

**La machine
fournit un
référentiel**

**pour la pensée
de l'Occident.**

**La science a
emprunté à l'art
de l'ingénieur celui
du découpage
du réel en petits
morceaux
agencables,
qu'elle ajuste en
vastes machineries
théoriques.**

**Exemples venus
du passé :**

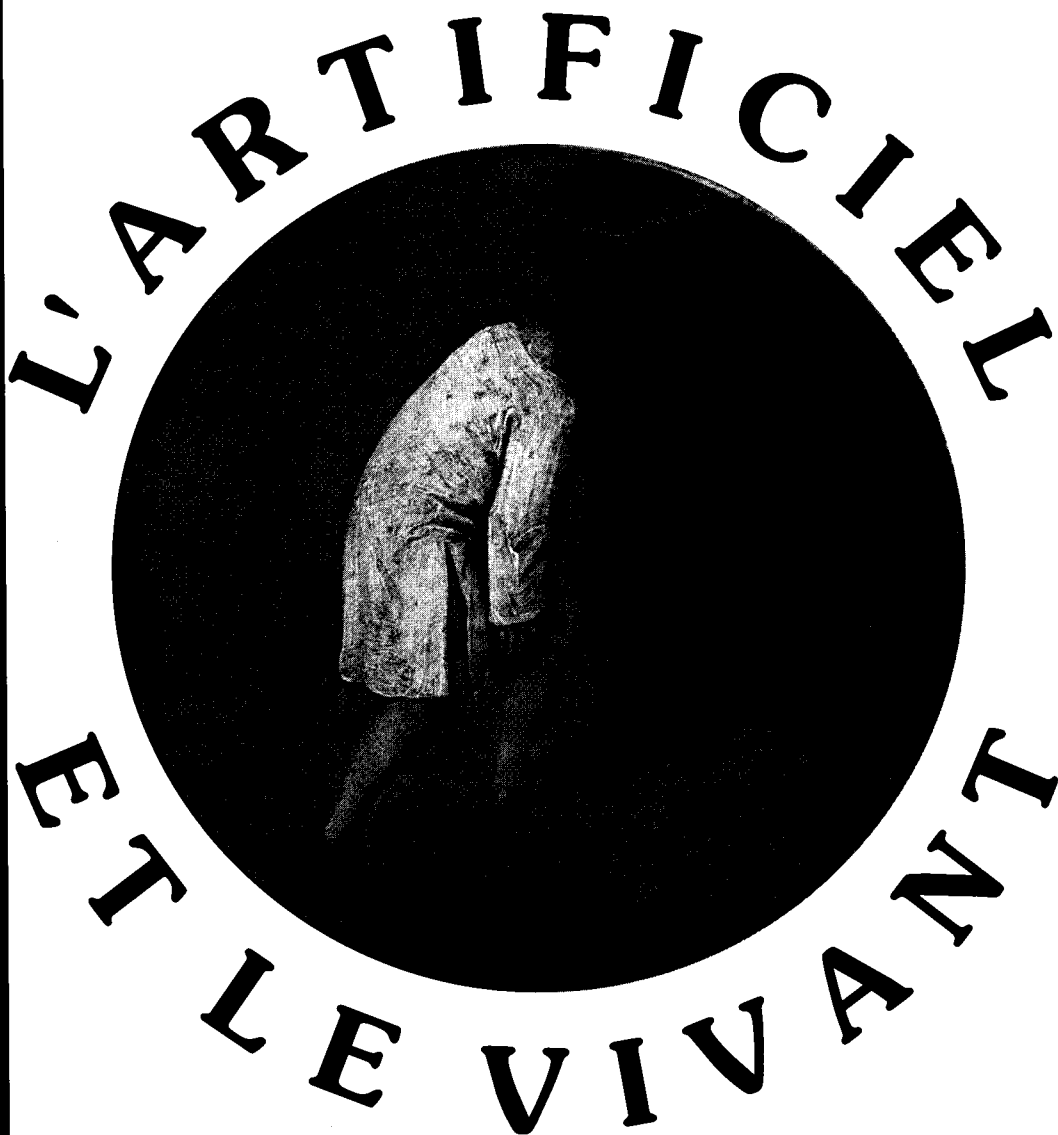
**les machines
combinatoires de
Raymond Lulle,
les automates,
le canard de
Vaucanson...**

**Aujourd'hui,
les machines
continuent à nous
servir de miroir.
Depuis les années
1940, elles ont
opéré une mutation
subtile, qualitative.**

**Le rouage a
fait place à
l'électronique
révélant de
nouvelles analogies
entre l'artificiel et
le vivant, brouillant
les anciennes
frontières.**

**Ce dossier vous
invite à une
excursion dans
l'univers des
théories
contemporaines
qui s'inspirent
de la machine.**

Guy Lacroix



■ **ANTOINE DANCHIN**, biologiste -mathématicien de formation- de plus informaticien, apparaissait tout indiqué pour nous entretenir des nouveaux liens entre informatique et biologie, et analyser la contamination progressive par des termes biologiques d'un vocabulaire informatique resté jusque-là très autarcique. ■ **PIERRE LÉVY** nous présente un panorama des technologies intellectuelles, marquant la filiation entre l'écriture et l'univers chatoyant des logiciels de simulation qui ouvrent de nouvelles perspectives à l'imaginaire.

■ **GUY LACROIX** nous rappelle les origines de la cybernétique, une science interdisciplinaire qui s'est appuyée sur les machines pour aborder le nouveau continent que nous ouvre la notion d'information et créer ainsi un lien entre l'animal, l'homme et la société. ■ **DOMINIQUE LESTEL** nous informe sur une démarche commune entre roboticiens et éthologues, tout particulièrement les spécialistes des insectes sociaux. C'est peut-être une approche originale de la société qui se balbutie. ■ Avec la systémique, la machine s'est transmuée en système et **JEAN-LOUIS LEMOIGNE** nous entretient de la méthode à mettre en œuvre pour rendre compte des multiples facettes de la complexité. ■ Le texte de **FRANÇOISE PETITOT** sert de contrepoint, elle nous montre les efforts d'un Freud et d'un Lacan pour construire une métapsychologie s'inspirant du modèle énergétique et machinique. Elle pointe le manque essentiel : l'écart entre le réel et ce que nous en formalisons.

Biologie et informatique : des frontières à ne pas franchir

UNE INTERVIEW D'ANTOINE DANCHIN PAR DENIS FAVRE

L'irruption, ces dernières années du langage biologique dans l'informatique surprend. La référence au vivant, les analogies développées à partir des virus, du cerveau, nous ont amené à interroger Antoine Danchin*, biologiste, chef d'unité à l'Institut Pasteur, mathématicien de formation, sur la signification, les conséquences, la validité de ce nouveau paradigme.

■ **TERMINAL :** *Virus, réseaux neuronaux, neuromimétiques, etc... tous ces mots qui font référence à la biologie connaissent un succès médiatique certain. Pour vous, ces analogies reflètent-elles une réalité, ou font-elles partie d'une mauvaise vulgarisation ?*

■ **Antoine Danchin :** Je crois qu'il faut d'abord souligner la difficulté de toute vulgarisation, qui implique une traduction et donc, une trahison. Il s'agit donc toujours d'utiliser des mots "traduits" avec précaution. La vulgarisation consiste à employer des mots que les gens comprennent, pas les mots qu'ils ne comprennent pas, et c'est là sa plus grande difficulté. L'astuce et l'escroquerie de la mauvaise vulgarisation sont d'employer des mots magiques, pour signifier des tas de choses que l'on ne dit pas. Ce sont des mots dans lesquels on met un paquet énorme, et avec lesquels on fait tout passer, comme "évolution", ou "énergie" au 19ème siècle.

Or certaines analogies peuvent être dangereuses. Je pense en particulier à l'assimilation de l'entropie au désordre : c'est complètement faux, car la notion d'ordre est principalement subjective, au contraire de l'entropie. Ce que dit le deuxième principe de la thermodynamique, c'est que si l'on a une collection macroscopique d'objets, ils tendent à occuper le plus grand nombre possible d'états différents, en position ou en énergie. L'entropie est essentiellement un pouvoir d'exploration. Des papiers sur mon bureau vont effectivement avoir tendance à se répandre, mais on voit que cette exploration va aussi permettre de mettre en contact deux documents différents et donc de créer aussi d'un point de vue différent, de "l'ordre". En fait les physiciens pour la plupart, font attention. Cette notion d'entropie a surtout envahi le domaine littéraire

et sociologique, et "l'ordre thermodynamique" a pu servir à cautionner des idéologies réactionnaires : on en trouve une excellente illustration dans le vocabulaire du fameux "What is life ?" de Schrödinger paru en 1944.

On se passe difficilement des analogies, puisqu'en fait, un modèle scientifique est aussi une analogie, mais il faut simplement s'en méfier. La science qu'on crée pourrait être autrement qu'elle n'est. Ce n'est pas une révélation : elle est quelque part, toujours inadéquate. En science, ce qui est amusant, c'est de créer des modèles, et de chercher en quoi ils sont inadéquats. Or on confond souvent les modèles du réel avec le réel, et c'est ce qui fait, à mon avis, que la science a une position quasi religieuse en ce moment. Il est donc clair qu'un entretien comme le nôtre ne peut être que schématique et que, pris au pied de la lettre, il peut conduire à des idées fausses... et qui ne sont pas les miennes.

■ **Terminal :** *Mais que tirer, avec toutes les précautions dont on vient de parler, des analogies bio-informatiques ? Par exemple, on parle de programme génétique...*

■ **A.D. :** Effectivement, dans les gènes, on a des familles d'instructions qui lues successivement, donnent un résultat opératoire presque algorithmique, tout comme dans un programme informatique. Au niveau moléculaire l'analogie est acceptable, mais l'information n'y existe qu'au sens de l'information contenue dans une recette de cuisine, rien de plus "scientifique". En voici une très, trop brève illustration.

Il n'y a pas dans les gènes, par exemple : l'information "avoir les yeux marrons", mais les instructions, éventuellement dispersées dans le génome, nécessaires à la fabrication d'une famille d'enzymes. Ce n'est que lorsque les enzymes travailleront ensemble, que les yeux seront colorés en marron. La connaissance du programme n'est pas suffisante pour connaître ce qu'il réalise. Il faut d'abord connaître le contexte de fonctionnement du programme (l'environnement). Il faut aussi savoir la fonction de chacune des enzymes produites par le programme.

De plus, un même programme génétique pourra être lu différemment dans des cellules différentes, certains passages pourront être sautés, d'autre réunis dans un ordre différent (c'est par exemple ce qu'on appelle l'épissage alternatif). Cela collerait plutôt à l'idée d'un programme modulateur, un bloc et une routine qui change.

Hélas, l'inadéquation de l'analogie informatique a déjà produit des effets pervers en biologie. Certains chercheurs confondent le programme et sa réalisation.

◆ ENTROPIE

LE FAIT QUE L'UNIVERS ET PARTICULIÈREMENT LA VIE SE SOIENT ORGANISÉS SELON UNE LIGNE DE COMPLEXITÉ CROISSANTE ÉCHAPPAIT DANS UNE LARGE MESURE À L'APPROCHE SCIENTIFIQUE. LA THERMODYNAMIQUE RENDAIT BIEN COMPTE DU PHÉNOMÈNE DE LA MORT INÉLUCTABLE DES SYSTÈMES PAR UN PROCESSUS GÉNÉRAL DE "DÉGRADATION" DE L'ÉNERGIE : L'ENTROPIE. MAIS ELLE ÉTAIT INCAPABLE DE COMPRENDRE LA NAISSANCE DE LA VIE, NI D'EXPLIQUER COMMENT UN ÊTRE VIVANT ARRIVAIT À RÉSISTER PENDANT UN TEMPS À SA DÉGRADATION INÉLUCTABLE, ET ENCORE MOINS COMMENT UNE LIGNÉE D'ÊTRES VIVANTS PARVENAIT À REMONTER CETTE FLÈCHE DE L'ENTROPIE, EN ÉVOLUANT ET EN SE COMPLEXIFIANT.

*Dernier livre paru : "L'aurore de pierre". Ed. Seuil 1990.

Ils pensent par exemple que le décryptage total du génome humain apportera des connaissances à la mesure des efforts de recherches gigantesques nécessaires. Ce qui serait très partiellement vrai pour le programme d'un microbe qui contient 98% de signifiants et 2% d'archives, ne l'est pas pour les programmes génétiques des organismes supérieurs où c'est l'inverse (2% de signifiants et 98% d'archives).

A ce niveau, c'est la biologie qui a été contaminée par des concepts inadéquats venus de l'informatique, plutôt que l'inverse.

■ **Terminal : Et l'intelligence artificielle ? peut-on dire que le cerveau fonctionne à la manière d'un réseau de neurones ?**

■ **A.D. :** On ne peut pas comparer cerveau et ordinateur. La confusion, en France, repose sur un jeu de mot qui a bien marché, celui de servo-mécanisme. Le cerveau ne fonctionne pas comme un ordinateur, sauf peut-être très localement, pour certaines des propriétés de réverbération, la mémoire à court terme, etc..., en tout cas pas comme ce que sont les ordinateurs actuellement. D'ailleurs s'il fallait 10 ans pour apprendre un programme à un ordinateur, on choisirait une être humain.

D'autre part, les systèmes neuromimétiques contiennent un grand nombre de composants similaires, ce qui ne semble pas être le cas du cerveau (mais c'est le cas du cercelet). Par ailleurs, il faut savoir que l'influx nerveux ne passe une synapse qu'en une milliseconde : ce n'est pas la même échelle de temps pour les ordinateurs, qui sont considérablement plus rapides. Et puis il y a peu de liaison entre qualité et quantité de masse cérébrale et capacité créatrice. Pasteur a eu une grande capacité créatrice alors qu'il avait depuis longtemps une énorme partie du cerveau détruite.

Je pense que les généralisations sur le système nerveux central, à partir des modèles soi-disant neuromimétiques sont très surfaites, parce que très partielles. Entendons-nous, ça a un intérêt considérable du point de vue informatique. Surtout, cela a eu le mérite de démontrer quelque chose que l'on soupçonne depuis longtemps : on peut mettre un quantité gigantesque d'information dans un réseau relativement petit. C'est à dire qu'un cerveau humain a des capacités d'engrangement, d'assimilation, absolument fantastique. D'ailleurs, à mon avis, la seule vraie limite au cerveau, ce sont les organes des sens. L'accès aux richesses de l'environnement est très, très lent, et c'est ce qui nous limite.

■ **Terminal : Que pensez-vous des travaux de Varela au C.R.E.A. ?**

■ **A.D. :** Cela me fait penser à du comique ou à de la poésie ésotérique, ou bien ce sont d'extraordinaires banalités. L'auto-ceci, l'auto-cela, "systèmes complexes", qu'est-ce que ça apporte, en quoi est-ce prédictif, explicatif, ou adéquat ? Mais je reconnais que je n'ai pas lu de choses récentes, car c'est trop agaçant. Il faut se rendre compte qu'avec la diminution du sentiment religieux, les marges de la science ont pris la fonction des religions. Il s'est alors créé un vocabulaire incantatoire qui n'est pas sans rappeler la



Cerveau en activité.

façon dont la médecine "molièresque" "expliquait" le sommeil par les vertus dormitives. Mais revenons au cerveau...

Un certain nombre de modèles du système nerveux central ont suggéré, que ce qui était important, c'était la connexion, c'est à dire les synapses, et que les synapses pouvaient être modifiables.

Johnson, puis Changeux, Courrège et moi-même avons produit quelques réflexions à ce sujet. On montre que les propriétés formelles qu'on peut dériver de ce genre de fonctionnement, peuvent servir à créer des systèmes qui apprennent. Cela a été, en partie, démontré mathématiquement. Les gens qui ont voulu faire des systèmes neuro-mimétiques se sont dit que si cela marchait, on pourrait alors faire des systèmes capables d'apprendre, ce dont les ordinateurs étaient incapables. L'homme apprend à lire l'écriture : si ce genre de propriété est d'engranger dans la connectivité, la mémoire de ce que l'on a vu, et en particulier des régularités, si on peut en faire une machine, c'est intéressant. Mais de là à en tirer des conclusions générales sur le fonctionnement du cerveau, c'est parfaitement immodeste et donc non-scientifique.

■ **Terminal : Et les systèmes de type homéostat ?**

■ **A.D. :** Il est clair qu'une partie importante du fonctionnement des systèmes biologiques se fait avec rétroaction. La cybernétique l'a mis en avant, mais c'était bien connu depuis longtemps. La rétroaction permet de faire des homéostats. Ce qui est particulièrement intéressant, c'est que dans le monde vivant, ce sont essentiellement des homéostats ratés : c'est l'échec partiel de la tentative de créer des homéostats qui permet une évolution et toutes sortes de contrôle.

■ **Terminal : Pourrait-on construire des systèmes informatiques "intelligents" qui fonctionneraient sans ressembler au cerveau ?**

■ **A.D. :** En fait, il me semble qu'ils existent déjà sous la forme des systèmes experts, qui fonctionnent sur des machines classiques, même si elles ne sont pas particulièrement adaptées à ce type de travail. Quand à savoir si les résultats produits sont "intelligents", cela demanderait une définition de l'intelligence, ce qui reste à faire.

J'ai eu une expérience dans le domaine des systèmes experts qui m'a troublé. J'ai utilisé un logiciel créé par Olivier Gascuel : PLAGE, qui fait de l'apprentissage par discrimination ; c'est à dire qu'ayant une classe d'objets, on cherche à les décrire de manière non triviale par des descripteurs, sans décrire explicitement chaque objet. Je travaillais sur un problème

◇ HOMÉOSTASIE

SOUS CE NOM, CANNON (1926) A DÉSIGNÉ UNE CARACTÉRISTIQUE GÉNÉRALE DES ORGANISMES CONSISTANT EN LA TENDANCE À MAINTENIR CONSTANTES LES CONDITIONS DE VIE, À LES RÉTABLIR QUAND ELLES SE SONT TROUVÉES MODIFIÉES (EN PARTICULIER EN CE QUI CONCERNE LE MILIEU INTÉRIEUR). PLUS GÉNÉRALEMENT : RÉGLAGE ET AUTOENTRETIEN, PAR RÉTROACTION, D'UN ÉTAT D'ÉQUILIBRE DANS UN SYSTÈME.

HENRI PIÉRON : VOCABULAIRE DE LA PSYCHOLOGIE, ÉD. PRESSE UNIVERSITAIRE.



Pasteur



Bactérie éclatée laissant échapper son ADN

Photo J.C. Revy, CNRS

◆ VARELA ET L'AUTOPOIÈSE

FRANCISCO VARELA EST NÉ AU CHILI EN 1946. PH.D DE BIOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ DE HARVARD. SES TRAVAUX EN NEUROBIOLOGIE, BIOLOGIE THÉORIQUE ET ÉPISTÉMOLOGIE, MENÉS EN AMÉRIQUE LATINE, AUX ÉTATS-UNIS ET EN EUROPE LUI ONT ASSURÉ UN RENOM INTERNATIONAL. IL OCCUPE ACTUELLEMENT LA CHAIRE D'ÉPISTÉMOLOGIE ET SCIENCES COGNITIVES DE LA FONDATION DE FRANCE AUPRÈS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE (CREA). IL EST MEMBRE DE L'INSTITUT DE NEUROSCIENCES (CNRS-UNIVERSITÉ DE PARIS VI).

VARELA APPROCHE LA BIOLOGIE ET LES SCIENCES DE LA COGNITION DANS UNE OPTIQUE DIFFÉRENTE DE LA MÉTAPHORE INFORMATIQUE, JUSQU'IL Y A PEU DOMINANTE. CETTE VOIE, COMPLÉMENTAIRE À LA PRÉCÉDENTE EST CELLE DE L'AUTONOMIE. LES ÊTRES VIVANTS CONSTITUENT LEUR PROPRE CADRE D'EXISTENCE ET DE SENS. CE SONT DES SYSTÈMES QUI PRODUISENT LEUR IDENTITÉ ; ILS SE DISTINGUENT EUX-MÊMES DE LEUR ENVIRONNEMENT. C'EST POURQUOI IL LES NOME AUTOPOIÉTIQUES, DU GREC AUTOS (SOI) ET POIEN (PRODUIRE).

L'AUTOPOIÈSE EST UNE VERSION EXTENSIVE DE L'HOMÉOSTASIE, CETTE PROPRIÉTÉ DES ÊTRES VIVANTS DE MAINTENIR LEUR ÉQUILIBRE INTERNE. AINSI, UNE MACHINE AUTOPOIÉTIQUE EST UN SYSTÈME HOMÉOSTATIQUE DONT L'INVARIANT FONDAMENTAL EST SA PROPRE ORGANISATION (LE RÉSEAU DE RELATIONS QUI LE DÉFINIT). ELLE ENGENDRE ET SPÉCIE SON ORGANISATION PAR UN PROCESSUS INCESSANT DE REMPLACEMENT DE SES COMPOSANTES EN RÉPONSE AUX PERTURBATIONS EXTERNES DE SON ENVIRONNEMENT. UN PEU À L'IMAGE DU SYSTÈME IMMUNITAIRE QUI CRÉE DE NOUVELLES MOLÉCULES CAPABLES DE RÉPONDRE À UNE AGRESSION EXTERNE SPÉCIFIQUE.

de génie génétique, la production d'une protéine humaine. Il s'agissait de faire sécréter cette protéine dans un compartiment particulier d'une bactérie, afin de la récupérer facilement. Il s'agit d'un système de production hétérologue. Et l'on est donc amené à comparer deux classes, les protéines sécrétées humaines et les protéines sécrétées bactériennes.

De façon simple, le problème se pose ainsi ! On a deux classes d'objets qui se ressemblent, qui étaient considérés comme étant de la même classe par les experts du domaine. Mais il faut les distinguer parce qu'en conditions industrielles, elles ne se comportent pas de la même façon. Nous avons donc indiqué à la machine qu'il y avait deux classes, et nous lui avons demandé en quoi elles étaient différentes.

Si elle nous donnait une règle pour décrire les éléments de la première classe, et une règle pour la seconde, cela pouvait servir à créer un objet de l'une ou l'autre classe. Nous lui avons donc donné des descripteurs élémentaires, sur ces morceaux de protéines, et un certain nombre de propriété de parenté entre ces objets. Puis on a créé une grammaire qui permet de combiner ces descripteurs élémentaires, pour faire des descripteurs complexes, que la machine teste ensuite. Il a fallu une nuit de VAX, et à la fin on est arrivé à 17 descripteurs, là où les spécialistes n'en avaient trouvé que deux.

On l'a appliqué, et ça marche fort bien. Cela aucun expert ne l'avait trouvé. Ce travail a été soumis pour publication et curieusement la réaction du premier journal a été de dire que c'était très bien, mais que c'était nous qui étions intelligents, pas la machine ! Pourtant, je n'en suis pas sûr, mais là encore tout dépend de ce qu'on appelle "intelligence"... Cela indique donc une grande incompréhension de ce qu'est l'IA.

■ **Terminal : Vous avez d'abord été mathématicien, vous êtes maintenant biologiste. Y a-t-il des apports d'une discipline à l'autre ?**

■ **A.D. :** En général, on ne s'en soucie pas du tout. Pourtant je pense que les lois biologiques sont plus du ressort des mathématiques, que de la physique, ce qui semble paradoxal puisque la biologie s'occupe d'une certaine forme de la matière ; or ces lois sont très abstraites.

Les mathématiques du chaos, par exemple, apportent de nouvelles manières de voir les choses, essentiellement parce qu'elles permettent de distinguer le déterministe du prévisible. Pour le système nerveux central, je ne veux rien dire, mais ailleurs, je pense qu'il y a en biologie une majorité de systèmes déterministes mais imprévisibles. Toute une série de propriétés semblent montrer qu'il y a une individualité des cellules, même si les programmes génétiques et l'environnement sont identiques. Cela pourrait être considéré comme un comportement instable de type chaotique.

Ainsi, la plupart des objets qui interviennent dans les fonctions de régulation de la cellule sont en très petit nombre, en général un par cellule et par génération. Un, c'est très instable au regard des conditions initiales : cela varie entre zéro et deux. Or zéro, c'est l'absence et donc cela a des conséquences qualitatives incommensu-

rables avec celles de la présence. Bien sûr, il peut y avoir un gène spécifique pour régler les régulateurs, mais ce gène lui-même serait soumis aux mêmes règles. Et ce jusqu'à l'infini, mais le génome est fini.

Nécessairement donc il existe des gènes en petit nombre, dont l'expression suit une loi de Poisson dans la population, et cela a des incidences sur les capacités des bactéries à se nourrir, à se mouvoir. Ainsi, une population composée d'êtres génétiquement identiques serait constituée d'individus différents.

On peut le voir sur des cultures de bactéries issues d'un parent unique : leur motilité est variée. Il en existe des lentes et des rapides. Si l'on clone une bactérie rapide, par exemple, ses descendants auront la même répartition en motilité qu'à l'expérience précédente. On en revient à Poincaré : un système, totalement déterminé peut être imprévisible dans son comportement.

■ **Terminal : Quelles sont vos relations avec R. Thom ?**

■ **A.D. :** Nous avons des relations très amicales, mais polémiques. Nous sommes d'accord sur de nombreux points, mais d'une certaine manière, il est, comme bien d'autres, un ultra-réductionniste. Thom aimerait réduire la vie, l'expliquer par quelques grands principes simples. Il a voulu plier le réel à son modèle, et non l'inverse. Or comme le réel ne parle pas, on peut toujours lui faire dire ce que l'on veut. Je crois, quant à moi, à la gratuité, la surprise, en l'émergence de formes nouvelles, que nous ne saurons jamais expliquer qu'a posteriori. Mais Thom est en train de changer. Si vous avez lu son dernier livre, il est devenu aristotélécien, alors qu'il était auparavant essentiellement platonicien. Il essaye de me convaincre qu'il est les deux à la fois, ce qui paraît un peu difficile. Il pense qu'il existe des structures attractives sur lesquelles on tombe toujours, un peu comme Platon dans Le Timée, avec les polyèdres réguliers, qui représentent chacun des éléments de la nature. Les catastrophes élémentaires devraient représenter ce sur quoi on tombe nécessairement, et on ne peut expliquer les phénomènes biologiques que comme cela. Je pense qu'en fait il s'est trompé de niveau, c'est à dire qu'il a travaillé uniquement au niveau macroscopique, en négligeant toutes les anomalies par rapport à ses intuitions, et souvent en faisant des contresens très profonds.

En un sens, j'ai trouvé esthétiquement fascinantes ses propositions pour la morphogénèse, et j'aurais aimé qu'il eût raison. Hélas, il n'en est rien : la morphogénèse est le résultat d'une combinatoire horriblement arithmétique, semble-t-il. C'est alors à l'échelle des molécules que la forme pourra peut-être révéler des aspects "catastrophiques". Thom n'a jamais voulu le considérer. Mais j'attends un nouveau livre (1).

1 Depuis la date de cette interview, R. Thom a fait paraître : "Apologie du logos", chez Hachette (1990) où il fait une "réponse à Antoine Danchin". Le dialogue se poursuit donc...