frontière par la culture des frontières.

TALVEREZ, JARDINEZ, et vous PERCEVREZ!...

Alors,

Par l'eau et par le feu,

Par l'air et par la terre,

Par les talus et les fossés,

Il est parti en TALVERA ...

Archives

POINTS DE CONTACT ENTRE NEUROPHYSIOLOGIE ET CYBERNÉTIQUE

Alfred FESSARD

Ce texte est celui d'une conférence prononcée, le 20 mars 1953, à la Sorbonne, par Alfred Fessard alors Professeur au Collège de France. De même que la conférence de Georges Th. Guilbaud, reproduite aussi dans la «Revue Internationale de Systémique» (Vol. 2, n. 3), elle faisait partie d'un cycle, consacré à la cybernétique, que la «Maison des Sciences de l'Université de Paris», dirigée par M. Beaufrère, nous avait demandé d'organiser avec le «Cercle d'Etudes Cybernétiques». Elle fut publiée, en 1954, dans un numéro spécial de la revue «Structure et Evolution des Techniques» dirigée par Pierre Ducassé (n. 35-36, juillet 1953 - janvier 1954). Nous remercions Mme Albe-Fessard d'avoir bien voulu nous autoriser à reproduire ce document.

Alfred Fessard (1900-1982) créa en 1947, à l'Institut Marey, un Centre d'étude de physiologie nerveuse et d'électrophysiologie et occupa, de 1949 à 1971, la chaire de Neurophysiologie générale au Collège de France. Sa formation de physicien, ses connaissances en électronique, le prédisposaient à ces fonctions et donnent une valeur particulière à ses vues sur la cybernétique dans ses rapports avec la neurophysiologie. C'est d'ailleurs une attitude systémique qu'il adopte lorsqu'il pose au passage le problème de l'«analogie des performances globales» liés ou non à l'«analogie de constitution», problème qui se trouvait au centre des préoccupations de Louis Couffignal lorsqu'il fonda, en 1955, la très éphémère «Société Française de Sciences Comparées» (ou «Société de Mécanique Comparée et de Recherches Cybernétiques»). C'est la question de la «boîte noire» qui

se trouve ainsi posée : la relation entre l'entrée et la sortie étant donnée, quelles sont les structures qui permettent un tel passage.

A côté de W. Ross Ashby, Louis Couffignal, Warren S. McCulloch, Jean Piaget et Norbert Wiener, Alfred Fessard est amené à faire allusion à d'autres auteurs, parfois précurseurs de certains aspects de la cybernétique, comme Louis Lapicque (1866-1952) ou pionniers de cette science, tels que Arturo Rosenblueth à qui Wiener dédia «Cybernetics», Walter Pitts qui écrivit avec McCulloch un article signalé dans le texte («A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity», Bulletin of Mathematical Biology, Vol. 5, p. 115-133, 1943) et aussi Grey Walter alors Directeur de la Section de physiologie du «Burden Institute of Neurology» (Grande-Bretagne), ce qui aide à situer l'article dans son contexte historique.

Robert Vallée

Résumé.

On peut relever deux types d'analogies entre les principes régissant le fonctionnement de certains mécanismes et ceux qui semblent dominer le système nerveux. Les premiers ont trait aux performances globales, on ne peut les considérer sans méfiance car ils n'impliquent pas l'identité des mécanismes de base. Les seconds, correspondant à une échelle d'observation plus fine, sont davantage dignes d'intérêt.

L'appareil nerveux est un appareil de «gouvernement», un système d'intercommunications au service d'opérations définies. A ce titre l'étude de la transmission des signaux, des circuits rétro-actifs et des opérations complexes du système nerveux ont une grande importance. La Cybernétique peut ainsi rendre de grands services au neurophysiologiste en l'éveillant à de nouvelles possibilités d'explications, en l'engageant à méditer sur de frappantes analogies enfin en lui fournissant un langage et des procédés symboliques d'expression qui peuvent l'aider à mieux étreindre la complexité nerveuse.

La Cybernétique ne borne pas son domaine à l'étude d'un certain type de machines construites par l'homme : Wiener spécifie, dans le sous-titre de son livre, qu'il s'agit de «contrôle et communication, chez l'animal et dans la machine». Il est juste à cet égard de rappeler que le collaborateur initial de Wiener fut un physiologiste, le docteur A. Rosenblueth, lui-même ancien élève de Cannon, lequel, exploitant dans ses travaux sur les régulations organiques une pensée maîtresse de Claude Bernard, a attaché son nom au concept d'homéostasie.

Bien qu'il y ait, dans un organisme animal, d'autres mécanismes de régulation et contrôle que ceux mis en jeu dans le système nerveux, c'est à celui-ci qu'est dévolue la tâche d'assurer les coordinations les plus souples, les plus précises et les plus rapides, en particulier celles qu'exigent les relations d'un animal avec son milieu. En s'en tenant à cet aspect, le neurophysiologiste qui, depuis longtemps, avant la lettre, «faisait de la cybernétique», doit aujourd'hui se demander ce que lui apporte de nouveau la systématisation de Wiener et de ses disciples. Il n'avait certes pas attendu cette systématisation pour considérer l'être vivant comme une machine et pour en analyser les rouages animateurs, autrement dit les nerfs et les centres nerveux, alertés par des appareils récepteurs, prolongés par des instruments d'action dont le type principal est le muscle strié ; mais il n'avait pas encore véritablement osé faire une assimilation étroite entre les principes qui régissent le fonctionnement de certaines machines industrielles et ceux qui semblent dominer le dynamisme nerveux. La Cybernétique lui propose hardiment cette assimilation, en se basant d'une part sur l'analogie, souvent frappante, des performances globales, et d'autre part sur des analogies de constitution et de fonctionnement élémentaires. Il y a là deux catégories distinctes de points de contact entre neurophysiologie et cybernétique.

1. Nous serons brefs en ce qui concerne les rapprochements de la première catégorie, notre collègue Couffignal ayant, dans sa conférence, * plus spécialement envisagé cet aspect de la question. Les analogies de performance offertes par les «robots» modernes sont parfois étonnantes. Grey Walter, par exemple, a réussi à donner à l'une de ses «tortues» un pouvoir d'apprentissage.

En dehors de ces animaux artificiels, bien supérieurs au «Canard de Vaucanson», et d'ailleurs d'un principe tout différent, on trouve des analogies partielles entre les opérations de certaines machines et celles que réalise le système nerveux. Ainsi, il est classique de comparer celui-ci à un vaste *réseau de transmission de signaux* (nous préciserons tout à l'heure) ; le cerveau n'aurait pas de meilleur modèle, d'après Wiener, qu'une *machine à calculer* moderne ; et l'Anglais Kenneth Craik, un précurseur méconnu, a été le premier à souligner que dans leurs performances motrices, l'homme et les animaux se comportent comme des *servo-mécanismes* à corrections intermittentes.

* La conférence de Louis Couffignal intitulée «Méthodes et limites de la Cybernétique», fut prononcée le 13 mars 1953. Elle faisait partie du même cycle de cinq conférences (note de la rédaction).

Réseaux de transmission, machine à calculer, servo-mécanismes, le système nerveux se comporte comme s'il était tout cela à la fois : et d'ailleurs les robots un peu compliqués combinent tous ces mécanismes.

Enfin, on peut ne vouloir chercher d'analogie que dans un détail ; on crée parfois des modèles qui visent à imiter telle ou telle partie du système nerveux (par exemple des modèles de *synapse*, zone de jonction de deux neurones).

Nous n'insisterons pas sur ces divers exemples. De telles machines, qu'elles aient été intentionnellement imitatives ou non, peuvent nous aider à comprendre le fonctionnement nerveux. Leur plan s'inspire parfois (c'est le cas des tortues de Grey Walter) de certaines caractéristiques bien connues de la structure ou du fonctionnement élémentaire du système nerveux. Elles prennent alors davantage de valeur à nos yeux. Cependant, on peut se demander jusqu'où le raisonnement par analogie peut nous conduire : en fait, les physiologistes éprouvent une grande méfiance à son égard. Ils savent trop, pour en avoir fait souvent l'expérience, combien l'analogie des performances est loin de garantir l'identité des mécanismes. Ils ne s'en servent que lorsqu'ils ne peuvent faire autrement. Or, les progrès de la neurophysiologie expérimentale ont été tels, depuis trente ans environ, que l'on peut aujourd'hui raisonner autrement : ce n'est plus l'analogie des performances qui permet d'inférer sous toutes réserves l'identité des mécanismes de base, c'est l'étude directe de ceux-ci qui permet de comprendre la performance globale. Mais faire cela n'est pas autre chose que poursuivre le travail normal du neurophysiologiste. En quoi la Cybernétique peut-elle alors nous être utile ?

2. Le contact avec la Cybernétique se rétablit pourtant par le fait que souvent des analogies à échelle plus fine se découvrent, entre les constituants élémentaires de certaines machines et les traits structuraux et fonctionnels qui sont à la base des mécanismes nerveux. Et même si les performances du système nerveux devaient n'être analogues qu'en surface à celles des machines, et dépendre en profondeur de liaisons et de mécanismes propres, non encore utilisés industriellement, l'appareil nerveux n'en mériterait pas moins de faire partie du domaine d'intérêt de la Cybernétique, par cela seul qu'il est un *appareil de «gouvernement», un système d'intercommunications au service d'opérations bien définies.*

Quelles sont ces opérations ? Nous ne saurions les envisager ici dans leur détail, non seulement faute de temps, mais parce que ce serait alors reproduire les chapitres d'un traité de Neurophysiologie. Mais nous pouvons nous limiter à des aspects très généraux, en nous laissant guider par

l'esprit de la Cybernétique, en empruntant un cadre à ses notions fondamentales, en particulier aux notions d'*information*, de *rétroaction* et d'*opération*. Tout comme dans tant de machines modernes, où les opérations de communication et de contrôle sont essentielles, ce qui importe dans le fonctionnement nerveux, ce n'est pas la quantité d'énergie ou la puissance mise en jeu, c'est la *formation*, la *distribution* et l'*utilisation* de signaux informatifs. Dans une étude complète, ces trois points devraient être développés successivement. Nous adopterons ici, pour nous limiter, une division un peu différente, faisant ressortir trois aspects particulièrement importants du fonctionnement nerveux :

- 1) Quelle est la structure et quel est le sort des signaux qui sont transmis à l'intérieur du système nerveux ?
- 2) A quoi servent les circuits rétroactifs qui peuplent les structures nerveuses ?
- 3) Comment s'organisent les signaux transmis en vue de l'exécution d'opérations définies, dont le caractère le plus frappant est de correspondre, apparemment, à une certaine finalité ?

On remarquera que ces trois aspects évoquent à nouveau l'analogie avec les réseaux de transmission, les servo-mécanismes et les grandes machines à calculer modernes, que nous avons mentionnés au début de notre exposé. En cherchant à préciser ces analogies, on se rend compte que si les principes généraux sont conservés, le système nerveux n'en a pas moins des modalités propres de fonctionnement, qui n'ont pas toujours de correspondant exact dans nos machines, du moins telles qu'elles sont actuellement conçues.

*
* *

1. *La transmission des signaux dans le système nerveux.*— Au sortir des récepteurs sélectifs que sont les organes des sens, chaque fibre transporte sa part d'*information* selon un code maintenant familier à tous : des trains d'impulsions électriques brèves, toutes égales, à cadence variable entre 10 et quelques centaines d'unités par seconde, que l'on peut enregistrer si l'on a réussi à poser une électrode sur la fibre active. C'est là la «monnaie courante» de tout le système nerveux, aussi bien moteur que sen-

sitif ou associatif. Normalement, chaque fibre nerveuse transporte ses trains d'impulsions sans en modifier la structure, et sans que s'atténue la hauteur de chaque variation électrique (loi du «tout ou rien»). Quatre catégories d'indications sont ainsi transmises par les voies nerveuses :

- a) une donnée qualitative : couleur, son, etc... ;
- b) une localisation, en particulier s'il s'agit d'un message visuel ou tactile ;
- c) une durée T ;
- d) une intensité I.

La qualité et la localisation relèvent de caractéristiques anatomiques ; elles ont pour ainsi dire leurs lignes privées, en quantité limitée, ce qui fixe le nombre des discriminations possibles, donnée essentielle pour qui voudrait tenter une mesure de l'*information* contenue dans un message sensoriel. Si l'on considère une seule ligne, c'est-à-dire une fibre isolée, le message transporté renseigne en outre sur la durée du phénomène, et sur son intensité. La détermination de la durée est entachée d'une imprécision égale à l'intervalle entre deux impulsions successives (intervalle qui peut dépasser 0,1 seconde). L'intensité, en principe, est modulable de façon parfaitement continue par la variation de fréquence et nous savons que cette fréquence est approximativement proportionnelle au logarithme de l'intensité de l'agent physique de stimulation. En fait, l'information-intensité ne serait mesurable en termes neurophysiologiques que si l'on connaissait la *capacité de discernement* du dispositif nerveux où se perçoit cette donnée. Cela nous l'ignorons encore, et c'est là un des problèmes les plus passionnants de la neurophysiologie cérébrale.

Nous connaissons mieux l'envers de la médaille, c'est-à-dire tout ce qui conspire à brouiller les signaux, à détériorer les messages. Ainsi, un stimulus d'intensité constante ne donnera pas naissance à un train uniforme d'impulsions nerveuses : il est de règle d'observer une diminution rapide de la fréquence, au début de l'action, puis, même lorsqu'un état stable est atteint, des fluctuations non négligeables de la durée des périodes successives. En outre, ce sont plusieurs neurones en chaîne qui transmettent les messages : en passant d'un neurone au suivant (il y a ainsi au minimum deux relayages «synaptiques» jusqu'à l'écorce cérébrale), le message subit souvent des altérations ; il risque d'arriver en bout de ligne passablement déformé. Mais il y a pire, car, au lieu de rester lignes privées, les nerfs entremêlent leurs fibres aux relais synaptiques, d'abord discrètement, en restant dans le domaine propre à chaque sens, puis de plus en plus largement, jusqu'à mêler des informations de sources hétérogènes : ainsi naît la perception globale, infidèle, parfois trompeuse, enrichie de mille asso-

ciations qui font intervenir les sensations internes, les souvenirs, les projets, correspondant, les uns et les autres, à des trains d'impulsions parcourant une quantité innombrable de voies nerveuses.

Ainsi, c'est le sort naturel des signaux nerveux de converger vers des centres d'intégration et de s'y mêler, et en même temps de diffuser largement à partir de toute voie privée initiale. Les preuves électrophysiologiques de ces propriétés sont éclatantes ; elles ne font d'ailleurs que confirmer ce que l'anatomie avait déjà fait pressentir, en montrant la profusion et le chevauchement des collatérales des fibres nerveuses.

Pour nous en tenir au caractère d'Intensité d'un message nerveux, nous voyons donc qu'il ne dépend pas seulement de la fréquence des impulsions, car, du fait des convergences, il y a des éléments d'information qui proviennent du *nombre* des neurones d'un groupe donné se trouvant simultanément en action. Autrement dit, il y a des dispositifs qui «comptent» les neurones actifs à chaque instant, comme il y en a qui réagissent à la fréquence de chaque message élémentaire. Les premiers seuls sont aptes à renseigner sur l'intensité d'une opération nerveuse ou sensorielle instantanée ; mais, exigeant un ensemble de neurones, ils le feront avec une mauvaise localisation spatiale. Les seconds, par contre, n'ont besoin que d'une fibre, et localisent finement ; mais, ayant à apprécier une fréquence, ils exigent pour cela un certain temps. Il y a donc une certaine *complémentarité* entre ces deux marges (spatiale et temporelle) d'incertitude. Le plus souvent, c'est un compromis entre les deux dispositifs qui est réalisé.

Le cas d'un signal instantané englobant plusieurs neurones et devant traverser un seul relai synaptique a fait l'objet, en 1949, d'une étude à la fois expérimentale et théorique de la part de Wiener, associé à Walter Pitts, lui aussi mathématicien, et à deux physiologistes, Rosenblueth et G. Ramos. Ces auteurs sont arrivés à mettre sur pied une théorie probabiliste qui rend compte, de façon assez satisfaisante, des propriétés transmissives constatées dans le réflexe spinal monosynaptique, celui qui est mis en jeu dans les réflexes tendineux. La courbe empirique indique la proportion des fibres motrices activées en fonction de la proportion des fibres sensibles stimulées. C'est ce qu'en Cybernétique on appellerait une caractéristique input-output (entrée-sortie). Elle a ici une forme en S. Un raisonnement simple, qui rappelle celui utilisé en calcul des probabilités pour traiter le cas des boules noires ou blanches tirées d'une urne, permet de retrouver la courbe, pourvu qu'on admette quelques hypothèses au départ : a) que chaque afférence contribue à la connexion par le même nombre de contacts ; b) que chaque neurone efférent est en contact avec le même nombre d'affé-

rences indépendantes (soit n) ; c) que l'activation exige un seuil $m \leq n$, c'est-à-dire un nombre minimum de contacts simultanément actifs ; d) que m est une variable distribuée entre les neurones présents (les données et le raisonnement mathématique permettent la déduction de la courbe de distribution).

Ce cas représente un essai biomathématique qui retient l'intérêt du neurophysiologiste. D'autres exemples pourraient être traités de la sorte. Cependant, nous sommes assez loin ici des modalités naturelles de transmission des messages informatifs. Ceux-ci se présentent généralement non pas groupés en une masse unique, mais dispersés en une multitude de trains d'impulsions à fréquence modulée. Avec tous les incidents qui interviennent entre le départ d'un tel message complexe et son arrivée dans les régions du cerveau où il est « lu », on peut se demander ce qui peut rester de la structure de l'information initiale. Et pourtant, il est bien certain qu'à travers de larges distorsions, les grandes lignes du message se trouvent assez bien préservées. Cela est dû au facteur statistique, c'est-à-dire au grand nombre des neurones mis en jeu, de telle sorte que les fluctuations d'activité de chacun d'eux se compensent et que seul le résultat global ressort, au détriment, il est vrai, de la finesse de discrimination spatiale. Un effet analogue a lieu dans le temps, car les brèves impulsions, généralement inférieures comme durée au millième de seconde, ont des effets balistiques aux points de confluence, et ces effets prolongés sont capables de s'accumuler (sommation temporelle) ou éventuellement de se détruire (inhibition), au cours de durées élémentaires qui sont inférieures au dixième ou au vingtième de seconde. La rançon de cette capacité de fusion est que nous différencions mal des événements qui sont séparés par des intervalles plus petits que ceux-ci.

Tel est l'aperçu auquel nous nous limiterons, en ce qui concerne les modalités de transmission de l'information dans le système nerveux ; il suffira sans doute à montrer dans quel sens on peut parler, à cet égard, d'une « prise de contact » entre la Neurophysiologie et la Cybernétique. Le concept d'information, sous sa forme la plus générale, a heureusement pénétré dans la pensée du neurophysiologiste ; mais là s'arrête le rapprochement, et il n'est pas encore question d'appliquer aux messages nerveux les procédés de calcul mis au point par les ingénieurs des communications pour mesurer et manipuler l'information. L'édifice nerveux est en réalité un système d'intercommunications qui ne ressemble à aucun autre système industriel. On utilise bien parfois le procédé de modulation de fréquence dans la radiodiffusion des signaux, mais il ne viendrait jamais à l'idée d'un

constructeur de proposer un réseau où les signaux se rencontrent et se mêlent. L'essentiel est sauvé, dans le système nerveux, par l'entrée en jeu des *régularités statistiques* : on y dispose d'un nombre considérable d'éléments, les neurones, peu encombrants et peu coûteux (énergétiquement). Une telle prodigalité, dans les systèmes industriels, avec les éléments de base que nous savons construire, serait inconcevable.

2. *Les circuits rétroactifs du système nerveux* — Le principe de la rétroaction, ou feed-back, a été expliqué ailleurs : on sait quelle révolution a introduite dans la technique cette idée de renvoyer à l'entrée d'un système de commande une information relative à l'écart (ou à une fonction de l'écart) entre le résultat effectif de la commande et le but qu'elle se proposait d'atteindre. Généralement, l'information agit de telle sorte que la commande se trouve modifiée dans un sens qui diminue l'écart : c'est la *rétroaction négative* pouvant assurer automatiquement la stabilité d'un système (auto-régulations) ou la poursuite de plus en plus serrée d'un objectif déterminé (exemple des projectiles auto-guidés). Il y a une grande variété d'applications de ce principe à ce qu'on appelle d'une façon générale les *servo-mécanismes*. C'est sans doute là le trait le plus caractéristique des dispositifs dont s'occupe la Cybernétique, dont on a dit qu'avec elle nous étions entrés dans « l'âge du feed-back ».

Sur ce terrain, les points de contact entre Neurophysiologie et Cybernétique s'affirment avec netteté. En effet, l'anatomie a depuis longtemps révélé l'existence de circuits rétroactifs, et la physiologie les a montrés à l'œuvre dans quelques cas bien déterminés, en particulier dans les actes moteurs. Il y a en fait quatre étages où l'on peut découvrir des circuits rétroactifs et où l'on peut lier à leur fonctionnement éventuel des propriétés amplificatrices, comme dans les servo-mécanismes ; propriétés amplificatrices qui sont dues à la richesse des collatérales et des interneurones qui multiplient le nombre des impulsions nerveuses venant frapper tel centre fonctionnel. Voici quelques considérations relatives à ces quatre niveaux :

a) Dans les réseaux de neurones courts, abondants dans la substance grise et présentant une distribution désordonnée de leurs éléments, il existe fatalement des boucles à 1, 2, 3, etc... neurones où doivent circuler des impulsions de façon plus ou moins durable ;

b) D'un centre différencié à un autre, on sait qu'il existe souvent des connexions bi-directionnelles ; par exemple, entre l'écorce cérébrale et les noyaux non spécifiques du thalamus, entre le cervelet et la formation réticulée bulbo-mésencéphalique, etc... ;

c) Entre les centres moteurs de la moëlle et les muscles qu'ils animent, il y a aussi une liaison à double sens, par suite de l'existence de récepteurs intramusculaires (propriocepteurs) qui envoient vers la moëlle des messages dont l'action directe sur les neurones moteurs est bien connue des neurophysiologistes (c'est le réflexe «myotatique» de Liddell et Sherrington, découvert en 1924) ;

d) Enfin, en généralisant, on doit faire entrer dans la catégorie de ces circuits rétroactifs les connexions du système nerveux avec le monde extérieur, par l'intermédiaire des récepteurs sensoriels appropriés ; ces connexions sont bien à double sens et sont déterminantes pour tout comportement finalisé ; pensons par exemple à l'animal poursuivant une proie, à l'homme au volant de sa voiture, etc...

Les cas «a» et «b» soulèvent des questions délicates de neurophysiologie et sont encore à l'étude. Le cas «c» a été bien étudié grâce surtout aux études récentes de Kuffler, Hunt, Granit et collaborateurs, études qui ont précisé le rôle du récepteur musculaire, ou «fuseau», qui contient à la fois un organe sensible à la traction et un équipement de fibres contractiles F2 commandées par un système moteur particulier. Lorsque le muscle est étiré, le récepteur du fuseau envoie vers la moëlle des impulsions qui déclenchent l'activité des neurones moteurs des fibres principales F1, d'où contraction de ces fibres, relâchement du fuseau, qui cesse d'envoyer ces impulsions réflexogènes ; premier système stabilisateur, par rétroaction négative. Mais, en outre, les fibres F2 du fuseau se contractent aussi, combattant le relâchement qui leur était imposé et ajustant ainsi la sensibilité du récepteur à la nouvelle longueur du muscle : le fuseau agit comme un détecteur différentiel d'écart. L'étude de toutes les situations possibles montre que toujours le réglage de la tension du fuseau se fait dans un sens qui contrecarre les variations imposées, soit passivement, soit activement. On a vu aussi que les neurones commandant la tension du fuseau sont sous la dépendance d'un contrôle supérieur, de telle sorte que, secondairement, l'état de toute une masse musculaire peut être à son tour contrôlé par des commandes limitées aux fuseaux : on a là l'image parfaite d'un servo-contrôle. Sans de tels réglages, nos mouvements seraient saccadés, mal ajustés : on n'imagine pas, en général, toutes les difficultés d'ordre balistique que représente la commande de mouvements rapides et cependant précis, dépourvus d'oscillations, tels que ceux qu'exécutent nos membres, malgré leur inertie, dans nos actes moteurs coordonnés. Les dispositifs de rétroaction précédents sont indispensables à cette exécution (il apparaît des oscillations, comme dans l'ataxie tabétique, dès que les réflexes proprio-

ceptifs ne fonctionnent plus). Ils ne sont d'ailleurs pas suffisants. Des rétroactions d'ordre supérieur, impliquant des circuits du type «b» interviennent très probablement par le jeu des connexions cérébelleuses (tout particulièrement) et dans l'exécution d'un mouvement volontaire, par la mise en branle de circuits nerveux complexes intéressant l'écorce cérébrale, les noyaux basaux et le thalamus. Cependant, nous sommes encore loin, en neurophysiologie, d'avoir sur ces mécanismes centraux les mêmes précisions que sur les circuits proprioceptifs et l'existence anatomiquement prouvée de voies nerveuses ne suffit pas à faire connaître leur rôle : il faut pouvoir étudier les messages qu'elles propagent et leur destination, faute de quoi on court le risque de peupler le système nerveux de *feed-backs* imaginaires !

Néanmoins, quelles que soient nos ignorances actuelles, le neurophysiologiste qui étudie la motricité pourra de confiance se laisser guider par l'idée de rechercher des dispositifs nerveux de rétroaction, car on ne voit pas de meilleur moyen d'aboutir à une mobilisation régulière et coordonnée des masses musculaires, au jeu harmonieux d'un ensemble de muscles participant à un mouvement intentionnel. A cet égard, la comparaison avec les machines industrielles n'est pas déplacée ; des problèmes analogues se posent à l'ingénieur, en ce qui concerne la façon d'assurer des déplacements réguliers, continus, ajustés et coordonnés entre les pièces mobiles d'une machine. L'emploi de la rétroaction simple est banal, mais il suffit d'ouvrir un traité sur les servo-mécanismes pour se rendre compte de la diversité des complications possibles du schéma primitif, les circuits rétroactifs peuvent avoir eux-mêmes leur propre *feed-back*, et des combinaisons encore plus complexes ont été réalisées, toujours en vue d'obtenir une plus grande stabilité et une plus grande obéissance de fonctionnement ; des circuits d'anticipation, tels que l'organe d'exécution soit averti par avance de l'arrivée prochaine d'un ordre, sont également utilisés. Il est fort vraisemblable que de tels procédés se trouvent effectivement mis en œuvre par le système nerveux : c'est la tâche difficile du neurophysiologiste d'essayer de le démontrer dans les divers cas particuliers.

3. *Les opérations complexes du système nerveux.*— La coordination des contractions des six muscles oculaires qui amènent un objet du champ visuel à occuper le centre de la fovea rétinienne (réflexe de fixation) est un exemple de motricité dans lequel intervient une rétroaction «extéroceptive». Ici, l'opération nerveuse n'est plus seulement celle d'un franchissement synaptique plus ou moins bien dosé : un *calcul* est nécessaire pour déterminer à chaque instant, en fonction de la position de l'image sur la rétine, la

contraction utile des différents muscles. L'organe calculateur, on le sait, est logé dans les structures neuroniques des tubercules quadrijumeaux antérieurs. Se fondant sur des données électrophysiologiques provenant d'une étude de ces organes (J. Apter), McCulloch et W. Pitts ont esquissé les grandes lignes d'une théorie formelle de ce mécanisme.

Dans les exemples précédents, il était question surtout de la capacité pour le système nerveux de transmettre fidèlement un message, ou de faire obéir ses organes d'exécution ; avec ce dernier exemple, l'accent est mis sur l'*opération* qui, à partir des messages informatifs, doit élaborer les ordres. Il n'est plus alors question de rechercher une correspondance simple entre les signaux d'entrée et l'effet obtenu. Cela est frappant dans les opérations particulièrement complexes, comme celles de la pensée, car des opérations en nombre considérable s'interposent entre l'incitation primitive et le résultat final. On a souvent l'impression alors que cette incitation n'a qu'un rôle de déclenchement, mettant en jeu des schémas d'action montés par avance et qui, imposant leur propre structure, sont les facteurs déterminants du comportement. Les descriptions, les classifications des psychologues, aident à définir les types de ces modalités d'action. C'est sur ce terrain en effet que l'on aborde les rapports entre le fonctionnement cérébral et les opérations de l'esprit et nous savons que les cybermétéiciens n'ont pas craint de s'y aventurer, devant de beaucoup les données de l'expérimentation neurophysiologique.

Ils sont partis évidemment de la conception philosophique qu'un certain isomorphisme devait exister entre les structures fournies par l'analyse psychologique et celles des dispositifs nerveux responsables de l'activité mentale. Il ne m'apparaît pas que ce soit cela qui puisse leur être reproché, car, en l'état actuel de nos connaissances, il est impossible de ne pas croire que dans les formes de notre pensée vécue se retrouve plus ou moins la marque des propriétés de la machine neuronique qui sert à sa réalisation et à son expression.

La question me paraît clairement posée par Piaget, lorsqu'il écrit :

«Il est légitime de se demander quelle est la structure qualitative d'un ensemble de circuits nerveux. S'agit-il d'un réseau ? et de quelle forme mathématique particulière ? ou intervient-il en outre des structures de groupes ?... La réponse intéresse les psychologues : les structures qualitatives d'ensemble susceptibles de permettre la description des formes de circuits nerveux, sont de nature à présenter un certain isomorphisme avec les structures d'ensemble que l'analyse psychologique découvre au sein des systèmes opératoires de l'intelligence ou même des systèmes relatifs aux autres fonctions mentales, perception, etc...»

Ainsi, les systèmes de neurones interposés entre les entrées et les sorties des signaux apparaissent comme des «opérateurs» spatiotemporels, et le problème est d'en préciser la structure et le fonctionnement. Malheureusement, il ne suffit pas de poser le problème en termes clairs et généraux pour avoir des idées sur la façon de le résoudre. Or, que pouvons-nous faire ?

La contemplation des structures nerveuses, si complexes, est souvent de nature à décourager les efforts des analystes. Mais il y a des structures moins réfractaires à l'analyse et l'on croit parfois comprendre la raison d'être de l'arrangement de leurs neurones.

Les cybermétéiciens ont été souvent fort loin dans ce sens. Se référant à des figures d'histologie classiques, ils ont stylisé les assemblages neurologiques des voies visuelles ou auditives, par exemple, et «a priori», doté les différents types de neurones de propriétés adéquates afin de pouvoir rendre compte de certains aspects de l'expérience perceptive. Il ne leur a pas paru impossible non plus, selon l'expression de Couffignal, «d'inscrire la logique dans le système nerveux». Allant encore plus loin, ne demandant plus rien cette fois à la réalité histologique, ils ont procédé à des constructions, sur papier, de réseaux nerveux imaginaires, se demandant quelles pourraient être leurs propriétés comme opérateurs.

Disons un mot de ces dernières tentatives. On peut, théoriquement, faire faire beaucoup de choses à de tels systèmes de neurones («neural nets»), en s'en tenant strictement aux lois connues de la transmission inter-neuronique de l'excitation : tout ou rien, retard synaptique défini, existence d'actions inhibitrices, additivité algébrique des excitations ou inhibitions sur un même neurone. On peut faire effectuer à des réseaux simples les 16 opérations de la logique binaire (McCulloch et W. Pitts) ; des réseaux plus complexes élaborent des messages nerveux dont la structure est sans rapport visible avec celle des messages d'entrée : ce sont de véritables «machines à calculer». On peut en imaginer, par exemple, dont le produit final reste invariant vis-à-vis de certains groupes de transformations portant sur les messages d'entrée, à la façon d'un montage à cellules photoélectriques qui répondraient toujours de la même manière à la présentation d'une forme triangulaire quelles que soient sa variété, son orientation, ses dimensions : base neurophysiologique, peut-être, de phénomènes psychologiques jusque là réputés inexplicables en termes mécanistes (phénomènes de «Gestalt», de «constance de l'objet», etc...). Bien entendu, dans ces réseaux théoriques, il est fait grand usage de circuits réverbérants. Ceux-ci fournissent un procédé de mise en réserve provisoire d'une certaine activi-

té, une sorte de «mémoire», qui a son analogue dans les propriétés de certains dispositifs utilisés dans les machines à calculer (lorsque des résultats partiels doivent être mis en attente pour une utilisation ultérieure). Les ressources de l'activité rythmique qui résulte de ces parcours en circuit fermé sont utilisées aussi, ce qui peut sembler légitime étant donné l'existence des rythmes cérébraux. L'hypothèse la plus ingénieuse est que le rôle de ces derniers serait d'éveiller successivement et périodiquement l'activité de divers champs neuroniques, à la façon de ce qui se passe pour les différents points d'un écran de télévision (procédé nommé «scanning») ; on ferait ainsi une grande économie de neurones, aux dépens bien entendu des capacités d'analyse temporelle. Toutes ces hypothèses, on le voit, vont chercher autant leur inspiration dans les dispositifs offerts par les techniques modernes que dans les lois du système nerveux. Elles dépassent souvent, pour un neurophysiologiste, les limites du vraisemblable. En fait, elles sont loin d'avoir reçu une justification dans les travaux de neurophysiologie expérimentale ; et ce qui a déjà été tenté dans ce sens n'a pas jusqu'ici fourni de résultats encourageants.

Finalement, ces divers essais, pour intéressants qu'ils soient à titre spéculatif, ne représentent qu'une pointe avancée, et combien aventureuse, de la cybernétique nerveuse. Leur intérêt est surtout philosophique : ils nous révèlent que des mécanismes peuvent ou pourraient accomplir des actes beaucoup plus subtils que nous le supposions, des actes que nous avons cru longtemps être le privilège de l'Homme et des animaux, ce qui ne veut pas dire nécessairement que ces derniers utilisent les mêmes procédés pour exécuter des performances similaires, ni inversement, qu'on ait le droit de dire que les robots *vivent et pensent*.

La recherche d'un but, l'adaptation à des conditions nouvelles, l'apparence de spontanéité, peuvent être obtenus à l'aide de procédés mécaniques, c'est certain. Les tortues de Grey Walter illustrent ce fait d'une manière plaisante. Et les assemblages neuroniques savamment combinés par les biomathématiciens, s'ils étaient réellement construits comme «modèles», se montreraient capables des performances que les calculs promettent, n'en doutons pas. Avec les 10^{10} neurones du cerveau, on peut construire des édifices d'une extrême complication. Cependant, il est bien évident que de tels systèmes sont trop fragiles pour qu'on puisse admettre leur réalité : ils sont généralement conçus de telle sorte que l'enlèvement d'un seul neurone dénaturerait les propriétés de l'ensemble, alors que nous savons que de larges prélèvements de matière cérébrale ne modifient pas sensiblement les opérations mentales. Il est également invraisemblable que des systèmes si

minutieusement structurés puissent être inscrits d'avance dans le patrimoine héréditaire. En un certain sens, un modèle comme l'Homéostat de Ashby, qui s'en remet au hasard pour obtenir certaines régularités, nous paraît se rapprocher davantage de la réalité nerveuse.

Lapicque avait bien vu l'essentiel du problème lorsqu'il écrivait, parlant de la complexité des voies nerveuses : «Nous devons loyalement refaire la synthèse et ne pas nous contenter de schémas étriés, où ne reste plus place pour la véritable fonction nerveuse, qui consiste précisément à créer, dans cette confusion anatomique, des déterminations fonctionnelles changeantes.» Pour avoir proposé, dès 1909, une hypothèse dynamique fondée sur la notion de résonance, et l'utilisation d'un paramètre chronologique des neurones (la chronaxie), Lapicque peut être considéré comme un des précurseurs de la Cybernétique nerveuse, bien que sa théorie de l'isochronisme ne puisse plus être considérée aujourd'hui comme valable.

En somme, ses excès mis à part, il apparaît que la Cybernétique peut rendre de grands services au neurophysiologiste. Elle l'éveille à des possibilités nouvelles d'explication, elle l'engage à méditer sur de frappantes analogies, elle lui fournit un langage et des procédés symboliques d'expression qui peuvent l'aider à mieux étreindre la complexité nerveuse, elle excite son imagination en lui suggérant de nouvelles expériences à réaliser. Si l'on voulait, plus précisément, faire ressortir un point sur lequel la Cybernétique a plus particulièrement, dans l'ordre des généralités, aidée la pensée neurophysiologique, on pourrait peut-être dire que c'est en révélant la non-nécessité d'une pré-structuration complète, de liaisons préétablies prévoyant tous les cas, pour obtenir un comportement cohérent, adapté, finalisé. Cela est dû essentiellement à l'emploi, dans l'automate moderne, ou à l'existence, chez l'être vivant, de liaisons rétroactives, et aussi d'une certaine possibilité de réorganisation dynamique des plans de connexion, grâce à quoi l'organisme vivant et ses modèles mécaniques se trouvent en partie libérés des contraintes structurales internes et davantage incorporés au milieu, «en prise» sur ce milieu.

*

* *

Quels que soient ses succès futurs dans le domaine neurophysiologique, il est bien certain que la Cybernétique, dans la mesure où elle consi-

dère le système nerveux comme un vaste réseau de relais neuroniques, ne saurait prétendre épuiser ainsi tous les aspects de la réalité vivante. Le neurone n'est pas en effet l'analogie d'une pièce mécanique indifférente et interchangeable, qui n'aurait d'intérêt et de vie que dans la mesure où il participerait à une activité d'ensemble. C'est lui-même une cellule vivante, non un simple relais dont les propriétés (en particulier le seuil d'excitabilité) seraient fixées une fois pour toutes. Son état peut varier, non seulement en fonction des impulsions «tout ou rien» qu'il reçoit d'autres neurones à chaque instant, mais aussi par suite des impulsions qu'il a reçues antérieurement (conservation d'empreintes, base des phénomènes de mémoire) ; il dépend d'autre part étroitement des variations du milieu humoral : on sait par exemple que l'apparition d'une hormone dans le milieu intérieur peut modifier considérablement le comportement d'un animal. Il faut aussi faire intervenir des causes internes de variation, par exemple des changements d'état liés aux facteurs héréditaires, des modifications endogènes, à allure périodique de l'excitabilité, etc... Nous avons parlé, il y a un instant, de la nécessité d'introduire dans la machine neuronique, des possibilités de réorganisation dynamique des plans de connexion : ce qui doit changer, ce n'est pas, bien entendu, l'arrangement anatomique des voies nerveuses, tissées une fois pour toutes chez l'adulte ; c'est la susceptibilité que chaque neurone a d'entrer en action, et cela exige de celui-ci une certaine plasticité dont les cybernéticiens ne semblent pas avoir tenu compte. Rappelons cependant que la nécessité d'une telle réorganisation a été proclamée par Ashby qui en a fait une caractéristique essentielle de son Homéostat (dans ce modèle, on exploite les seules possibilités de changements survenant au hasard : il est bien évident que c'est là une simplification excessive).

Les succès de la Cybernétique ne doivent donc pas nous faire oublier que le système nerveux doit pour une part ses propriétés à des changements d'état de ses neurones, c'est-à-dire en dernière analyse à des processus chimiques engageant la structure des macromolécules de certaines protéines spécifiques. C'est à cette échelle que s'inscrivent les traces mnémoriques durables, qu'agissent les hormones, et éventuellement les narcotiques, les poisons du système nerveux, les virus neurotropes. Pour une part – mais laquelle ? – le vaste réseau neuronique n'est peut-être qu'une machine d'exécution au service de forces directrices moléculaires, qu'il se contente d'extérioriser en les amplifiant considérablement.

Cette dernière réflexion nous pousse à citer, en terminant, une phrase du grand Sherrington, dont j'emprunte la traduction à un récent article de A. Tournay (*Journal de Psychologie*, janvier-mars 1953) :

«La cellule n'est pas un système statique, mais un monde de surfaces et de courants ; dans cette «ruche magique», on se prendrait à épier des bataillons de cataclysmes spécifiques, pareils aux démons de Maxwell, alignés, chacun attendant, chronomètre à dé clic en main, le moment de jouer le rôle qui lui est assigné...»

Avec les «démons de Maxwell» et leur indispensable appel à l'*information*, nous voyons cependant se réintroduire la Cybernétique, qui décidément se mêle de tout !