

Sens philosophique et portée pratique de la **CYBERNÉTIQUE**

Conférence aux Arts et Métiers
sur la Cybernétique
n° 35-36, 1959

par

Louis de BROGLIE

Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences

Prix Nobel

ON parle beaucoup depuis quelque temps d'une nouvelle branche de la Science ; la Cybernétique, qui doit son origine et son nom aux travaux du mathématicien Américain Norbert Wiener. La Cybernétique, est, pourrait-on dire, à la mode : on sait qu'elle unifie des domaines qui jusqu'ici paraissaient séparés et qu'elle peut nous amener à des conceptions nouvelles, non seulement dans beaucoup de problèmes de mécanique et de physique, mais même en physiologie normale ou pathologique, en psychologie et peut-être en sociologie. Elle suscite donc un intérêt très légitime.

Il n'est pas très aisé de donner une définition précise de la Cybernétique. Son nom, déjà employé par Ampère dans sa classification des Sciences, signifie étymologiquement qu'elle est la science de ce qui gouverne, de ce qui « contrôle » au sens anglais du mot, la science qui fait saisir le fonctionnement du poste de commandement. On pourrait dire aussi qu'elle est la science des « déclenchements », c'est-à-dire d'actions mettant en jeu des quantités d'énergie très minimes et dont on ne se préoccupe pas, mais qui ont pour effet de provoquer ou de modifier des phénomènes d'une ampleur infiniment plus grande : on peut en prendre comme exemple le régulateur à boule qui ramène sans cesse à sa valeur normale la vitesse de rotation d'une puissante turbine ou, dans un tout autre ordre d'idées, le télégramme reçu par le commandant en chef d'une vaste armée qui le décide à engager la grande bataille dont va dépendre le sort de toute une guerre.

Si je donne côte à côte ces deux exemples si différents, c'est afin de bien montrer ce qui fait l'originalité de la Cybernétique ; les branches de la science dont elle s'occupe étaient pour la plupart déjà connues avant elle et se développaient d'une façon autonome et le mérite de la Cybernétique a été non pas de les avoir créées, mais d'avoir révélé le lien subtil qui existait entre elles.

En y réfléchissant, on voit apparaître le rôle fondamental que doit jouer dans la Cybernétique la notion d'information dont jusque-là on n'avait pas nettement dégagé l'importance. Car les déclenchements, qui se produisent dans les systèmes que la Cybernétique étudie sont provoqués par l'arrivée d'informations provenant d'autres parties du système ou parfois de l'extérieur. C'est ainsi que dans une turbine à vapeur, si la vitesse de rotation s'élève au-dessus de sa valeur normale, le régulateur dont les boules s'écarteront par suite de cette augmentation de vitesse « informera » de cette variation, par une transmission mécanique consommant une énergie infime, le robinet d'admission de la vapeur dans la turbine et celui-ci en diminuant la quantité de vapeur injectée fera revenir la vitesse de rotation à sa valeur normale. C'est également ainsi que sur un champ de bataille, si des avant-postes signalent par télégramme ou téléphone au général en chef qu'un des secteurs du front

ennemi se trouve dégarni de défenseurs, le commandement décidera de lancer une violente attaque dans ce secteur pour chercher à opérer une trouée.

Une des branches maîtresses de la Cybernétique sera donc la théorie des transmissions ou des communications, c'est-à-dire l'étude scientifique des moyens de transmettre une information par un procédé quelconque qui pourra être mécanique, acoustique, optique, électrique, radioélectrique, etc. Tout l'art des ingénieurs des télécommunications rentre alors comme un cas particulier dans le cadre de la Cybernétique. L'analyse et le perfectionnement des dispositifs régulateurs, des servomécanismes, des procédés de contre-réaction dans les appareils radioélectriques etc., forment un domaine immense qui offre aujourd'hui un intérêt primordial pour de nombreuses branches de la technique et qui vient aussi s'incorporer tout entier au royaume de la Cybernétique.

A ce royaume de la Cybernétique, se rattache également le perfectionnement des machines à calculer. Il y a plus de trois siècles que Blaise Pascal, presque adolescent encore, inventa la première machine arithmétique pour faciliter le travail de son père que ses fonctions d'Intendant de Normandie amenaient à effectuer de longs calculs pour l'établissement des impôts dans sa province. Nul ne peut douter que l'établissement des impôts ne soit aujourd'hui chose encore bien plus compliquée qu'en 1640, mais ce n'est pas pour cette raison que l'emploi des machines à calculer a pris récemment une grande extension : le développement des recherches scientifiques et techniques qui entraîne une complication progressive des problèmes posés et un besoin croissant de précision dans leur solution en est la cause. Utilisant toutes les ressources de la mécanique de précision et de l'Electronique moderne, l'art des constructeurs des machines à calculer a atteint aujourd'hui un haut degré de perfection et ne cesse de progresser. Les unes sont restées des machines arithmétiques et, bien qu'utilisant de nombreux procédés nouveaux comme l'emploi de numération binaire, elles font figure de descendantes directes de l'ancêtre du XVII^e siècle. D'autres, au contraire, dites « machines analogiques » appartiennent à un type vraiment nouveau ; profitant du fait que tout phénomène physique obéit à des équations qui peuvent être algébriques, différentielles, aux dérivées partielles ou même intégrales ou intégral-différentielles, elles sont capables de résoudre ces équations en tenant compte de conditions initiales ou de conditions aux limites imposées par la constatation même de phénomènes qui leur obéissent. Bien que moins précises que les machines arithmétiques, les machines analogiques rendent à l'heure actuelle d'inappréciables services. Les étonnantes machines à calculer dont nous dispo-

sons maintenant, sont susceptibles d'effectuer des calculs difficiles et variés, beaucoup plus sûrement et surtout beaucoup plus rapidement que le cerveau humain : celui-ci se trouve donc dépassé par les dispositifs qu'il a su imaginer et réaliser.

La théorie des machines à calculer, celle de la transmission des signaux et plus généralement toutes celles dont le faisceau forme la Cybernétique actuelle semblent devoir nous apporter de nombreux renseignements sur le fonctionnement normal ou pathologique du système nerveux et en particulier sur le mécanisme des réflexes : certains auteurs, comme M. Couffignal en France, ont montré qu'elles pouvaient nous aider à comprendre le fonctionnement de la pensée logique. Enfin, comme M. Wiener l'a souligné à la fin de son célèbre ouvrage « Cybernetics », les phénomènes sociaux eux-mêmes pourraient bénéficier de l'application des méthodes de la nouvelle science.

Ainsi paraît s'étendre presque indéfiniment le champ d'action de la Cybernétique et ces extensions possibles ont suscité de nombreuses espérances dont quelques-unes sont peut-être exagérées. Pour approfondir la question, nous allons d'abord étudier plus en détail les succès de la Cybernétique, puis nous chercherons à préciser les limites qu'il convient d'attribuer à sa force explicative.

UNE des formes précises de la Cybernétique est l'étude mathématique des transmissions, des télécommunications. Elle repose sur la notion de « signal » qui demande à être définie avec exactitude, elle comporte l'étude de la propagation et de la déformation des signaux. Elle a provoqué de nombreux travaux dont on peut trouver un aperçu dans les comptes rendus (publiés par les éditions de la Revue d'optique) des réunions sur la Cybernétique que j'avais organisées en mai 1950.

Dans son développement mathématique récent, la théorie des transmissions a subi d'une façon très heureuse l'influence des méthodes qui sont utilisées par la physique quantique. C'est ce qu'on peut voir en particulier dans les travaux de MM. Gabor et Ville. On y voit apparaître la représentation des signaux par une fonction complexe un peu analogue à la fonction d'onde complexe de la mécanique ondulatoire, on y fait jouer un grand rôle à l'inégalité

$$\Delta f \Delta t \geq 1$$

qui exprime que plus un signal est de courte durée, plus sa décomposition de Fourier comprend de composantes monochromatiques et inversement, et l'on fait ressortir l'analogie de l'inégalité précédente avec la quatrième relation d'incertitude de Heisenberg. Nous aurons à préciser plus loin la portée exacte de ces analogies « quantiques », mais il est certain qu'elles ont été suggestives et ont apporté un regain d'activité au développement de la théorie des communications.

La production, la transmission et la réception des signaux étant soumises à toutes sortes d'accidents, le calcul des probabilités est rapidement devenu un auxiliaire indispensable de la théorie des transmissions. Des travaux très importants et d'un haut intérêt ont été poursuivis dans ce sens, je citerai seulement ceux du jeune savant français, M. André Blanc-Lapierre. La notion de corrélation, si essentielle en Calcul des Probabilités, y a été appliquée avec succès. En particulier, toute une belle théorie de l'autocorrélation a été mise au point depuis quelques années et est devenue très importante dans tous les problèmes de transmission : quelques-uns de ces résultats avaient été aperçus, il y a une quinzaine d'années, par le regretté Bernamont au cours de ses recherches très originales sur les fluctuations de courant. Cette théorie de l'autocorrélation conduit entre autres résultats à de curieuses considérations sur la prévisibilité des signaux.

C'est au cours de recherches sur la théorie des transmissions et les problèmes apparentés, que divers auteurs, et notamment MM. Wiener et Shannon, sont parvenus à dégager la notion de « quantité d'information » et celle corrélatrice de « vitesse d'information » et à montrer que la grandeur « Information » ainsi définie joue dans la théorie des transmissions un rôle analogue à celui de l'Entropie en Thermodynamique. C'est là un rapprochement qui était tout à fait inattendu et suggestif, qui a légitimement excité un vif intérêt chez tous les théoriciens de la physique. Parmi tous les points de vue nouveaux suggérés par l'essor de la Cybernétique, c'est là certainement un des plus curieux.

Sans vouloir développer des calculs qui ne seraient pas à leur place dans un exposé d'idées générales comme celui-ci, je voudrais donner cependant une idée assez précise de cette analogie entre l'entropie et l'information. On sait que, dans l'interprétation statistique de la Thermodynamique qui est aujourd'hui universellement admise par tous les physiciens, l'entropie d'un système apparaît comme directement reliée (par la formule de Boltzmann $S = k \log P$) à la probabilité qu'a le système de se trouver dans l'état considéré. Le second principe de la Thermodynamique, principe de Carnot-Clausius ou de l'augmentation de l'entropie, reçoit alors une interprétation simple et presque intuitive : il exprime la tendance qu'a tout système à évoluer vers des états de plus grande probabilité.

Assurément, cette interprétation probabiliste de l'entropie n'est pas sans avoir soulevé des problèmes épineux et on a signalé bien des fois (c'est le paradoxe de Loschmidt) combien il est contradictoire de vouloir faire sortir des lois de la mécanique classique — qui sont réversibles par rapport au temps — une évolution irréversible — comme celle qu'impose le principe de Carnot — ainsi que tentait de le faire la mécanique statistique sous sa forme classique.

La mécanique quantique et ses conceptions nouvelles semblent apporter un début de solution au paradoxe en question et, il est certain que l'irréversibilité du temps, donnée essentielle de notre expérience humaine, est liée à l'augmentation de l'entropie.

QUOI qu'il en soit, des conclusions finales de ces discussions ardues sur l'irréversibilité des phénomènes naturels définissant un sens privilégié du temps, il est néanmoins certain que l'interprétation statistique de l'entropie et de son augmentation nous ont fait très profondément pénétrer la signification véritable du second principe de la Thermodynamique.

Or envisageons un cas simple de transmission de signaux, par exemple, celui de la transmission d'un télégramme par un télégraphe morse ordinaire où un émetteur de signaux électriques est relié à un récepteur par une ligne conductrice. Si nous envoyons un message sur cette ligne, il est évident que la suite des signaux formant ce message et correspondant à des mots et à des phrases, est hautement improbable a priori. Les signaux Morse étant de deux sortes seulement, les traits et les points, les suites les plus probables de signaux seraient celles où les signaux se succéderaient au hasard sur la ligne, chaque signal sortant de l'émetteur ayant la probabilité $1/2$ d'être un trait ou un point : ce serait un message incohérent et sans signification aucune, celui que pourrait transmettre un télégraphiste dément, frappant sans discernement des traits ou des points sur son manipulateur. Il devient alors évident que le message sensé, celui qui fournit de l'information, est un phénomène extrêmement improbable imposé par la pensée de l'expéditeur et par les règles de la langue qu'il emploie pour l'exprimer. On aperçoit donc qu'il doit y avoir une sorte de rapport inverse entre

l'information transmise par les signaux et la probabilité de la succession des signaux dans le temps puisque l'information sera d'autant plus grande que la probabilité, et par suite l'entropie, de cette suite de signaux sera plus faible. Si, avec Léon Brillouin, nous appelons « neg-entropie » (entropie négative) l'entropie changée de signe, quantité qui diminue quand la probabilité augmente, nous pourrions dire que la quantité d'information est une sorte de neg-entropie.

Cette conclusion se trouve corroborée si l'on tient compte de la déformation possible des signaux dans la transmission : par suite de perturbations les unes accidentelles, les autres plus ou moins imposées par les conditions physiques de la propagation ou, parfois, de la transcription du texte au départ et à l'arrivée, le message reçu n'est pas intégralement identique au message envoyé et contient généralement quelques erreurs qui peuvent diminuer l'information qu'il apporte. Il est facile de comprendre que l'information pourra ainsi être diminuée, mais jamais augmentée. Si je vous envoie par télégramme la démonstration compliquée d'un théorème de mathématique, il se peut qu'une mauvaise transmission du télégramme, en altérant certains passages essentiels du raisonnement vous empêche de comprendre ou de reconstituer ma démonstration. Mais si je vous télégraphie pour vous expliquer pourquoi je ne parviens pas à démontrer un théorème de mathématique qui me semble exact, il n'arrivera jamais que, par suite d'altérations dans la transmission, le télégramme que vous recevrez se trouve contenir la démonstration cherchée. Ceci montre clairement que l'information a toujours tendance à diminuer, à se perdre, tout comme la neg-entropie thermodynamique, le cas le plus favorable qui correspond aux transformations réversibles d'un système isolé en Thermodynamique étant celui où la neg-entropie se conserve.

Cette corrélation a d'ailleurs reçu une expression quantitative, M. Shannon et d'autres auteurs ayant montré que l'information peut se représenter par une formule du type

$$\sum_i p_i \log p_i$$

(où les p_i sont les probabilités des diverses successions possibles de signaux), expression identique au signe près à la célèbre fonction H qui a fourni à Boltzmann la première représentation statistique de l'entropie ; ainsi se trouve mathématiquement mise en évidence l'analogie entre l'information et l'entropie changée de signe. Un parallèle profond et suggestif paraît ainsi fermement établi entre l'information et la neg-entropie. Nous verrons cependant, quand nous passerons à la critique des résultats de la Cybernétique, que de sérieuses difficultés subsistent dans cette assimilation.

L'ETUDE des relations entre entropie et information a ramené l'attention des physiciens sur un singulier petit personnage imaginé jadis par Maxwell lors de ses réflexions sur la théorie cinétique des gaz : le Démon de Maxwell.

Le Démon de Maxwell, comme le Bonhomme d'Ampère, fait partie de ce que l'on pourrait appeler les « images d'Épinal » de la physique théorique ! Imaginons, disait Maxwell, une enceinte à température fixée, qu'une cloison percée d'un trou divise en deux compartiments. Les deux compartiments sont remplis d'un gaz dont les molécules peuvent passer d'un côté à l'autre de la cloison en traversant le trou. Le gaz ayant atteint l'équilibre thermodynamique, se trouve avoir même pression et même température dans les deux compartiments de l'enceinte. Maxwell supposait alors, qu'un petit être appartenant à l'échelle moléculaire, mais doué d'intelligence, se soit posté près du trou percé dans la cloison. A

l'aide d'un petit volet dont le maniement ne demande aucune énergie appréciable, il peut fermer ou démasquer le trou dont il est l'éclusier. Il pourra donc bien laisser passer les molécules les plus rapides de la gauche vers la droite, en leur interdisant le passage inverse, et, également, laisser passer les molécules les plus lentes de la droite vers la gauche sans leur laisser faire l'inverse. Au bout de quelque temps, il aura ainsi accumulé dans le compartiment de droite les molécules rapides, dans le compartiment de gauche les molécules lentes et quand par suite des chocs, les deux catégories de molécules se seront séparément remises en équilibre thermique, ou aura dans le compartiment de droite un gaz plus chaud que celui du compartiment de gauche ; en d'autres termes, ou aura, en contradiction avec le second principe de la Thermodynamique, créé sans dépense de travail une différence de température dans un système primitivement en équilibre thermique. Rien n'empêcherait d'ailleurs le démon de Maxwell de laisser passer par le trou toutes les molécules qui vont de gauche à droite et d'arrêter toutes celles qui vont de droite à gauche ; alors au bout d'un certain temps, tout le gaz se trouverait rassemblé avec toujours sa température initiale dans le compartiment de droite, celui de gauche se trouvant complètement évacué et alors les formules de la Thermodynamique montrent que l'entropie du gaz aurait diminué spontanément ce qui est encore contraire au principe de Carnot.

AINSI notre terrible petit diabolin, serait parvenu à faire ce que, nous autres hommes, nous sommes tout à fait incapables de réaliser ; tourner le principe de Carnot. Et s'il peut le faire, c'est parce qu'il peut agir prestement à l'échelle moléculaire sur les molécules prises une à une, tandis que nos grossiers moyens d'action humains ne nous permettent d'agir que sur des quantités énormes de molécules et dans des temps qui sont très longs par rapport à la cadence de l'agitation moléculaire.

Le Démon de Maxwell, on l'a admis pendant longtemps, tourne le principe de Carnot. Mais est-ce bien vrai ?

Avant de commencer son travail, le Démon est plongé dans un milieu en équilibre thermique où règne un rayonnement noir isotrope : dans de telles conditions, il ne peut rien voir. Comment saura-t-il alors qu'une molécule vient vers lui et qu'elle a une vitesse grande ou petite ? D'ailleurs le Démon, étant un être de l'échelle atomique, ne va-t-il pas aussi être mis en mouvement par l'agitation moléculaire et participer au mouvement brownien ? Certainement oui et cela ne va pas faciliter sa tâche d'éclusier.

Le problème est donc à reprendre en analysant les choses de beaucoup plus près que ne l'avait fait Maxwell. C'est ce qu'ont fait divers auteurs, notamment Léon Brillouin, qui ont ainsi prolongé de très intéressantes recherches de thermodynamique statistique, entreprises il y a vingt-cinq ans, par Szyldard.

POUR pouvoir voir les molécules qui viennent sur lui, le Démon, même en supposant que son mouvement brownien ne l'empêche pas d'accomplir son travail, devra disposer d'une source de lumière, une « torche » dit Léon Brillouin, à température plus élevée que le gaz ambiant et alors il n'y aura plus un équilibre thermique complet. Grâce à sa torche, le Démon va pouvoir voir les molécules qui arrivent sur lui et estimer leur vitesse : il va donc ainsi recevoir de

l'information, une information qui lui est nécessaire pour accomplir sa tâche et c'est ici que nous rejoignons la Cybernétique en utilisant la notion d'information.

L'analyse du processus montre que l'information est acquise au dépens de la neg-entropie du milieu extérieur par l'intermédiaire de la torche ; le Démon de Maxwell, comme d'ailleurs le physicien dans son laboratoire, ne peut faire d'observations lui permettant d'acquérir des informations qu'en empruntant finalement de la neg-entropie au milieu extérieur et cette nécessité de consommer de la neg-entropie pour obtenir de l'information, confirme bien notre conclusion que l'information n'est qu'une forme de la neg-entropie. En possession de l'information, le Démon pourra manœuvrer son volet de façon à augmenter la neg-entropie du gaz ambiant, mais, finalement, cet accroissement de la neg-entropie du gaz sera compensé par la diminution de celle du milieu extérieur, de sorte qu'il n'y aura eu aucune création de neg-entropie. En appelant « décision » l'acte de manœuvrer le volet, on pourra dire que le cycle accompli est le suivant :

« Neg-entropie — observation — information — décision — neg-entropie ».

L'observation transformant la neg-entropie en information et la décision retransformant cette information en neg-entropie. On peut dire que pendant ce cycle la neg-entropie a changé de forme, mais en se conservant,

J'ai insisté quelque peu sur cette question du Démon de Maxwell parce qu'elle illustre très bien l'analogie de l'information et de la neg-entropie et qu'elle montre combien les conceptions de la Cybernétique sont susceptibles de faire envisager sous des aspects nouveaux et instructifs des problèmes déjà anciens.

LA théorie des servo-mécanismes et celle des phénomènes de réaction, si importantes pour la radioélectricité et ses applications, peuvent être considérées comme des branches de la Cybernétique et, bien qu'elles puissent se développer tout à fait indépendamment des conceptions cybernétiques, celles-ci sont aussi dans ce domaine susceptibles d'éclairer de nombreux problèmes et d'en mieux faire pénétrer la nature réelle.

D'autre part, la Cybernétique paraît appelée à de nombreux succès dans le domaine de la physiologie, en particulier dans la physiologie normale et pathologique du système nerveux. Pour développer en ce sens la doctrine qu'il avait créée, l'éminent mathématicien qu'est M. Norbert Wiener n'a pas hésité à se faire quelque peu physiologiste et à demander son admission comme chercheur à l'Institut national de Cardiologie de Mexico. On m'excusera de ne pas entrer dans beaucoup de détails sur ces aspects physiologiques de la Cybernétique, car je me sens très peu compétent en cette matière.

Ce que nous savons aujourd'hui du fonctionnement du système nerveux nous montre que les neurones de notre système nerveux central reçoivent, de l'extérieur, des « informations » qui, partant de nos organes des sens, cheminent de la périphérie vers le centre grâce à l'influx nerveux. Les centres nerveux du cerveau, ou de la moelle épinière, peuvent réagir à ces informations en renvoyant vers la périphérie, soit par un acte volontaire, soit par un processus réflexe, des influx nerveux qui se traduisent par des actes. En particulier, les réflexes conditionnés, si brillamment étudiés par Pavlov, rentrent évidemment dans ce schéma général. Certaines maladies organiques, telles que l'ataxie, en désorganisant de diverses façons le fonctionne-

ment des circuits nerveux, provoquent des troubles bien connus des médecins qui correspondent à des perturbations des transmissions dans le système nerveux. Et, en introduisant ainsi les mots « information » et « transmission » dans la description du fonctionnement des connexions nerveuses, nous marquons bien le rôle que peuvent jouer les conceptions et les résultats de la Cybernétique dans l'analyse de la physiologie normale ou pathologique du système nerveux.

Dans un ordre d'idées très voisin, on a beaucoup insisté récemment sur l'analogie entre le fonctionnement des machines à calculer et celui de notre cerveau. Les machines à calculer contemporaines, non seulement exécutent des calculs mécaniques, mais résolvent des problèmes difficiles d'analyse mathématique : elles effectuent ces opérations, nous l'avons dit, avec plus de sûreté et de rapidité que notre cerveau lui-même. Comme ce sont là des opérations qui relèvent de la logique, on peut dire en un sens que ces machines sont douées de facultés logiques. On peut aussi les douer de « mémoire », car on a inventé des dispositifs grâce auxquels la machine garde en quelque sorte en réserve les résultats qu'elle a obtenus, et peut ensuite en faire à nouveau usage. Il est certain que ces analogies sont susceptibles de nous instruire beaucoup sur le fonctionnement de notre pensée et de notre raison. On pourrait même croire qu'il sera possible d'expliquer même les plus hautes opérations intellectuelles par des analogies avec les machines à calculer et d'en donner une interprétation complète à l'aide des lois de la Cybernétique. Nous dirons plus loin pourquoi une telle opinion nous paraît exagérée, mais il est incontestable qu'il y a là ample matière à réflexion.

Si la Cybernétique, nous ouvre ainsi des perspectives nouvelles sur le fonctionnement du système nerveux et sur le mécanisme même de notre activité mentale, elle peut aussi nous fournir de précieuses indications sur les processus vitaux en général, ceux-ci reposant en effet sur un réseau extrêmement compliqué d'actions et de réactions où les notions de signaux, de transmissions, d'information et de neg-entropie doivent certainement jouer un rôle essentiel. En poussant cette idée à l'extrême, et sur ce point aussi, j'aurai à faire des réserves, on en arrive à se demander si les organismes vivants ne sont pas totalement assimilables à des automates dont la Cybernétique, en s'appuyant sur des lois uniquement physico-chimiques, parviendra un jour à expliquer complètement le mécanisme.

Comme M. de Vaucanson eût été heureux de voir revenir ainsi la vogue des automates, lui qui, au milieu du XVIII^e siècle, en avait fabriqué de si remarquables, notamment ses canards « qui fonctionnaient au naturel » ! Les automates, en effet, qui après avoir été très à la mode, avaient longtemps été considérés comme des curiosités amusantes, mais sans grande portée scientifique, sont de nouveau à l'ordre du jour. Précurseur de cette renaissance, l'Espagnol Torrens y Quevedo avait repris la construction des automates et construit son célèbre « joueur d'échecs » qui est capable de gagner une partie simple de ce noble jeu contre un adversaire en chair et en os et qui est capable de protester en déclenchant une sonnerie, si cet adversaire n'applique pas correctement les règles du jeu. Aujourd'hui, M. Gray Walter, électro-encéphalographe de Bristol, nous présente des tortues automatiques qui sont douées de réflexes conditionnés, tout à fait analogues à ceux des êtres vivants et qui, comme les animaux poussés par la faim, vont chercher une nourriture, sont capables d'aller s'alimenter à une source d'énergie quand leur réserve est sur le point d'être épuisée. L'animal, l'homme lui-même, n'est-il qu'un « robot » particulièrement bien organisé ? La question se pose et les succès remportés dans la construction des automates paraissent apporter des arguments nouveaux en faveur d'une interprétation purement mécanique et physico-chimique de tous les processus de la vie.

APRÈS avoir insisté sur quelques-unes des conceptions les plus intéressantes et quelques-uns des succès les plus notables de la Cybernétique, nous voudrions faire à son sujet quelques remarques critiques qui nous serviront à tracer les limites de son pouvoir explicatif.

TOUT d'abord, la Cybernétique, telle qu'elle se présente aujourd'hui, est essentiellement une branche de la physique classique, c'est-à-dire qu'elle utilise les conceptions et les lois classiques de la mécanique et de l'électricité. Elle ignore donc les conceptions nouvelles de la théorie des Quanta et de la Mécanique onduatoire et ceci fait que la Cybernétique, dans son état actuel, ne peut fournir une interprétation exacte que des phénomènes macroscopiques à grande échelle et ne peut s'étendre aux phénomènes de l'échelle atomique qui sont cependant à la base de toute la Physique.

On peut dire aussi que la Cybernétique n'a pas innové autant qu'on pourrait le croire. La théorie des transmissions, celle des régulateurs ou des servo-mécanismes, etc., avaient déjà acquis un grand degré de développement avant la naissance de la Cybernétique et peuvent être considérées comme des branches autonomes de la Science, prolongements directs de la Physique classique. Le rôle de la Cybernétique a été surtout, en introduisant d'intéressantes conceptions générales nouvelles, d'unifier des théories qui semblaient indépendantes en montrant les liens profonds qui les unissent, en fournissant une sorte de schéma général qui les contient toutes comme cas particuliers. Ce faisant, la Cybernétique nous a ouvert des horizons nouveaux d'un intérêt incontestable, mais elle est néanmoins loin de nous avoir apporté sur ce qu'il y a de plus profond dans les phénomènes physiques des renseignements aussi radicalement nouveaux que l'a fait par exemple la théorie des Quanta.

Je voudrais insister un peu sur les relations de la Physique quantique avec la Cybernétique. Le fait que la théorie des transmissions emploie aujourd'hui avec avantage une représentation complexe des signaux (signaux analytiques de MM. Gabor et Ville), le fait qu'elle utilise l'inégalité $\Delta f \Delta t \geq 1$, exprimant que la représentation de Fourier d'un signal de durée Δt comprend des composantes spectrales couvrant un intervalle de fréquence Δf au moins égal à

1

-- ont quelquefois été interprétés comme indiquant un lien Δt

étroit entre la théorie des transmissions et la Physique quantique. Il n'en est rien. L'emploi des fonctions complexes, les développements de Fourier et l'inégalité $\Delta f \Delta t \geq 1$ sont connus depuis longtemps des mathématiciens et ne sont liés à aucune théorie physique particulière; ce qui caractérise la Physique quantique, ce n'est pas l'emploi de ces algorithmes en lui-même, c'est, ainsi que Bohr l'a dit et répété bien des fois, l'introduction du quantum d'action h dont l'existence crée entre l'aspect géométrique et l'aspect dynamique des phénomènes de l'échelle atomique un lien aussi fondamental qu'inattendu pour les physiciens classiques. Or il n'y a rien dans les théories se rattachant à la Cybernétique, telles qu'on les développe usuellement, qui introduise le quantum d'Action.

IL n'est cependant pas impossible de chercher à introduire le quantum d'Action, en quelque sorte comme une donnée expérimentale extérieure, dans le cadre de la Cyber-

netique et en particulier dans la théorie des transmissions. Jusqu'ici, il n'y a eu, je crois, en ce sens qu'une seule tentative sérieuse, celle de M. Denis Gabor, qu'on trouvera par exemple exposée dans sa communication aux réunions sur la Cybernétique dont j'ai déjà parlé. M. Gabor insiste avec raison sur le fait que la théorie des communications ne peut pas se développer uniquement sous une forme purement mathématique, elle doit tenir compte de la nature physique des signaux, des conditions physiques de leur émission, de leur propagation et de leur réception. Or ces phénomènes, quand on les analyse de près, se révèlent finalement comme résultant de transitions quantiques et dépendent, au moins en principe, de la constante h . Ainsi, on pourra être amené à introduire des considérations quantiques en théorie des communications et par suite en Cybernétique.

UN phénomène caractéristique, dont la théorie des communications a à se préoccuper, est le « bruit thermique ». Considérons une antenne de T.S.F. qui n'est actionnée par aucun courant d'émission et qui est en équilibre thermique avec l'atmosphère environnante. L'agitation thermique des électrons contenus dans l'antenne donnera lieu à une émission radio-électrique qui viendra perturber le fonctionnement des récepteurs voisins et constituera une forme de bruit thermique dont les fluctuations incessantes pourront être gênantes pour la réception des signaux. Comme le mouvement des électrons est essentiellement quantifié, on voit qu'une analyse rigoureuse du phénomène fera apparaître la constante h . M. Gabor a étudié ces questions d'une façon très intéressante en liaison avec sa théorie des éléments d'information $\Delta f \Delta t$; il a aussi analysé la manière dont un faisceau d'électrons absorbe une partie de l'énergie d'une onde électromagnétique qu'il traverse et donne d'intéressantes indications sur la façon dont s'opère le passage des absorptions quantiques élémentaires à l'absorption continue envisagée par la théorie électromagnétique classique. Ces résultats ouvrent des voies pleines de promesses dont la Physique quantique, et en particulier la théorie quantique du champ électromagnétique, pourra tirer profit: ils montrent qu'il pourra être utile, et même nécessaire, d'introduire les quanta dans certains chapitres de la Cybernétique. Mais cette introduction se fait en quelque sorte de l'extérieur en s'appuyant sur les enseignements de la Physique quantique tirés de l'expérience et il n'en résulte aucunement que la Cybernétique en elle-même puisse nous conduire à la Théorie des Quanta.

NOUS devons aussi insister sur le fait que l'assimilation de l'information à la neg-entropie, si instructive et séduisante qu'elle soit, n'est pas sans soulever encore des difficultés. D'abord la définition même de la quantité d'information, définition qui, naturellement, doit être précise et générale si l'on veut tenter d'assimiler cette grandeur à l'entropie changée de signe, ne paraît pas encore établie d'une manière incontestable. Dans son rapport sur la transmission de l'information aux réunions sur la Cybernétique déjà citée, M. Aigrain émet des doutes sur la possibilité de donner une définition de la quantité d'information qui soit indépendante de l'utilisation qu'on veut en faire. Cette circonstance pourrait être gênante pour l'établissement d'un parallélisme complet entre l'information et l'entropie. De plus, M. Léon Brillouin, qui a récemment étudié tous ces problèmes avec beaucoup d'esprit critique, a signalé une très grave difficulté. On sait, en effet, que si dans un système isolé des transformations thermodynamiques se produisent, l'entropie du système ne peut qu'augmenter (ou à la limite

pour des transformations réversibles rester constante). Employons encore le langage commode de la neg-entropie qui, elle, va toujours en diminuant. Nous pouvons dire que, lorsqu'un corps cède à un autre corps de la neg-entropie, la neg-entropie acquise par le corps récepteur est *au plus* égale à celle qui est perdue par le corps donneur ; il est facile de le vérifier par des exemples. Donc toute acquisition de neg-entropie par certains corps a pour contrepartie nécessaire une diminution de la neg-entropie d'autres corps. Or, en ce qui concerne l'information, les choses ne se passent pas du tout de la même façon. Lorsqu'un professeur enseigne à ses élèves les lois de la Physique, il leur donne de l'information, mais il n'en perd aucunement, car le fait qu'il vient d'enseigner les lois de la Physique n'a pour conséquence qu'il ait oublié ces lois. De même, si je vous envoie un télégramme pour vous annoncer par exemple que le gouvernement vient d'être renversé, je vous donne une information, mais je ne perds aucunement pour cela moi-même la connaissance de la crise ministérielle qui vient d'éclater.

On voit qu'ici l'analogie entre information et neg-entropie, dont nous avons aperçu l'étendue, semble ne plus se poursuivre. Comme cette analogie paraissait parfaite dans le cas de la transmission de l'information par des procédés physiques, transmission au cours de laquelle l'information ne peut que diminuer, on pourrait croire que la difficulté maintenant rencontrée provient de l'intervention d'êtres vivants, celui qui donne l'information et celui qui, finalement, la reçoit. Mais il semble bien qu'il n'en est rien puisqu'une machine à calculer munie d'une « mémoire », au sens que les constructeurs de ces machines donnent à ce mot, peut fort bien communiquer à des utilisateurs les résultats de ses calculs, c'est-à-dire de l'information, tout en conservant ces résultats dans sa mémoire. Léon Brillouin semble considérer cette difficulté comme très importante et de nature à faire douter de l'analogie entre information et entropie qui était l'un des résultats les plus attrayants de la Cybernétique. Peut-être pourra-t-on de quelque manière surmonter cette difficulté, mais elle paraît indiquer que l'ensemble de la question n'est pas encore bien au point.

NOUS avons vu que la Cybernétique apporte à la physiologie normale et pathologique, en particulier à celle du système nerveux, des points de vue et des suggestions d'un très haut intérêt. Elle semble même devoir nous éclairer sur plus d'un point concernant le fonctionnement de notre intelligence et de notre raison. Ne va-t-elle pas dès lors nous amener à une compréhension totale des phénomènes de la Vie ? La tortue de Gray Walter n'est-elle pas déjà presque un être vivant ? Les grandes machines à calculer de l'époque contemporaine ne sont-elles pas déjà des sortes de cerveaux en fonctionnement ?

Je crois qu'ici aussi, il y a bien des réserves à faire. Certes, les machines à calculer parviennent à faire avec plus de sécurité et de rapidité que notre cerveau certains calculs, certaines résolutions de problèmes analytiques. Mais cette sécurité et cette rapidité proviennent justement de leur automatisme : elle a pour contrepartie que la machine ne possède pas cette faculté créatrice, ce désir d'aller au-delà de ce qui est déjà acquis qui sont les caractéristiques essentielles de la pensée humaine. Léon Brillouin, qui a insisté d'une façon très pertinente sur ces points, a fortement souligné que les machines à calculer, œuvres du génie humain, ne savent faire que le travail en vue duquel elles ont été construites. Conçues et réalisées par le savant et par l'ingénieur, elles ont besoin de leurs soins pour être entretenues et éventuellement réparées. Il leur manque assurément cette

propriété essentielle des êtres vivants sans laquelle la pensée est inconcevable : la conscience de leur existence et de leur personnalité. Parce qu'il est impossible de leur attribuer une conscience analogue à la nôtre, le fonctionnement des machines à calculer, si perfectionnées soient-elles, n'est pas identique à celui de notre pensée. Le nom de « machines » que nous sommes tout naturellement amenés à leur attribuer, n'indique-t-il pas d'ailleurs qu'elles sont des créations de notre intelligence, analogues à tous les outils dont l'humanité a su peu à peu se munir pour augmenter l'efficacité de son action, depuis la hache en silex taillé jusqu'aux réalisations les plus raffinées de la technique moderne ? La machine paraît, de par sa nature même, incapable de ces efforts créateurs qui aboutissent par exemple aux grandes découvertes scientifiques et qui paraissent propres à l'intelligence humaine. Dans ce genre d'effort, notre intelligence crée de « l'information absolue » (selon le mot de Léon Brillouin) et cette création n'a vraiment de valeur que parce que nous en sommes conscients. Peut-on imaginer qu'une machine puisse faire quelque chose d'analogue ?

L'ESPOIR que paraissent avoir certains adeptes de la Cybernétique, d'arriver à expliquer non-seulement tout le fonctionnement du système nerveux, mais même toute l'activité intellectuelle à l'aide de la théorie des communications ou de ses prolongements, semble s'apparenter à l'opinion de ceux qui regardent comme possible l'explication de tous les problèmes biologiques par les lois actuellement connues de la Physico-Chimie. Ceci nous ramène au grand problème de la Vie et, bien que ce problème sorte tout de même un peu du cadre de la Cybernétique, je voudrais en dire cependant quelques mots parce que le développement de la Théorie des Quanta et de la Cybernétique ont amené d'assez nombreux physiciens, notamment Shrödinger, Pierre Auger et encore Léon Brillouin, à s'en préoccuper dans ces dernières années.

Un point sur lequel il semble que tout le monde soit d'accord, c'est que, du point de vue du physicien et conformément à une vue profonde du philosophe Henri Bergson, le trait caractéristique des phénomènes biologiques soit de retarder dans une certaine mesure l'inévitable accroissement de l'entropie. En effet, le second principe de la Thermodynamique nous dit que l'évolution de l'Univers s'accompagne inexorablement d'une augmentation de l'entropie, mais il ne nous dit rien au sujet de la vitesse avec laquelle s'effectue cette augmentation. Si l'on parvenait (ce qui est pratiquement irréalisable) à supprimer pendant un certain temps tous les phénomènes irréversibles, l'entropie resterait momentanément constante et ce n'est qu'ensuite, quand fatalement reparaitraient les phénomènes irréversibles, qu'elle se remettrait à augmenter. Rien n'empêche donc, en principe, de ralentir le cours de l'augmentation de l'entropie malgré le caractère inévitable de celle-ci. De même qu'il existe des agents dits « catalyseurs » qui, en provoquant des réactions irréversibles, précipitent l'augmentation de l'entropie, il existe des mécanismes de « catalyse négative » qui tendent à l'enrayer et la caractéristique de la Vie paraît bien être de créer de tels mécanismes. Un pessimiste a dit : « La vie est une lutte avec la certitude d'être vaincu. » Cette phrase amère contient une vérité profonde, car la vie est bien une lutte pour maintenir l'état très improbable que représente l'organisme vivant avec la certitude que, finalement, l'augmentation de l'entropie l'emportera avec le retour à l'état plus probable où l'organisme sera dissous et se réduira en poussière, c'est-à-dire à une dissémination de molécules que n'unit plus aucune liaison organique. Et encore la Vie a-t-elle inventé par le mécanisme de la reproduction un moyen de prolonger à travers le temps cette lutte déses-

pérée contre l'augmentation de l'entropie. Vue sous ce jour, la Vie, avec ses facultés d'assimilation, de réparation spontanée et de reproduction, avec les manifestations de conscience, d'intelligence, de raison qui apparaissent dans ces formes élevées, est une chose bien extraordinaire.

SUR ce problème de la Vie, un physicien éminent, l'un des fondateurs de la Mécanique ondulatoire, M. Erwin Schrödinger, a écrit récemment un ouvrage bien intéressant intitulé : « Qu'est-ce que la Vie ? » (What is Life ?). A côté de nombreuses autres remarques importantes, Schrödinger y développe l'idée essentielle que seule l'existence des Quanta peut rendre possible la persistance des êtres vivants. On sait, en effet, que si la Physique classique était exacte, la matière elle-même serait instable : seule l'existence des discontinuités quantiques permet de comprendre la stabilité des édifices atomiques et moléculaires, et par suite la stabilité de la matière inerte. Or la matière vivante nous offre aussi des exemples remarquables de stabilité : stabilité des organismes vivants pendant toute la durée parfois longue de leur existence, impliquant la stabilité des cellules et des assemblages cellulaires qui les composent ; stabilité aussi pouvant persister pendant des millénaires, de la forme des espèces vivantes impliquant une remarquable stabilité de constitution des cellules génératrices susceptibles de maintenir les mêmes caractéristiques pendant des millions de générations successives. Comme pour la matière inerte, une telle stabilité n'est possible que grâce à l'intervention des discontinuités quantiques. Comme les atomes, les cellules et les gènes ne restent stables que parce que leur structure ne peut pas subir les variations continues admises par la physique classique et qu'elle peut seulement subir de brusques et importantes modifications : comme dans le cas des molécules et des atomes de la matière inerte, le fait que seules sont possibles des modifications brusques et finies protège les structures existantes, les rend stables et est l'origine d'une certaine tendance à la reconstitution des structures détruites. La découverte des mutations brusques due surtout à de Vries et tout le mouvement d'idées qui en est découlé dans la Biologie moderne, ne tend-il pas d'ailleurs à prouver que les structures biologiques, tout comme celles des atomes et des molécules de la matière inerte, ne peuvent se modifier que par sauts brusques, par transitions quantiques ?

CE bref résumé suffit à vous prouver l'importance des idées de Schrödinger et l'intérêt qui s'attache à l'interprétation quantique des phénomènes biologiques. Mais, même en admettant que cette Biologie quantique puisse parvenir, à elle seule, à expliquer le secret de la Vie, il n'en resterait pas moins vrai que la Cybernétique, dont les fondateurs n'ont rien de quantique, ne saurait y suffire.

Schrödinger a sans aucun doute raison de penser que l'explication des phénomènes biologiques devra nécessairement comporter l'intervention des conceptions quantiques. Mais il semble croire que les théories quantiques pourront suffire pour nous faire pénétrer les ultimes secrets de la Vie. Léon Brillouin ne le pense pas et il a énoncé à ce sujet des vues que j'approuve entièrement. Il rappelle que c'est une illusion sans cesse renaissante, et par là même dangereuse, de croire que la science est maintenant stabilisée et, qu'avec les connaissances qu'elle nous fournit *actuellement*, on va pouvoir expliquer tout ce qui reste mystérieux. Lagrange, il y a un siècle et demi, se plaignait, dit-on, qu'il n'y eût qu'un système du monde et qu'après l'œuvre

de Newton, il ne restât plus rien d'essentiellement nouveau à découvrir. Il se trompait grandement et, s'il vivait encore, le spectacle de l'Astronomie et de la Physique contemporaines le lui montrerait bien. Mais nous sommes toujours en danger de commettre la même erreur que lui et de croire que, si hier on ne savait rien, aujourd'hui on sait tout : soyez sûr que demain se chargera de nous détromper. Je pense, comme Léon Brillouin, que, si nous parvenons un jour à mieux comprendre la véritable nature encore si mystérieuse de la Vie, ce ne pourra être que quand nous aurons acquis la connaissance de nouvelles lois de la nature et même sans doute quand nous serons parvenus à des points de vue et à des manières de penser dont notre intelligence ne dispose pas encore. Peut-être même, comme semble le suggérer Léon Brillouin, les lois enfin comprises de la Biologie nous apparaîtront-elles comme les plus générales, les lois physico-chimiques de la matière inerte n'en étant que des cas particuliers ou des dégénérescences.

Mais, sans se lancer dans des considérations trop hypothétiques, on peut, semble-t-il, affirmer que ce n'est pas la Cybernétique qui nous fournira la clef de l'ensemble des phénomènes biologiques.

Quant aux applications économiques ou sociales de la Cybernétique, il se peut qu'il y en ait d'importantes un jour ou l'autre, mais ce n'est là qu'un programme et ce qu'en dit Norbert Wiener à la fin de son livre me paraît rester encore assez vague.

Et maintenant, je voudrais rapidement résumer mes conclusions.

La Cybernétique nous a apporté des résultats d'un incontestable intérêt. Elle nous a fourni des méthodes nouvelles et des points de vue originaux, ce qui est toujours précieux. Sans doute n'a-t-elle pas créé de branches vraiment neuves de la Science car, toutes celles qu'elle a permis de grouper en un faisceau existaient déjà avant elles et auraient pu continuer à se développer sans elles. Mais c'est précisément en les groupant et en les unifiant qu'elle les a vivifiées par les rapprochements qu'elle a ainsi suggérés. Et, comme certaines de ces branches de la Science, comme par exemple la théorie des communications, ont une grande importance au point de vue des applications techniques, la Cybernétique n'est pas seulement une belle construction de l'esprit, elle est aussi susceptible de faire naître dans bien des directions des progrès d'une haute importance pratique.

La plus importante et la plus belle des idées suggérées par la Cybernétique est assurément celle d'une analogie profonde entre l'information et l'entropie car cette idée jette des flots de lumière sur beaucoup de problèmes restés jusque-là un peu obscurs, comme celui du Démon de Maxwell. Si cette conception nouvelle, si stimulante pour la pensée du savant, se heurte encore, nous l'avons vu, à pas mal de difficultés, il me paraît probable que, peut-être après avoir été convenablement amendée, elle finira par rester comme une magnifique acquisition dans le patrimoine de la connaissance scientifique.

L'esprit de la Cybernétique a déjà fécondé et il continuera à féconder de nombreuses branches de la Science.

Mais il ne faut pas demander à la Cybernétique de nous donner plus qu'elle ne peut nous donner. Je ne crois pas qu'on puisse espérer qu'elle nous fournira, à elle seule, dans un avenir plus ou moins prochain, la solution de la triple énigme de la Vie, de la Conscience et de la Pensée.