

BULLETIN N° 118
ACADÉMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 9 octobre 2007

Conférence du Pr Alain BOUTOT de l'Université de Bourgogne :
« Approches contemporaines de la morphogenèse »

Prochaine séance : le Mardi 13 novembre 2007

Assemblée générale /Elections
Conférence de Hugues CHATE Physicien au CEA:
« Le Chaos collectif»

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Michel GONDRAN

SECRETARE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN

TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :

SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI.

SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON

PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen René DARS

PRESIDENT DE LA SECTION DE NANCY : Pierre NABET

PRESIDENT FONDATEUR

DOCTEUR Lucien LEVY (†).

PRESIDENT D'HONNEUR

Gilbert BELAUBRE

SECRETARE GENERAL D'HONNEUR

Pr. P. LIACOPOULOS

Octobre 2007

N°118

TABLE DES MATIERES

P. 5 Compte-rendu de la séance du 9 octobre 2007

P. 8 Compte-rendu de la section Nice-Côte d'Azur du mois de juin 2007

P.13 Documents

Prochaine séance : Mardi 13 novembre 2007,

MSH, salle 215-18heures

Assemblée générale /Elections

Conférence de Hugues CHATE Physicien au CEA:

« Le Chaos collectif »

ASSEMBLEE GENERALE 2007
Convocation

L'assemblée générale ordinaire de l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (AEIS) se tiendra le :

Mardi 13 novembre 2007 à 18 heures,
Salle 215 de la Maison des Sciences de l'Homme,
54 Bd Raspail, Paris 6^{ème}

Vous êtes cordialement prié d'y prendre part. L'ordre du jour de l'assemblée générale est le suivant :

Rapports des Présidents de section
Rapport moral du Président
Rapport financier ; rapport des contrôleurs,
Votes sur les rapports.
Elections aux postes du Bureau.
Questions soumises à l'Assemblée Générale.

Les courriers relatifs à cette assemblée, en particulier les demandes d'inscriptions de questions à l'ordre du jour, et les actes de candidatures sont à adresser au Secrétaire général avant le 9 novembre 2007:

Irène HERPE-LITWIN 39, rue Michel Ange 75016 PARIS.

En cas d'empêchement, nous vous prions de transmettre le pouvoir ci-dessous à un membre de l'Académie, à votre choix. Je vous rappelle que tous les membres de l'Académie qui sont à jour de leurs cotisations sont habilités à voter

Bien à vous,

Irène HERPE-LITWIN

POUVOIR

(à remettre au chargé de pouvoir de votre choix)

Je soussigné(e)

membre de la section de :.....de l'AEIS

donne pouvoir à :

membre de la section dede l'AEIS

pour me représenter à l'assemblée générale de l'Académie, le 13 novembre 2007.

(lieu et date).....

Bon pour pouvoir
(signature)

DEMANDE D'INSCRIPTION DE QUESTIONS A L'ORDRE DU JOUR
DE L'A.G. du 13 novembre 2007

(à transmettre au Secrétaire général)

Question(s):

Nom,Prénom :.....date :.....Signature.....

.....
Section :.....

ACTE DE CANDIDATURE

(à transmettre au Secrétaire général)

Je soussigné(e)

membre de la section de l'AEIS de :

souhaite présenter ma candidature au poste de :.....

lors du renouvellement du bureau de l'AEIS du 13 novembre 2007

(lieu et date).....

(signature)

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
 Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 9 octobre 2007

Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 en la présence de nos collègues Bruno BLONDEL, Alain CARDON, Michel GONDRAN, Irène HERPE, Saadi LAHLOU, Jacques LEVY,

Etaient excusés : François BEGON, Gilbert BELAUBRE, Françoise DUTHEIL, Marie-Louise LABAT, Gérard LEVY, Victor MASTRANGELO, Emmanuel NUNEZ, Pierre SIMON, Alain STAHL

I) Informations Générales

Michel GONDRAN nous fait part du titre retenu pour le prochain congrès sur l'Emergence :
 « **Emergence, de la Fascination à la Compréhension** »

Le congrès qui doit avoir lieu en fin d'année 2008, pourrait se tenir éventuellement dans un amphithéâtre de la nouvelle faculté de Paris-Tolbiac avec l'avis favorable de Dominique LECOURT qui a consacré un grand travail aux problèmes d'épistémologie. D'autres alternatives seraient envisageables à la BNF notamment.

Michel GONDRAN nous présente également le conférencier Alain BOUTOT, qui est Professeur de Philosophie à la Faculté des Lettres de l'Université de Besançon. Il a travaillé d'une part sur Heidegger et d'autre part sur la Philosophie des Sciences et à publié un certain nombre d'ouvrages parmi lesquels :

L'Invention des formes, O. Jacob, 1993

Heidegger et Platon. Le problème du nihilisme, PUF, 1987

Heidegger, Que sais-je ?, PUF, 1995

Traductions de Heidegger,

De l'essence de la vérité, Gallimard, 2001

Concepts fondamentaux de la philosophie antique, Gallimard, 2003.

II) Conférence du Pr Alain BOUTOT: « Approches Contemporaines de la Morphogenèse »

L'exposé s'appuie sur deux théories, la « Théorie des Catastrophes » de René THOM et celle des « Structures dissipatives » d'Ilya PRIGOGINE.

René THOM, médaille Field 1958, a analysé la problématique de la morphogenèse dans un ouvrage paru en 1972 « Stabilité structurelle et Morphogenèse ». Selon lui *"la théorie des catastrophes consiste à dire qu'un phénomène discontinu peut émerger en quelque sorte spontanément à partir d'un milieu continu"*. L'émergence de ces discontinuités peut être déduite mathématiquement par une analyse topologique de la forme.

En effet, un des problèmes centraux posés à l'esprit humain est celui de la succession de formes, c'est-à-dire de structures dotées de stabilité. Celles-ci se déploient sur un substrat doté d'une structure géométrique et elles apparaissent en tant que discontinuités de celui-ci. Les formes ne seraient donc pas engendrées par des phénomènes physiques mais par des structures géométriques ou « logoï » qui en se dépliant généreraient la forme. Ces potentiels créateurs de formes ou de discontinuités ne seraient pas en nombre infini (il n'en existerait que 7 par exemple dans un espace à 4 dimensions).

Cette prévalence des structures mathématiques sur les phénomènes physiques rapprocheraient THOM de PLATON pour qui seules les lois de la géométrie imposeraient les formes. THOM reprocherait à la Science expérimentale de n'être que « descriptive et prédictive » mais sans fournir d'intelligibilité. On ne s'interroge pas assez sur les isomorphismes existant dans divers domaines de la Science

Dans sa « Théorie des Structures dissipatives » PRIGOGINE (Prix Nobel de Chimie 1977) définit un **système dissipatif** (ou *structure dissipative*) en tant que système ouvert qui opère loin de l'équilibre thermodynamique dans un environnement qui échange de l'énergie, de la matière ou de l'entropie. Un système dissipatif est caractérisé par l'apparition spontanée d'une brisure de symétrie spatiale (anisotropie) qui peut quelquefois résulter en une structure complexe chaotique.

PRIGOGINE modélise des phénomènes d'auto-organisation qui se manifestent dans des systèmes composés d'individus identiques. On observe l'apparition d'un ordre ou d'une morphologie dans un système initialement désordonné mais soumis à des contraintes particulières. Les structures ainsi formées sont stabilisées par échange de matière ou d'énergie avec l'extérieur.

Les structures dissipatives s'observent des Sciences physiques jusqu'aux Sciences sociales. Elles constituent une théorie thermodynamique de l'irréversibilité qui serait en contradiction avec le 2nd Principe de la Thermodynamique de CARNOT mais qui en fait réconcilie CARNOT et DARWIN.

En conclusion, Alain BOUTOT insiste sur l'intérêt épistémologique de ces théories. Elles restent en marge de la science normale ou techno-science qui vise la maîtrise des phénomènes. Elles cherchent à interpréter, à trouver des rationalités nouvelles. Elles se rattacheraient plus à ARISTOTE qu'à PLATON. Elles n'impliqueraient aucun « dessein intelligent », aucune finalité. L'auto-organisation de la matière s'expliquerait simplement par des contraintes physiques ou géométriques et l'organisation n'aurait rien de « miraculeux ».

Après cet exposé, la séance est levée à 20 heures.

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

Compte-Rendu de la Section Nice-Côte d'Azur

L'amour réel des hommes
réclame nécessairement
l'accroissement responsable de la
Science et le développement maîtrisé
des techniques.

Roger DAUTRAY– Mémoires (2007)

Compte-rendu de la séance du 21 juin 2007 (106ème séance)

Présents :

Sonia Chakhoff, Pierre Coulet, Patrice Crossa-Raynaud, René Dars, Jean-Paul Goux, Maurice Papo, Jacques Wolgensinger.

Excusés :

Jean Aubouin, René Blanchet, François Cuzin, Guy Darcourt, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazi, Jacques Lebraty.

1- Approbation du compte-rendu de la 105^{ème} séance.

Le compte-rendu est approuvé à l'unanimité des présents.

2- Le mois écoulé.

→ Nice capitale européenne de la culture.

Les chances pour que Nice soit choisie sont faibles car d'autres villes, Marseille notamment, disposent de moyens plus considérables. Cela n'empêche pas le comité d'organisation de poursuivre ses efforts car il en restera de toute manière des progrès pour la ville. Une association, dont le président est Jean Nouvel, a été créée dans le but de préparer un programme avec l'aide du comité de pilotage dont notre confrère Pierre Coulet fait partie et qui se réunit régulièrement.

Ce comité de pilotage gère les moyens qui ont été réunis pour ce projet. Il est placé sous la direction de M. Faivre d'Arcier (ancien directeur du festival d'Avignon). Il a commencé une campagne de communication. Les axes actuels sont : la lumière, le baroque, le rivage, le vivant et l'artificiel.

Ce comité est très diversement composé de manière à susciter le maximum d'idées différentes.

La candidature de Nice pourrait surprendre par son originalité même, alors que Toulouse est orientée vers des choses plutôt connues (aérospatiale, etc.)

Pour passer ce cap du premier filtre qui est en décembre, il faut que le 15 novembre soient présentés deux dossiers :

- le premier pour la Communauté européenne, fort complexe,
- le second, plus stratégique, comportant la nécessité de faire une exposition itinérante à peu de frais, circulant dans les diverses capitales européennes avec les autres candidats. C'est évidemment M. Faivre d'Arcier qui décidera ce qui doit être présenté car il y aura à résoudre le problème du transport.

Ex. la ola traduit d'une manière très visible le train d'onde d'un battement de cœur.

Si Nice fait partie des quelques villes qui seront sélectionnées en 2008, on poursuivra. Mais certains s'engagent à continuer même si Nice n'est pas sélectionnée.

C'est ainsi que, quel que soit le résultat de sa candidature, la Ville de Nice a décidé d'affecter un bâtiment de 800 m² de l'ancienne Ecole normale aux archives municipales qui sont actuellement dispersées.

3- Cycle de conférences : La Méditerranée, berceau de la Science.

Prévu pour la fin 2007-2008.

Pierre Coulet, chargé de l'organiser, résume son idée pour laquelle il nous présentera un projet écrit en définissant les sujets de conférences.

Il nous précise ses idées.

Pierre Coulet : ce cycle devrait permettre d'entrer dans ces questions délicates :

- les rapports de la Science et de la technique
- ceux de la Science et des mathématiques

Le cycle de conférences tourne autour d'une question fondamentale : qu'est-ce que la Science ?

Une grande école de pensée (Cambridge, Chicago, ...) date, à la fois dans le temps et le lieu, l'émergence de la Science au 6^{ème} siècle avant Jésus-Christ dans la ville de Millet.

En revanche, si l'on choisit une définition bien plus large, on peut la faire remonter beaucoup plus loin (-3000 ans), notamment en Chine ou en Egypte.

Il n'est pas inutile de débattre de la Science, en particulier pour les politiques et de sa distinction avec la technique. Déplacer un objet lourd à l'aide de troncs d'arbre est probablement issu d'une observation

empirique. Il en est ainsi pour certains animaux qui sont capables d'inventer des petits appareils pour récupérer de la nourriture et de l'enseigner à leur progéniture. C'est un savoir-faire technique.

Il y a évidemment une relation entre Science et technique. Il faut donc d'abord définir ce qu'est la Science.

La Science telle qu'elle apparaît au 6^{ème} siècle, c'est la démythification des phénomènes naturels. C'est le désir de remplacer les explications mythologiques portant sur des phénomènes exceptionnels comme les tremblements de terre, la foudre, etc. attribués à l'intervention des dieux. Si on accepte cette proposition, la Science comme la philosophie et la démocratie, commencent à ce moment-là.

Evidemment, les explications qu'ils ont trouvées pour ces phénomènes ne sont pas nécessairement correctes. Ainsi, pour les tremblements de terre, ils pensent que la terre, plate, flotte sur l'océan primordial. Quand celui-ci s'agite, la terre qui est dessus craque comme un bateau sur une mer agitée.

C'est remplacer une explication mythologique par une autre, matérielle, mais qui ne dit pas pourquoi l'océan s'agite. Mais c'est le cas actuellement pour bien des phénomènes. On ne sait toujours pas pourquoi, par exemple, une pierre tombe à terre.

La Science, souvent, remplace une explication par une autre. Souvent elle va dans le réductionnisme. Pour les philosophes du 6^{ème} siècle, la Science est une bonne idée, au même titre que la démocratie.

Ces mêmes idées ont pu être imaginées ailleurs par des individus isolés mais il y a eu alors l'apparition d'une masse critique, une école (Thales, Anaximène, Anaximandre, etc.). Il s'est formé un noyau de nucléation qui a crû et avancé dans le temps.

Cette belle idée sera bloquée par Rome et le christianisme mais l'héritage grec est repris par les Perses puis les Arabes (Bagdad, Bassora, Cordoue) qui ne se sont pas contentés de traduire les textes grecs mais les ont enrichis, notamment en mathématique, astronomie, optique. Ces notions ont continué à évoluer même au Moyen Age.

La Science cela pourrait donc être la démythification des lois de la nature.

Quelle est la première loi de la nature observée et décrite par un physicien ?

Pour moi, la plus ancienne des sciences, c'est celle de la lumière. Elle est étroitement liée à la géométrie. C'est la fameuse loi de Descartes qui en fait a été découverte par Euclide ! C'est celle de la symétrie miroir qui veut que lorsque j'observe un cygne qui boit, j'en vois un autre exactement semblable, à l'envers, et qui n'est ni étiré ni déformé. C'est Euclide qui a ainsi donné cette première loi de la physique dans un traité sur l'optique.

Si on ne revient pas à cette première loi, on continuera d'enseigner l'optique comme on le fait depuis deux à trois siècles. L'important c'est de comprendre ce qu'est un rayon visuel.

Un ami philosophe m'a demandé un jour pourquoi, dans un miroir, on se voit inversé de gauche à droite, mais pas inversée verticalement. Nous sommes loin de l'époque où Voltaire vulgarisait les « Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle » de Newton !

Aujourd'hui, on enseigne l'optique à des enfants de 4^{ème} et 5^{ème} en leur faisant faire des manipulations avec un miroir et un faisceau laser. Euclide n'avait rien de cela. Comment a-t-il découvert la « loi de Descartes » ?

L'enseignement est toujours le même. On répète ce que les aînés ont dit, en ajoutant de petites choses. On fait dire à Newton des choses qu'il n'a jamais dites. Descartes n'était pas l'opticien de génie que l'on veut nous faire croire, mais un grand philosophe et un très grand mathématicien. Les grands opticiens furent Alhazem, Kepler et bien d'autres qui ne figurent pas dans nos manuels d'optiques.

A l'époque d'Euclide, l'idée de cette loi était celle de modèles mathématiques, la géométrie. Les ombres de deux tiges plantées dans le sol l'une à côté de l'autre, ce sont deux droites parallèles.

La notion de droite n'est pas celle d'un rayon lumineux qui ne sera comprise qu'au onzième siècle par Alhazem, mais celle d'un rayon visuel : mon regard est tombé dessus. Pour Euclide, il existe une ligne droite entre mon œil et l'objet que je regarde. C'est évidemment faux puisque, par exemple, la Corse est vue parfois de Nice, alors qu'il n'y a pas de ligne droite entre les deux. Mais c'est un bon postulat pour commencer.

J'ai proposé à des enfants de refaire l'expérience d'Euclide. De part et d'autre d'un petit miroir, je place deux enfants de taille très différentes et leur demande de reculer jusqu'à ce que chacun voie les yeux de l'autre dans le miroir. On mesure alors la taille des deux et leur distance au miroir et on illustre ainsi le fameux théorème de Thalès qui montre que le rayon lumineux, venant de l'œil d'un des enfants, repart vers l'autre avec le même angle. C'est la première loi géométrique de la nature qui peut ainsi être découverte par tout le monde.

En revanche l'étude du mouvement viendra bien plus tard (Newton) parce qu'elle nécessite l'utilisation du calcul différentiel.

Une autre idée qui m'intéresse beaucoup est celle des relations avec les mathématiques. La Science utilise les mathématiques comme modèle mais, en même temps, les mathématiques viennent de l'observation des phénomènes naturels. Il y a deux écoles en mathématiques. Il y a l'école Platonicienne, qui soutient que les mathématiques préexistent dans le cerveau (les cercles, les droites) et une autre Aristotélicienne qui pense le contraire. Pour celle-ci, la théorie des probabilités ne préexiste pas, pas plus que la ligne droite n'existe vraiment dans la nature mais peut être conceptualisée. On comprend alors que les mathématiques puissent expliquer le réel puisqu'elles en viennent. Il est vrai qu'elles apparaissent au départ comme une technique. Bien avant Thalès, elles étaient utilisées pour faire des dénombrements, délimiter des parcelles. Mais à un moment donné, elles se développent comme une science indépendante de la nature.

Quel est donc le statut des mathématiques ? Elles ont permis de conceptualiser des choses qui avaient été d'abord comprises grâce à l'observation. La révolution du 17^{ème} siècle de l'étude du mouvement, celui des planètes, est plus celle de la technique mathématique que celle des idées. L'évolution des mathématiques a permis de calculer un maximum et un minimum. On connaît aujourd'hui une révolution comparable avec les calculs sur ordinateurs.

Il faut donc essayer de préciser les relations entre les techniques et la Science à partir de l'exemple des Grecs qui ne connaissaient que la géométrie.

Les premières régularités que les hommes ont pu observer sont naturelles, par exemple la symétrie miroir du cygne. Il y en a bien d'autres, jusqu'aux mouvements des astres. Il y a aussi des symétries cachées que

Documents

Pour compléter la conférence du Pr. Alain BOUTOT nous vous proposons , issus d'Encyclopædia Universalis quelques réflexions de celui-ci sur la Philosophie des Sciences :

P. 14 : « La Critique philosophique de la Science » par Alain BOUTOT

Pour introduire la conférence d'Hugues CHATE nous vous proposons un article de lui extrait du HORS-SERIE de la revue Sciences et Avenir de juillet-août 2005 consacré à la théorie des systèmes dynamiques alliée à la physique statistique permettant la mise en évidence dans une collection d'objets chaotiques de l'émergence de comportements collectifs nouveaux.

P. 25 : « Le Chaos collectif » par Hugues CHATE

La critique philosophique de la science

Par Alain BOUTOT Professeur de Philosophie des Sciences à l' Université de Besançon

Extrait d'Encyclopædia Universalis

La théorie philosophique de la science, et singulièrement le néo-positivisme, récuse ce qui n'est pas pensable scientifiquement. La pensée scientifique constitue la seule pensée digne de ce nom, c'est-à-dire la seule pensée sensée. Cette thèse ne va nullement de soi, et paraît même marquée du sceau du dogmatisme que le positivisme prétend pourtant avoir surmonté. On peut très bien considérer, à l'inverse, suivant un schéma kantien, que la science ne se prononce pas et ne peut pas se prononcer sur les questions les plus essentielles, sur celles qui concernent ou devraient concerner l'homme au plus haut point. Elle ne connaît que le monde phénoménal et ignore tout de l'en-soi des choses. Cette critique, qui n'équivaut pas, bien évidemment, à une condamnation pure et simple, est également aussi ancienne que la philosophie elle-même. Platon comparait déjà, dans *La République*, la connaissance mathématique à un rêve : « En général, les arts ne s'occupent que des opinions et des goûts des hommes, et ils ne se sont développés qu'en vue de la production et de la fabrication, ou de l'entretien des produits naturels ou artificiels. Quant aux autres, qui, comme nous l'avons dit, saisissent quelque chose de l'essence, c'est-à-dire la géométrie et les arts qui s'y rattachent, nous voyons que leur connaissance de l'être ressemble à un rêve, qu'ils sont impuissants à le voir en pleine lumière, tant qu'ils s'en tiendront à des hypothèses, auxquelles ils ne touchent pas, faute de pouvoir en rendre raison. » À l'époque moderne, cette critique a pris un tour nouveau et s'est radicalisée, en raison de la prétention hégémonique de la science. Pour la philosophie, la science ne peut fournir qu'une représentation partielle et même partielle des choses. Elle laisse dans l'ombre la question de la valeur (Windelband), contredit le mouvement même de la vie (Nietzsche et Bergson), ignore ce qui la fonde (Husserl) ou encore occulte la vérité de l'être (Heidegger).

Science et axiologie

La science décrit ce qui est, mais ne s'interroge pas sur ce qui doit être. C'est ce que relève le néo-kantien Wilhelm Windelband, qui établit une distinction fondamentale entre deux types de propositions : les jugements de fait (*Urteilen*), d'une part, et les jugements de valeur (*Beurteilungen*), d'autre part. Les premiers expriment la coappartenance de deux représentations objectives, les seconds le rapport du sujet à l'objet représenté. « Cette chose est blanche » est un jugement de fait, « cette chose est bonne » un jugement de valeur. Cette distinction permet de délimiter le champ de la philosophie par rapport à celui des autres sciences. Les sciences positives ont pour objet les jugements de fait, la philosophie les jugements de valeur. Mais ici une précision s'impose, car les jugements de valeur eux-mêmes peuvent être envisagés d'un point de vue « scientifique ». Ils ne sont rien d'autre, en effet, qu'une prise de position d'un sujet à l'égard d'un objet, et constituent des événements mentaux comme les autres. On peut les décrire et les expliquer en utilisant les lois de la nature : c'est ce que tente la psychologie. Du point de vue de celle-ci, tous les jugements de valeur, toutes les appréciations se valent : le fait de tenir une même proposition pour vraie ou pour fausse demeure indifférent. Windelband souligne ici la spécificité de la démarche philosophique par rapport à la démarche scientifique. La philosophie ne cherche pas à découvrir l'origine de nos jugements de valeurs, mais sonde leur validité. Elle soulève, au contraire de la science, non des questions de fait, mais des questions de droit. Sa méthode n'est pas génétique, mais critique, ou encore téléologique. Le critère de la validité d'un jugement de valeur réside dans la conscience normale (*normale Bewusstsein*), qui correspond au sujet transcendantal, à la « conscience en

général » de Kant. En tant que science de la conscience normale, la philosophie constitue la « science critique des valeurs universelles ». Elle n'a pas à créer des valeurs nouvelles, mais à mettre à l'épreuve le « matériau factuel de la pensée, du vouloir et du sentir du point de vue de la validité universelle et nécessaire ». Sa tâche consiste à « dégager du chaos des valeurs individuelles, ou ne présentant qu'une universalité de fait, celles qui possèdent la nécessité propre à la conscience normale » (« Qu'est-ce que la philosophie ? »).

Windelband ne se contente pas d'opposer les sciences positives à la philosophie, mais place les premières sous la dépendance de la seconde : les sciences présupposent la reconnaissance d'une certaine valeur, en l'occurrence la valeur de la vérité. Avant d'être contraint par les faits, le savant est conduit par un certain sentiment, celui du devoir (*sollen*). « Ce qui guide mon jugement, explique Rickert, et par là ma connaissance, est le sentiment que je dois juger ainsi et pas autrement. » Un jugement est vrai non parce qu'il se conforme à une réalité préexistante, mais parce qu'il se conforme au devoir. « Ce n'est que du devoir, et non de l'être, que je peux dériver la vérité du jugement. »

Science et philosophie de la vie

Dans le *Gai Savoir*, Nietzsche entreprend de dissiper une illusion entretenue par les positivistes et les rationalistes de tous bords. Nous pensons d'ordinaire que les progrès de la science ont repoussé les frontières de la foi, qu'en devenant plus savants nous sommes devenus moins croyants. Mais cette victoire du savoir sur la foi, de l'esprit positif sur l'esprit théologique, comme dirait Comte, est bien fragile. Ce n'est même pas une victoire du tout, car la foi n'a reculé devant la science que pour mieux la prendre à revers. « C'est sur une foi métaphysique que repose notre foi dans la science ; chercheurs de la connaissance, impies, ennemis de la métaphysique, nous empruntons encore nous-mêmes notre feu au brasier qui fut allumé par une croyance millénaire, cette foi chrétienne, qui fut aussi celle de Platon, pour qui le vrai s'identifie à Dieu et toute vérité divine. » La science repose tout entière sur une croyance : celle de la valeur de la vérité. Cette foi ou cette croyance, loin de renvoyer à une quelconque « conscience morale intellectuelle », à un « sujet éthique », sont portées, en réalité, selon Nietzsche, par une volonté réactive, et pour tout dire nihiliste. « La volonté de vérité à tout prix, cela pourrait bien être une volonté cachée de mort. » La science est, de ce point de vue, une instance hostile à la vie face à laquelle l'art est appelé à jouer un rôle salvateur : « Nous avons l'art pour ne pas périr de la vérité. »

Pour Bergson aussi la science fige le devenir et manque le mouvement même de la vie. La science spatialise son objet et méconnaît nécessairement la durée, qui est « création continue d'imprévisible nouveauté ». Elle est mécanique, et « l'essence des explications mécaniques est [...] de considérer l'avenir et le passé comme calculables en fonction du présent, et de prétendre ainsi que tout est donné » : l'évolution, future et passée, d'un système est contenue dans son état présent. C'est le point de vue du déterminisme, que Laplace exprimait en ces termes : « Nous devons [...] envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. » Pour la science, rien n'est à venir, et le temps ne joue aucun rôle. Il n'est qu'un paramètre extérieur, sans efficacité véritable, et, comme le dit Bergson, « du moment qu'il ne fait rien, il n'est rien ». La science implique « une métaphysique où la totalité du réel est posée en bloc, dans l'éternité, et où la durée apparente des choses exprime seulement l'infirmité d'un esprit qui ne peut pas tout connaître à la fois » (*L'Évolution créatrice*).

(Hulton Getty)

Bergson ne rejette pas pour autant la science dans la non-vérité, bien au contraire. « Science et philosophie, écrit-il, sont des disciplines différentes mais faites pour se compléter. » Leurs objets et leurs méthodes sont distincts : si la science a affaire à la matière, et donc à l'espace, la métaphysique traite de l'esprit, et donc de la durée. « Nous assignons à la métaphysique un objet limité, principalement l'esprit, et une méthode spéciale, avant tout l'intuition. Par là, ajoute Bergson, nous distinguons nettement la métaphysique de la science. Mais par là aussi nous leur attribuons une égale valeur. Nous croyons qu'elles peuvent, l'une et l'autre, toucher le fond de la réalité. Nous rejetons les thèses soutenues par les philosophes, acceptées par les savants, sur la relativité de la connaissance et l'impossibilité d'atteindre l'absolu » (*La Pensée et le mouvant*). Bergson s'inscrit en faux ici contre le kantisme et le positivisme. D'après le positivisme, nous ne connaissons pas le réel tel qu'il est en soi, mais seulement le réel tel qu'il nous apparaît. Rejetant ce relativisme, Bergson soutient que la science atteint l'absolu. Le domaine primitif de la science est la matière inerte, et son instrument essentiel est l'intelligence. Or l'intelligence est faite pour la matière, si bien que ses articulations recourent exactement les structures de la matière. « Nous ne voyons donc pas pourquoi, affirme Bergson, la science n'atteindrait pas un absolu. »

De ce point de vue, la métaphysique et la science non seulement sont complémentaires, mais peuvent se rejoindre. « Comme l'esprit et la matière se touchent, métaphysique et science vont pouvoir, tout au long de leur surface commune, s'éprouver l'une l'autre, en attendant que le contact devienne fécondation. » La métaphysique peut ainsi exercer, « par sa partie périphérique, une influence salutaire sur la science ». Bergson considère en particulier que ses thèses sur la conscience et sur l'évolution ont contribué à faire progresser un certain nombre de disciplines scientifiques, comme la psychologie, la neurologie, la pathologie, la biologie. Celles-ci « se sont, dit-il, de plus en plus ouvertes à nos vues, d'abord jugées paradoxales ». Inversement, la science pourra avoir une incidence positive sur la métaphysique. Elle lui communiquera « des habitudes de précision » qui se propageront de la périphérie jusqu'au centre, et qui lui ont, jusqu'à présent, si cruellement fait défaut. La métaphysique deviendra donc aussi certaine et aussi précise que la science, et sera fondée, comme elle, sur l'expérience.

Science et phénoménologie

Husserl est beaucoup moins optimiste. La science moderne traverse aujourd'hui, selon lui, une « crise », qui n'est pas tant théorique que morale. Après avoir été synonyme de progrès, elle suscite de plus en plus souvent la défiance, voire l'hostilité. « Dans la détresse de notre vie [...], cette science n'a rien à nous dire. Les questions qu'elle exclut par principe sont précisément les plus brûlantes à une époque malheureuse pour une humanité abandonnée aux bouleversements du destin : ce sont les questions qui portent sur le sens ou sur l'absence de sens de toute existence humaine » (*La Crise des sciences européennes...*). La science mathématique de la nature, apparue avec Galilée, a promu le monde mathématique au rang de seule et unique réalité. Elle a occulté ce faisant le monde préscientifique, le monde de la vie, sur lequel elle repose pourtant. « C'est dans [la] vie, souligne Husserl, que se bâtit le sens et la validité d'être du monde. Quant au monde de la science, il est une formation de degré supérieur, qui a pour fondement l'expérience et la pensée préscientifiques avec leurs opérations de validité. » La science, en d'autres termes, occulte la problématique de la constitution du monde. Elle étudie les choses telles qu'elles sont, telles qu'elles apparaissent, mais ne se demande pas ce qui rend possible l'apparition des choses elles-mêmes. Pour surmonter cette crise, il convient de retrouver le sol sur lequel elle s'édifie. « Seule une question en retour radicale sur la subjectivité, j'entends sur la subjectivité qui rend possible de façon ultime toute validité du monde avec son contenu, et ce dans toutes les modalités préscientifiques et scientifiques [...], peut rendre compréhensible la vérité objective et atteindre l'ultime sens d'être du monde. »

Cette tâche incombe à la philosophie, et notamment à la phénoménologie transcendantale, que Husserl conçoit du reste comme une science, et plus précisément comme une science rigoureuse. Cette science est non pas empirique, mais eidétique, elle porte non pas sur un fait, ni sur un ensemble de faits, mais sur une essence. « L'intuition philosophique bien comprise, c'est-à-dire l'appréhension phénoménologique des essences, ouvre un champ illimité de travail, et donne le jour à une science qui, sans la moindre méthode recourant aux mathématiques et à la symbolisation directe, sans l'appareil déductif et démonstratif, parvient à une profusion de connaissances absolument rigoureuses et décisives pour toute philosophie à venir » (*La Philosophie comme science rigoureuse*). Cette philosophie scientifique étudie l'essence de la région qui conditionne et supporte toutes les autres, la région conscience. Elle met en œuvre une méthode originale : la « réduction phénoménologique », qui permet de remonter de l'objet constitué au principe qui le constitue, c'est-à-dire à la conscience pure elle-même. Dans l'attitude naturelle, le monde est là, les choses corporelles sont là avec leur distribution spatiale particulière. Elles sont « présentes », que nous leur prêtions ou non attention. Sont également présentes les sciences avec leur propositions sur la réalité. Cette attitude naturelle est dogmatique ou thétique : le monde est considéré comme existant, et moi avec dans ce monde. La réduction phénoménologique met entre parenthèses cette thèse du monde, la suspend. Cette suspension, ou, comme dit Husserl, cette *epochè*, n'est pas une antithèse, un passage de la position à la négation, c'est une mise hors circuit. La thèse du monde reste là, mais simplement nous n'en faisons aucun usage. Au lieu de vivre en elle, d'y prendre part, nous prenons du recul par rapport à elle. Nous réfléchissons sur elle afin d'en découvrir la structure. La mise entre parenthèses du monde objectif ne nous place pas en effet devant un pur néant, mais nous découvre un domaine originel, qui est celui de la conscience pure elle-même. Dans la réduction, l'homme se découvre comme conscience transcendantale, c'est-à-dire comme celui qui donne un sens aux choses.

Cette réduction constitue le prélude à une reconstruction du monde et à une refondation des sciences. Après la réduction, « nous n'avons proprement rien perdu, mais nous avons gagné la totalité de l'être absolu, lequel, si on l'entend correctement, recèle en soi toutes les transcendances du monde, les "constitue" en son sein ». Husserl distingue, en tout vécu concret, deux éléments : la composante sensuelle (les *datas* sensibles), qu'il appelle la matière ou la hylè, et la composante intentionnelle proprement dite, qu'il appelle la noèse. La noèse anime la matière sensuelle pour donner naissance au noème, le corrélat intentionnel de nature idéale. Le problème de la constitution est en définitive celui de savoir comment « les noèses [...], en animant la matière et en se combinant en systèmes continus et en synthèses unificatrices du divers, instituent la conscience de quelque chose ». Après l'analyse des structures noético-noématiques, Husserl entreprend de déduire les différentes couches de l'objectivité : la nature matérielle, la nature vivante et enfin l'esprit.

Science et ontologie

Radicalisant la critique husserlienne, Heidegger affirme, dans un cours donné en 1952 à l'université de Fribourg-en-Brisgau : « la science ne pense pas, et ne peut pas penser ; et c'est même là, ajoute-t-il, sa chance, je veux dire ce qui lui assure sa démarche propre et bien définie » (*Qu'appelle-t-on penser ?*). Revenant quelque temps après sur cette proposition, si choquante à première vue, le philosophe précise : « Cette phrase : la science ne pense pas, qui a fait tant de bruit lorsque je l'ai prononcée dans le cadre d'une conférence à Fribourg, signifie : la science ne se meut pas dans la dimension de la philosophie. » En affirmant « la science ne pense pas », Heidegger veut donc d'abord souligner la distance, et même l'abîme existant entre la science et la philosophie. Il y a entre l'une et l'autre un gouffre qui est aujourd'hui devenu si visible et si profond qu'il semble impossible de les faire dialoguer et encore moins se rejoindre. « Il n'y a pas ici de pont, dit le philosophe, il n'y a que le saut. C'est pourquoi toutes

les passerelles de fortune, tous les ponts aux ânes qui, aujourd'hui précisément, voudraient permettre un courant d'échange commode entre la pensée et la science sont entièrement mauvais. » La science n'est pas la philosophie, la philosophie n'est pas la science, il y a de l'une à l'autre une solution de continuité. Pour préciser la nature de cette opposition, Heidegger prend un exemple, celui de la physique. « La physique se meut dans l'espace et le temps et le mouvement. La science en tant que science ne peut décider de ce qu'est le mouvement, l'espace, le temps. La science ne pense donc pas, elle ne peut même pas penser dans ce sens avec ses méthodes. » L'espace, le temps et le mouvement ne sont pas, pour la physique, des notions quelconques, mais font partie de celles qui constituent son domaine d'objectivité. Elles délimitent la région qu'elle étudie, son champ d'investigation, c'est-à-dire la nature matérielle en général. Le physicien les invoque sans cesse, mais ne soulève jamais à leur propos la question philosophique par excellence, la question de leur essence. Il parle de l'espace, assigne à chaque particule matérielle une position dans l'espace, éventuellement une probabilité de présence dans l'espace, étudie les déplacements des corps dans l'espace, mais ne se demande jamais ce qu'est l'espace en lui-même. De la même manière, il parle du temps, attribue à chaque événement une date, une position dans le temps, mesure le temps mis par un corps pour aller d'un point à un autre, mais ne s'enquiert jamais de l'essence du temps lui-même, de la temporalité comme telle. De même, il étudie des trajectoires, analyse des mouvements, calcule des vitesses et des quantités de mouvements, mais ne s'interroge jamais sur la mobilité. La question « qu'est-ce que ? » n'est pas une question physique. Le physicien veut-il d'ailleurs s'aventurer sur ce terrain qu'il perd rapidement pied, et ne peut, bien souvent, énoncer que de vagues généralités. « Ainsi, dit Heidegger, tandis que les interrogations et les recherches concernant son objet - l'étant physique - gardent leur détermination et leur sûreté propres, le physicien, dans ses réflexions sur l'espace, le temps et le mouvement, rencontre l'incertitude, ses méthodes sur ce point ne lui sont plus d'aucun secours. »

Ne pouvant définir pour cette raison les notions fondamentales qu'il présuppose sans cesse, le physicien est dans le fond incapable d'explicitier la nature de son propre domaine de recherche. Cette situation n'est pas spécifique de la physique, mais se retrouve dans toutes les sciences. Chacune se déploie dans un domaine particulier, délimité par un certain nombre de concepts fondamentaux, mais aucune ne peut déterminer, avec les outils qui sont les siens, l'essence de ce domaine. « La science historique étudie [...] une époque de long en large, sous tous les aspects possibles [mais] ne recherche jamais ce qu'est l'histoire. C'est là ce qu'elle ne peut aucunement rechercher scientifiquement. Personne ne trouvera jamais sur le chemin de l'histoire ce que c'est que l'histoire, pas plus qu'un mathématicien sur le chemin mathématique, c'est-à-dire par sa science, c'est-à-dire enfin dans les formules mathématiques, ne pourra jamais montrer ce que la mathématique *est*. L'essence de leur domaine - l'histoire, l'art, la poésie, la langue, la nature, l'homme, Dieu - demeure inaccessible aux sciences. » N'ayant pas accès à l'essence de leur domaine, les sciences ne peuvent se connaître elles-mêmes. « La physique en tant que physique ne peut rien dire au sujet de la physique. Tout ce que dit la physique parle le langage de la physique. La physique elle-même n'est pas l'objet d'une expérience physique. Il en est de même de la philologie. En tant que théorie de la langue et de la littérature, elle n'est jamais l'objet possible d'une considération philologique. On peut en dire autant de chaque science. » L'essence de la physique ne se découvre pas au moyen d'un accélérateur de particules, pas plus que l'essence de la biologie ne se révèle au microscope. D'une façon générale, les sciences sont dans l'incapacité de se penser elles-mêmes, de dire ce qu'elles sont, et même ce qu'elles font. Il arrive, certes, aux scientifiques de s'exprimer sur leurs disciplines, mais ils sont alors contraints d'abandonner les concepts et les méthodes qu'ils mettent en œuvre dans leurs laboratoires. « Ce qu'est la physique, je ne peux, dit Heidegger, le penser qu'à la manière d'une interrogation philosophique. »

Bien que la science soit, et cela nécessairement, séparée de la philosophie, elle est cependant toujours déjà en rapport avec elle. « Sans le savoir, dit le philosophe, elle se rattache à [la] dimension [de la philosophie] », au point que « toute science est dans son fond, et de manière latente philosophie ». Pour le comprendre, considérons à nouveau la manière dont la physique moderne s'est constituée au

XVII^e siècle, avec Galilée. On dit souvent que la science moderne se distinguerait de la science antique et médiévale par le recours à l'induction. Elle se fonderait sur les faits et procéderait de manière inductive et expérimentale, alors que la science médiévale aurait été purement spéculative et n'aurait cherché qu'à « deviner, en empruntant des voies incontrôlées, les qualités secrètes des choses ». Cette interprétation comporte sans doute une part de vérité, mais elle n'atteint pas pour autant l'essentiel. Elle oublie en effet que les Anciens observaient déjà et que les Modernes raisonnent et spéculent encore. La caractéristique principale de la science moderne n'est pas à chercher dans la place accordée à l'expérimentation et à la mesure, mais dans ce que Heidegger appelle le projet mathématique de la nature. Ce projet n'est pas en tant que tel une mathématisation de la nature, mais ce qui rend possible et même nécessaire l'utilisation des mathématiques en physique. Il consiste à ne retenir, au sein de la réalité physique, que les déterminations quantitatives, et donc mathématisables des corps, à l'exclusion de toutes les autres, et notamment des qualités dites sensibles. Ce projet, inconnu des Anciens, est l'œuvre de Galilée et de Kepler. Ces derniers ont transformé la représentation de la nature qui apparaît désormais comme un système de changements de lieu de corps matériels dans le temps. En dépit des révolutions relativiste et quantique, ce projet est demeuré principiellement le même jusqu'à aujourd'hui. Cependant ce projet, et c'est là l'essentiel, est en lui-même d'ordre non pas scientifique, mais philosophique ou métaphysique, dans la mesure où il concerne l'être ou l'essence, en l'occurrence l'essence de la réalité physique. Il détermine de manière anticipative ce qu'est la nature et comment celle-ci peut être comprise et interrogée par le physicien. On peut faire une analyse semblable pour les autres sciences. Chacune se déploie dans un domaine spécifique dont la détermination d'être renvoie à une décision philosophique, qui demeure la plupart du temps implicite. « Toute science de l'étant abrite nécessairement une ontologie latente, plus ou moins élaborée, qui la porte et qui la fonde. » De ce point de vue, la science procède nécessairement de la philosophie, même si elle a depuis longtemps oublié et renié cette origine. Cet oubli de la philosophie, loin d'être négatif ou un défaut, constitue un avantage pour la science. Il signifie que les scientifiques n'ont pas besoin de s'assurer au préalable de leur objet ni de leurs méthodes.

Heidegger ne fait pas œuvre ici d'épistémologue, mais veut montrer qu'il y a, dans la science elle-même, ou plutôt dans l'arrière-fond de celle-ci, quelque chose, qui n'est certes pas saisi par elle, mais dont elle ne peut faire l'économie car elle le présuppose constamment, et qui n'est autre que l'être lui-même. L'objet de la science, la nature pour la physique, ne se laisse pas enfermer entièrement dans le cadre tracé par elle. Parce qu'elle est tributaire d'un projet, qui, en tant que tel, est toujours fini, la physique mathématique ne saurait épuiser la nature. « La représentation scientifique ne peut jamais encercler l'être de la nature, parce que l'objectivité de la nature n'est, dès le début, qu'une manière dont la nature se met en évidence. Ainsi pour la science de la physique, la nature demeure-t-elle l'incontournable (*das Unumgängliche*) » (« Science et méditation »). La nature est ce dont la physique ne peut faire le tour, c'est-à-dire cerner dans sa plénitude d'être. Les lois de la physique laissent un résidu, un incalculable, comme l'avait bien vu Goethe dans son conflit malheureux avec la physique newtonienne. Cet incalculable, qui est en réalité l'essentiel de la nature elle-même, « régit entièrement » la science, puisque celle-ci le présuppose nécessairement, mais lui demeure fondamentalement inaccessible. Heidegger montre par là à la fois les limites de la pensée scientifique et la nécessité d'adopter une autre attitude, de déployer une autre manière de penser, ce qu'il appelle la pensée méditative, pour approcher cet indépassable qui se dérobe au regard de la pensée calculante et qui, bien qu'ininterrogé, est le plus digne de question. Heidegger rappelle en somme aux sciences qu'elles procèdent de la philosophie, qu'elles en viennent et s'en échappent, mais qu'elles ne sauraient pour autant se substituer à elle ni combler le vide laissé par l'éclatement de la philosophie en une multitude de disciplines scientifiques (psychologie, sociologie, anthropologie, logique, cybernétique, etc.). Il rappelle également à la philosophie qu'elle n'a, pour sa part, rien à gagner à se laisser prendre aux mirages de la scientificité, qui ne peuvent que l'éloigner de ce qui lui est naturellement dévolu, et qu'elle a, depuis longtemps, laissé impensé, c'est-à-dire la vérité de l'être elle-même.

Vers un rapprochement de la science et la philosophie : le cas des théories morphologiques

Par Alain BOUTOT
Encyclopaedia Universalis

Pour la science, entendons la science positive, la philosophie est non scientifique et, dans le fond, délirante. Elle ne soumet pas ses propositions au contrôle de l'expérience et se montre incapable de justifier ce qu'elle avance. Pour la philosophie, la science ne pense pas. Elle constitue un point de vue non certes erroné, mais limité sur le réel. Elle est sans doute exacte, mais n'est pas pour autant vraie. Plusieurs voix se sont élevées pour regretter cette incompréhension mutuelle, y compris chez les tenants de la méthode expérimentale. Ainsi Claude Bernard considère que la science et la philosophie « doivent être unies » et que « leur séparation ne pourrait être que nuisible aux progrès des connaissances humaines. La philosophie, tendant sans cesse à s'élever, fait remonter la science vers la cause ou vers la source des choses. Elle lui montre qu'en dehors d'elle il y a des questions qui tourmentent l'humanité, et qu'elle n'a pas encore résolues. Cette union solide de la science et de la philosophie est utile aux deux, elle élève l'une et contient l'autre. Mais, si le lien qui unit la philosophie à la science vient à se briser, la philosophie, privée de l'appui ou du contrepoids de la science, monte à perte de vue et s'égare dans les nuages, tandis que la science, restée sans direction et sans aspiration élevée, tombe, s'arrête et vogue à l'aventure » (*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*). En fait, l'éloignement de la science et de la philosophie n'est peut-être pas aussi irrémédiable qu'on pourrait le croire. La science contemporaine ne constitue pas un ensemble aussi homogène que nous l'avons dit jusqu'à présent. Un certain nombre d'orientations nouvelles s'y font jour qui tendent à remettre en cause les postulats et les objectifs fondamentaux de la technoscience. Nous ne visons pas par là une théorie particulière, mais bien plutôt un ensemble de recherches menées de façon indépendante depuis plusieurs années par des mathématiciens et des physiciens théoriciens, et qui ont pour caractéristique commune de s'intéresser à la morphogenèse, c'est-à-dire à l'évolution des formes que peuvent prendre les objets qui peuplent notre monde, aussi bien animé qu'inanimé. Nous pensons ici à la théorie des catastrophes de René Thom, à la théorie des fractales de Benoît Mandelbrot, à la théorie des structures dissipatives d'Ilya Prigogine ou encore à la théorie du chaos et des attracteurs étranges de David Ruelle. À travers ces théories, que l'on peut appeler morphologiques, s'amorce une réconciliation de la science et de la philosophie. Elles récupèrent certains traits de la pensée philosophique traditionnelle, sans prétendre pour autant, bien évidemment, se substituer à la philosophie. Ce sont ces traits, et plus particulièrement deux d'entre eux, la dimension théorique ou contemplative, d'une part, et la visée encyclopédique, d'autre part, que nous voudrions évoquer.

Le souci de l'intelligibilité

On peut assigner, avec René Thom, deux buts fondamentaux à la science : l'action ou la connaissance. « S'il est légitime de considérer la totalité des activités scientifiques comme un continuum, dit le mathématicien, il n'en demeure pas moins que ce continuum a pour ainsi dire deux pôles. Un pôle regarde la connaissance pure : comprendre le réel, tel est, en ce point le but fondamental de la science. L'autre pôle concerne l'action : agir efficacement sur le réel, tel serait selon ce point de vue le but de la science » (*Modèles mathématiques de la morphogenèse*). Il y a, au fond, deux types de sciences. Certaines sont très efficaces mais n'accroissent pas notre compréhension du monde : c'est le cas de la mécanique quantique et de la techno-science en général. D'autres rendent au contraire le réel plus intelligible, mais ne nous permettent pas d'agir sur lui : c'est le cas des théories morphologiques et de toutes les théories qualitatives en général.

Pour apprécier la portée de cette opposition, il convient de la replacer dans un cadre plus général, celui de la problématique du local et du global. « L'action, dit Thom, vise essentiellement à résoudre les problèmes locaux, alors que la compréhension vise l'universel, donc le global. » Mais, « par un paradoxe apparent, ajoute-t-il, les problèmes locaux exigent pour leur solution des moyens non locaux ; alors que l'intelligibilité, elle, exige la réduction du phénomène global à des situations locales typiques, dont le caractère prégnant les rend immédiatement compréhensibles ». Toute action suppose une visée au-delà du phénomène et effectue un passage du local au global. L'action efficace, la seule intéressante en pratique, est celle pour laquelle ce passage est rigoureusement contrôlé. Ce contrôle suppose bien évidemment que l'on puisse anticiper le cours des choses, c'est-à-dire que l'on puisse prédire ce qui va se produire si l'on agit de telle ou telle manière.

La compréhension opère, à l'inverse, le passage du global au local. Elle requiert, dit Thom, « la concentration du non-local en une structure locale ». C'est la raison pour laquelle « une théorie non locale ne peut être tenue pour scientifique au sens strict du terme : nous ne connaissons et agissons que localement ». La localisation du global, source d'intelligibilité, peut être menée à bien de plusieurs façons. Une première possibilité consiste à introduire une ontologie concrète cachée « sous » la phénoménologie globale donnée. C'est ainsi que procède l'atomisme : les mouvements locaux des atomes expliquent les propriétés globales des corps. La localisation peut aussi résulter de la construction d'une structure abstraite locale « au-dessus » d'une phénoménologie. C'est cette voie qu'empruntent les théories morphologiques. La théorie des catastrophes rend compte d'une morphologie empirique, par nature globale, par l'intermédiaire d'un *logos*, qui est une structure éminemment locale. De la même façon, la théorie des fractales rend compte des formes naturelles par d'autres formes mathématiques, engendrées par des procédures récurrentes locales. La théorie des structures dissipatives et la théorie du chaos expliquent quant à elles les structures empiriques en construisant localement des systèmes dynamiques ou des attracteurs. Expliquer des formes empiriques globales par des formes géométriques locales n'accroît nullement notre pouvoir sur le monde, mais cela augmente notre sentiment d'intelligibilité.

Les théories morphologiques ne produisent pas de nouvelles morphologies, mais fondent les morphologies existantes, dont elles ne maîtrisent pas ou guère l'apparition, dans l'être, c'est-à-dire les déduisent d'une structure mathématique (singularité d'un potentiel, système dynamique) logiquement et ontologiquement première. Elles réhabilitent ce faisant un vieux thème, récusé par l'idéologie néo-positiviste, selon lequel « toute connaissance est connaissance par les causes ». Elles expliquent le donné phénoménal en remontant aux causes qui lui ont donné naissance, non pas bien sûr aux causes efficientes, qui jouent dans le même espace que la morphologie étudiée, mais aux causes formelles, qui sont les seules vraiment rationnelles. D'une façon générale, elles placent plus haut la contemplation que l'action, « audace énorme, affirme J. Largeault, en un siècle où la recherche est cadastrée, soumise à des impératifs de rendement ou à des routines administratives ». Animées par le seul désir de comprendre le monde, d'y voir à l'œuvre des rationalités nouvelles, elles rappellent la science à sa vocation théorique essentielle. Elles renouent par là même avec une des préoccupations majeures de la philosophie, et leurs promoteurs n'hésitent pas, du reste, à se placer sous les auspices de philosophes qui ont cessé depuis longtemps, il faut bien l'avouer, d'être une référence obligée des auteurs de traités scientifiques. « Descartes, dit par exemple Thom, avec ses tourbillons, ses atomes crochus, etc., expliquait tout et ne calculait rien. Newton avec la loi de la gravitation en $1/r^2$ calculait tout et n'expliquait rien. L'histoire a donné raison à Newton et relégué les constructions cartésiennes au rang des imaginations gratuites et de souvenirs de musée. Certes le point de vue newtonien se justifie pleinement du point de vue de l'efficacité, des possibilités de prédiction, donc d'action sur les phénomènes... » Mais « les esprits soucieux de compréhension, ajoute-t-il, n'auront jamais, à l'égard des théories qualitatives et descriptives des présocratiques à Descartes, l'attitude méprisante du scientisme quantitatif ». En préférant Descartes à Newton, Thom non seulement prend le contre-pied de l'orthodoxie contemporaine - ce qui n'est certainement pas pour lui déplaire -, mais choisit d'abord et avant tout le parti de l'intelligibilité.

Un nouvel encyclopédisme

Les théories morphologiques ne se rattachent pas seulement à la tradition philosophique par ce primat accordé à la *théôria*, mais également par leur visée encyclopédique. Elles ont une prétention à l'universalité. « Nos modèles, écrit Thom, attribuent toute morphogenèse à un conflit, à une lutte entre deux ou plusieurs attracteurs ; nous retrouvons ainsi les idées vieilles de deux mille cinq cents ans des premiers présocratiques, Anaximandre et Héraclite. On a taxé ces penseurs de confusionnisme primitif, parce qu'ils utilisaient des vocables d'origine humaine ou sociale comme le conflit, l'injustice [...] pour expliquer les apparences du monde physique. Bien à tort selon nous, car ils avaient eu cette intuition profondément juste : *Les situations dynamiques régissant l'évolution des phénomènes naturels sont fondamentalement les mêmes que celles qui régissent l'évolution de l'homme et des sociétés*, ainsi l'usage des vocables anthropomorphiques en physique est foncièrement justifié » (*Stabilité structurelle et morphogenèse*). Les morphologies naturelles ou physiques obéissent aux mêmes lois que les morphologies humaines ou sociales. Les unes et les autres résultent de situations mathématiques comparables, par exemple de la scission d'un attracteur en deux ou plusieurs autres qui entrent en conflit sur un même espace substrat. De ce point de vue, Héraclite avait raison de dire que « le combat (*polémos*) est le père de toutes choses », ou Anaximandre que les choses « s'administrent les unes aux autres châtement et expiation pour leur scélératesse, selon le temps fixé ».

Le fondement de l'universalité des théories morphologiques est le principe de l'indépendance de la forme par rapport au substrat. Une même forme peut s'incarner dans deux supports différents, une même structure peut apparaître dans des systèmes composés d'éléments appartenant à des domaines hétérogènes de la réalité. Ainsi, en théorie des catastrophes, une fonce se révèle capable de modéliser aussi bien les transitions de phase en physique que le comportement d'un animal en éthologie, faisant du même coup apparaître un lien pour le moins inattendu entre des phénomènes que tout sépare a priori. Cette théorie a, en fait, un champ d'application pratiquement illimité. Elle s'intéresse à des phénomènes très divers, et tranche, de ce point de vue, avec la spécialisation du savoir qui est aujourd'hui de règle. Les théories morphologiques réussissent à frayer des passages « horizontaux » entre des disciplines aussi diverses que la physique et la sociologie, la chimie et l'économie, etc. Elles luttent contre l'éparpillement des savoirs en découvrant l'unité structurelle fondamentale de la nature. La source profonde de cette interdisciplinarité réside dans le pouvoir génératif des mathématiques. « La langue de l'interdisciplinarité, dit Thom, est nécessairement mathématique [...]. C'est seulement à partir du moment où un concept d'origine expérimentale a été mathématisé, dégagé par abstraction de son milieu d'origine, qu'il peut commencer à jouer un rôle interdisciplinaire. »

Loin de se réduire à une nouvelle branche de la physique et des sciences de la nature en général, se proposant d'appréhender, par des procédures inédites, un aspect jusqu'alors laissé dans l'ombre de notre monde, les théories morphologiques laissent présager ce que les philosophes des sciences appellent un « changement de paradigme ». Elles ne partagent pas les principes qui guident et inspirent la pratique scientifique ordinaire, mais rompent avec l'idéologie techno-scientifique et positiviste qui la gouverne. Cette rupture, que d'aucuns pourraient être tentés de considérer comme une marque de non-scientificité, est en même temps un retour vers une époque où science et philosophie n'étaient pas encore deux termes antithétiques, comme ils le sont devenus depuis lors. Ces théories font revivre une vieille idée de la science, et peut-être la seule qui soit au fond tenable, celle d'une science qui permet de comprendre le réel, et pas seulement d'agir sur lui. Elles nous montrent, en tout cas, que la technique n'est pas la fatalité de l'esprit scientifique.

Bibliographie

- ARISTOTE, *Organon*, trad. franç. J. Tricot, 5 vol., Vrin, Paris, 1950-1962 ; *Métaphysique*, trad. franç. J. Tricot, *ibid.*, 1964
- G. BACHELARD, *Le Nouvel Esprit scientifique*, P.U.F., Paris, 1934 ; *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, *ibid.*, 1951
- H. BERGSON, *L'Évolution créatrice*, Paris, 1907 ; *La Pensée et le mouvant*, Paris, 1934
- C. BERNARD, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), Garnier-Flammarion, Paris, 1966
- L. DE BROGLIE, *Recherches d'un demi-siècle*, Albin Michel, Paris, 1976
- R. CARNAP, *Der logische Aufbau der Welt*, Berlin, 1928 ; *Logische Syntax der Sprache*, Vienne, 1934 ; *Les Fondements philosophiques de la physique* (1966), trad. franç. J. M. Luccioni et A. Soulez, Armand Colin, 1973
- H. COHEN, *Kants Theorie der Erfahrung*, Berlin, 2^e éd. 1885
- A. COMTE, *Cours de philosophie positive* (1830-1842), 2 vol., Hermann, Paris, 1975
- R. DESCARTES, *Règles pour la direction de l'esprit, Discours de la méthode, Les Principes de la philosophie*, in *Œuvres philosophiques*, 3 vol., Garnier, Paris, 1963-1973
- P. DUHEM, *Sôzein ta phainomena. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Hermann, 1908 ; *La Théorie physique, son objet, sa structure*, Rivière, Paris, 2^e éd. 1914
- G. GALILÉE, *L'Essayeur* (1623), Les Belles Lettres, Paris, 1980 ; *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles* (1638), Armand Colin, 1970
- M. HEIDEGGER, *Qu'appelle-t-on penser ?*, trad. franç. A. Becker et G. Granel, P.U.F., 1959 ; *Qu'est-ce que la métaphysique ?*, trad. franç. H. Corbin, in *Questions I*, Gallimard, Paris, 1968 ; *Lettre sur l'humanisme*, trad. franç. R. Munier, in *Questions III*, *ibid.*, 1966 ; « La Question de la technique », trad. franç. A. Préau, in *Essais et conférences*, *ibid.*, 1954 ; « Science et méditation », trad. franç. A. Préau, in *Essais et conférences*, *ibid.* ; *Qu'est-ce qu'une chose ?*, trad. franç. J. Reboul et J. Taminiaux, *ibid.*, 1971
- W. HEISENBERG, *Physique et philosophie*, trad. franç. J. Hadamard, Albin Michel, 1961
- E. HUSSERL, *La Philosophie comme science rigoureuse* (1911), trad. franç. M. de Launay, P.U.F., 1989 ; *Idées directrices pour une phénoménologie* (1913), trad. franç. P. Ricœur, Gallimard, 1950 ; *La Crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, trad. franç. G. Granel, *ibid.*, 1976
- E. KANT, *Critique de la raison pure*, trad. franç. A. Trémesaygues et B. Pacaud, P.U.F., 1965 ; *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourra se présenter comme science*, trad. franç., J. Gibelin, Vrin, 1969
- A. KOYRÉ, *Études galiléennes*, Hermann, 1939 ; *Études newtoniennes*, trad. franç., Gallimard, 1968 ; *Études d'histoire de la pensée scientifique*, P.U.F., 1966 ; *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Gallimard, 1971

- J. LARGEAULT, *Principes de philosophie réaliste*, Klincksieck, Paris, 1985 ; *Principes classiques d'interprétation de la nature*, Vrin, 1988
- E. MACH, *La Mécanique. Exposé historique et critique de son développement* (1883), trad. franç. E. Bertrand, J. Gabay, Paris, 1987
- E. MEYERSON, *De l'explication dans les sciences*, Payot, Paris, 1921 ; *Identité et réalité*, Vrin, 5^e éd. 1951
- I. NEWTON, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687), trad. franç. M^{me} du Chastellet, 1756-1759, éd. fac-similé, Blanchard, Paris, 1966
- F. NIETZSCHE, *Le Gai Savoir*, trad. franç. A. Vialatte, Gallimard, 1950 ; *La Volonté de puissance*, trad. franç. G. Bianquis, 2 vol., *ibid.*, 1947-1948
- PLATON, *République ; Théétète*
- H. POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1905 ; *La Valeur de la science*, *ibid.*, 1908 ; *Science et méthode*, *ibid.*, 1912
- Les Présocratiques*, éd. par J.-P. Dumont, coll. La Pléiade, Gallimard, 1988
- K. R. POPPER, *La Logique de la découverte scientifique* (1934), trad. franç. N. Thyssen-Rutten et P. Devaux, Payot, 1984
- I. PRIGOGINE & I. STENGERS, *La Nouvelle Alliance*, Gallimard, 1979
- L. ROBIN, *La Pensée grecque et les origines de l'esprit scientifique*, Paris, 1923
- A. SOULEZ dir., *Manifeste du cercle de Vienne et autres écrits*, P.U.F., 1985
- R. THOM, *Stabilité structurelle et morphogenèse*, InterÉditions, Paris, 1977 ; *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Bourgois, Paris, 2^e éd. 1980 ; *Paraboles et catastrophes*, Flammarion, 1983 ; *Prédire n'est pas expliquer*, Eschel, Paris, 1991
- A. N. WHITEHEAD, *La Science et le monde moderne* (1925), Payot, 1930
- W. WINDELBAND, « Qu'est-ce que la philosophie ? », in *Präludien*, Leipzig, 5^e éd. 1914

LE CHAOS COLLECTIF

Par Hugues Chaté

Physicien au CEA

hchate@cea.fr

Article extrait du Hors-Série de la revue « Sciences et Avenir » de Juillet-Août 2005

Alliée à la physique statistique, la théorie des systèmes dynamiques a permis de montrer qu'une collection d'objets chaotiques en interaction peut être le lieu d'émergence de comportements collectifs nouveaux.

Emergence et chaos : nous ne nous intéresserons pas à la façon dont le chaos *émerge* d'équations d'évolution non linéaires, ce qui est la question maintenant classique, du *chaos déterministe*. Nous traiterons plutôt du renouveau de la problématique de la physique statistique – comprendre les phénomènes macroscopiques à partir des événements microscopiques – dans le contexte moderne d'un grand nombre d'objets chaotiques en interaction. Cette problématique a en effet trouvé récemment des habitats neufs sous le vocable « émergence » dans le cadre de l'étude des *systèmes complexes*. Ici, afin de rester dans un cadre précis et vérifiable, ces systèmes complexes seront donc des collections d'éléments chaotiques couplés entre eux. « Emergence » fait désormais partie des mots-clés de toute personne étudiant la complexité, sans que ces notions trouvent de définition précise. De quoi s'agit-il ? Les systèmes complexes sont partout, et chacun peut en voir là où l'emploi d'un terme à la mode l'arrange. L'émergence décrirait ainsi les comportements de populations *d'agents* en interaction qui ne peuvent être réduits à la somme des comportements individuels. Au-delà des effets de mode, nous considérons que l'émergence n'est rien d'autre que la problématique classique de la physique statistique : comment comprendre le comportement macroscopique d'un gaz, d'un liquide, à partir de la dynamique microscopique

de ses molécules? D'ailleurs, à un niveau mathématique, ce programme n'est toujours pas accompli: passer du niveau élémentaire de chocs entre boules de billard -le *chaos moléculaire* - aux équations macroscopiques de la matière reste un problème largement ouvert. En effet, les agents ont beau être simples -les molécules vues comme des boules de billard, par exemple -, leur dynamique collective peut néanmoins être complexe - qu'on pense aux équations de Navier-Stokes régissant la dynamique des fluides simples, dont on n'a pas fini d'explorer les propriétés fascinantes découlant de leur non-linéarité. -

Cela dit, les développements modernes de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires - qui ont donné naissance à la notion de chaos déterministe - et l'éclatement de la physique statistique hors de ses champs traditionnels d'investigation ont permis de transporter la question classique du passage micro/macro vers un niveau d'abstraction plus grand, remplaçant les molécules par des unités elles mêmes potentiellement plus complexes, avec la prétention de modéliser des phénomènes non seulement physiques, mais aussi biologiques, voire économiques ou sociologiques.

Nous montrerons d'un point de vue théorique - donc sans charge sémantique liée à un champ particulier - qu'une collection d'objets chaotiques en interaction est génériquement capable d'être le lieu d'émergence de comportements collectifs nouveaux, inattendus, «non triviaux », comme l'on dit en physique.

L'effet de surprise est en effet crucial. Pas d'émergence qui vaille la peine qu'on en parle si le lien entre la dynamique individuelle, microscopique, et le comportement collectif de la population d'agents est évident, trivial. Tel est le cas si tous les éléments font exactement la même chose. Alors, bien sûr, toute observation macroscopique ne sera que la copie amplifiée du mouvement microscopique. Ce cas trivial de comportement collectif est en fait peu ou prou la définition classique de la *synchronisation*: comme l'a étudié Huygens, des horloges couplées même très faiblement à travers les lattes d'un plancher battent à l'unisson. Ce phénomène très général - comme les horloges, le cycle menstruel de femmes vivant en commun se synchronise est aujourd'hui bien compris, au moins théoriquement.

L'étude de cet état parfaitement synchronisé possède un intérêt propre (conditions d'existence, de stabilité), mais récemment le concept de synchronisation a été généralisé, notamment dans le cadre de systèmes dynamiques chaotiques couplés (Pikovsky *et al*). Des types moins stricts de synchronisation ont été découverts et étudiés, dont on sait maintenant qu'ils jouent un rôle important dans les systèmes vivants. Dans cette synchronisation faible, les éléments ne font pas exactement la même chose, leur comportement ne consiste pas forcément en des oscillations régulières - comme celles du balancier des horloges. Ces éléments restent néanmoins proches les uns des autres, ce qui donne lieu à une dynamique collective robuste. Par opposition, ce qui nous intéresse, c'est en quelque sorte une *synchronisation d'oscillateurs émergents*, c'est-à-dire une dynamique collective n'ayant pas de lien direct, patent, avec l'évolution individuelle.

Ainsi que nous l'avons mentionné, nous souhaitons décrire des comportements collectifs émergents qui soient *génériques*. Bien que le mot ne recouvre pas toujours les mêmes propriétés, on entend généralement par là que les comportements observés sont robustes à de - petites - perturbations et modifications des paramètres. Ne seront donc pas génériques les comportements émergents ne se produisant que pour des conditions initiales particulières, ni ceux, typiques des points fixes instables, qui ne résistent à aucun bruit, même le plus faible. Nous excluons aussi les larges fluctuations macroscopiques qui apparaissent lorsqu'on amène un système à un *point critique*, une transition de phase, où les corrélations spatiales et temporelles divergent, produisant des structures fractales. En effet, sauf à entrer dans le débat difficile de la criticalité autoorganisée, il faut régler un paramètre - par exemple la température - pour pouvoir se trouver à un point critique.

Notre propos étant théorique, on peut se contenter de l'étude de modèles minimaux, débarrassés de tout ingrédient superflu. La pertinence vis-à-vis de tel problème physique ou biologique n'est alors que métaphorique, mais elle est exemplaire. Ce sont les modèles minimaux qui sont le mieux à même de capter les éventuels aspects universels d'un phénomène. Afin d'illustrer cette introduction très générale et d'entrer dans le vif du sujet, détaillons maintenant un cas particulièrement spectaculaire.

Par souci de minimalité, nous avons choisi un système où tout est discret, en fait une règle *d'automate cellulaire* évoluant sur un réseau régulier - susceptible de figurer par exemple l'espace physique, donc lui aussi discrétisé. Sur chaque site de ce réseau, c'est-à-dire sur chaque cellule de l'automate, habite une variable locale pouvant prendre un nombre fini de valeurs - fixé à deux dans ce qui suit. Ces variables locales sont mises à jour en parallèle en des pas de temps discrets, en fonction de leur état courant et de celui d'un certain nombre de variables voisines sur le réseau.

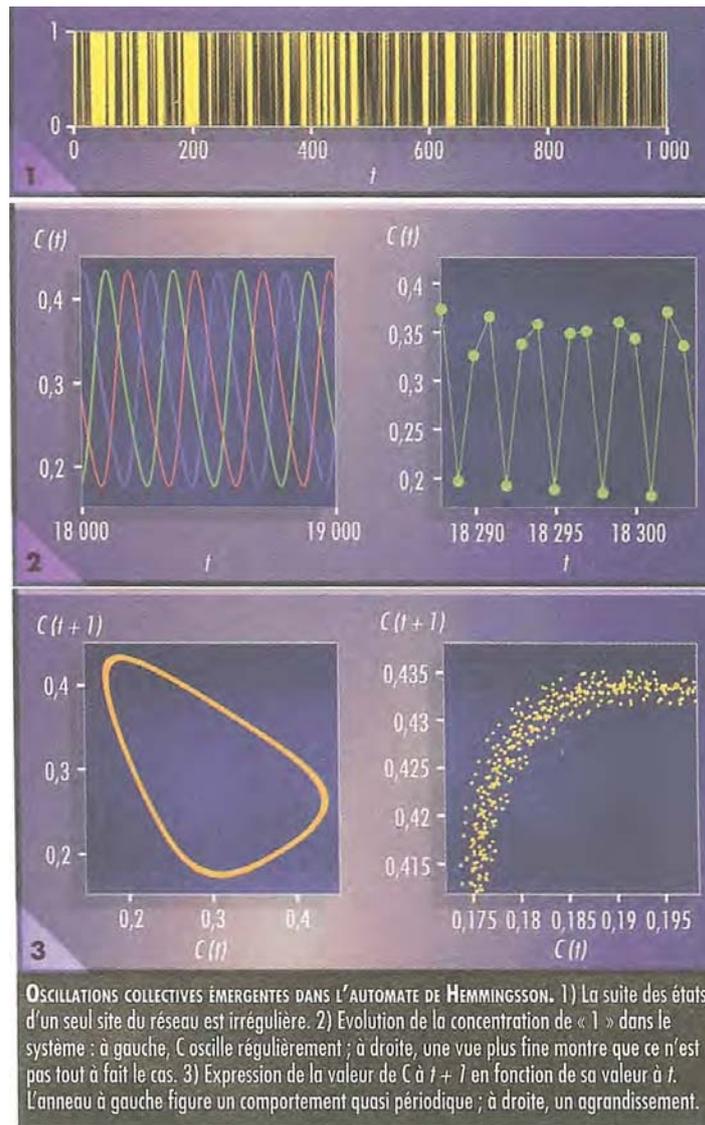
En vogue durant les années 1980, les automates cellulaires ont surtout servi de modèles

primitifs pour des situations réelles complexes. Le nom de Stephen Wolfram leur est associé, car il fut l'un des premiers à les étudier systématiquement, s'attachant à la dynamique spatio-temporelle éventuellement très riche produite par ces règles très simples. On retient souvent des travaux de Wolfram sa classification heuristique des règles d'automates cellulaires. Les règles de classes I et II sont celles de l'ordre, caractérisées par l'évolution rapide vers des configurations gelées ou strictement périodiques. La classe III regroupe les règles chaotiques, où le désordre spatio-temporel permet la convergence statistique des quantités macroscopiques. La classe *IV*, par commodité, contient le reste des règles, c'est-à-dire celles qui se trouvent « *au bord du chaos* ». Ce sont les plus complexes, possédant des propriétés de calculabilité universelle. Toutefois, parce qu'elles se trouvent - idéalement! - aux points critiques séparant l'ordre du désordre, on considère que leurs comportements émergents ne sont pas génériques.

Considérons la règle due à Jan Hemmingsson, définie sur un réseau cubique simple: chaque site est entouré de six voisins et peut prendre les valeurs 0 ou 1. Son état au pas de temps suivant est déterminé par S , la somme des valeurs de ses voisins et de lui-même, qui est donc un nombre entre 0 et 7. Si S vaut 0 ou 5, alors le site central prend la valeur 1, sinon il prend la valeur 0. Répartissant des valeurs initiales (0 ou 1) aléatoirement sur un domaine assez grand, observons, grâce à l'ordinateur, ce qui se passe. La dynamique locale n'est guère instructive, puisque l'évolution d'un site n'est qu'une succession désordonnée de 0 et de 1. Par contre, l'évolution de variables macroscopiques, dont la plus simple, C , est la proportion relative de 0 et de 1 dans le système, révèle des oscillations régulières. Que se passe-t-il ?

Au cours du temps, la concentration C prend un continuum de valeurs, de sorte que son application de premier retour forme un anneau, caractéristique d'une évolution cyclique avec une période irrationnelle, que l'on appelle généralement « quasi périodique » (voir l'illustration page ci-dessous).

Si tous les sites étaient synchronisés, C vaudrait alternativement 0 ou 1. Ce régime trivial n'est observé que pour des conditions initiales particulières. Cette synchronisation complète n'est donc pas générique. Par contre, les oscillations quasi périodiques apparaissent en fait pour presque toute condition initiale. L'exploration de la structuration spatiale du système dans ce régime ne révèle aucune régularité particulière. En fait, les oscillations collectives ne sont pas strictement régulières. Elles comportent des fluctuations statistiques qui ne disparaissent que dans la limite du nombre infini de sites. On a donc bien une dynamique chaotique, donnant lieu à un désordre spatio-temporel fort. La règle de Hemmingsson est en ce sens une règle de classe III, mais nos résultats montrent que Wolfram - et d'autres à sa suite - a manqué ce type de dynamique, essentiellement car elle n'émerge que pour des dimensions d'espace au moins égales à trois.



Où sont les oscillateurs émergents mentionnés dans notre discussion de la synchronisation? Si aucune méthode analytique n'a encore permis de les mettre en évidence, ils apparaissent clairement grâce, encore une fois, à l'ordinateur : si l'on mesure C non sur tout le système, mais à l'intérieur d'un sous-système de taille intermédiaire, on observe grosso modo les mêmes oscillations, mais beaucoup plus bruitées. Notre automate cellulaire peut donc être vu comme une collection d'oscillateurs *mésoscopiques* bruités et couplés entre eux, qui se synchronisent spontanément. On l'aura compris, ces oscillateurs n'ont pas d'existence propre. Ils émergent de la dynamique microscopique - la suite désordonnée de 0 et de 1 de chaque site - et sont présents à toutes les échelles intermédiaires : parcourant ce continuum d'échelles mésoscopiques, le bruit effectif dont ils sont munis décroît, jusqu'à être minimal à l'échelle macroscopique de la taille du système. On chercherait en vain à les isoler individuellement: ils émergent de la granularité de l'espace, mais forment un champ oscillant continu et bruité.

Les oscillations collectives décrites plus haut sont très robustes. Elles subsistent, par exemple, à l'application de la règle non plus de manière certaine mais probabiliste, et ne sont nullement dues à une

conspiration précise de facteurs liés au déterminisme de la dynamique. Elles ne sont pas non plus conditionnées par la régularité de la géométrie des connections: on les observe aussi sur des réseaux aléatoires plus ou moins complexes. De manière générale, les comportements collectifs émergents de systèmes chaotiques couplés ne sont nullement anecdotiques : de nombreuses règles d'automates cellulaires donnent naissance à des oscillations collectives. On observe que plus la dimension de l'espace et/ou le nombre de voisins en jeu sont grands, plus souvent de tels comportements apparaissent. En fait, dans ce contexte, les comportements collectifs émergents sont plutôt la règle que l'exception.

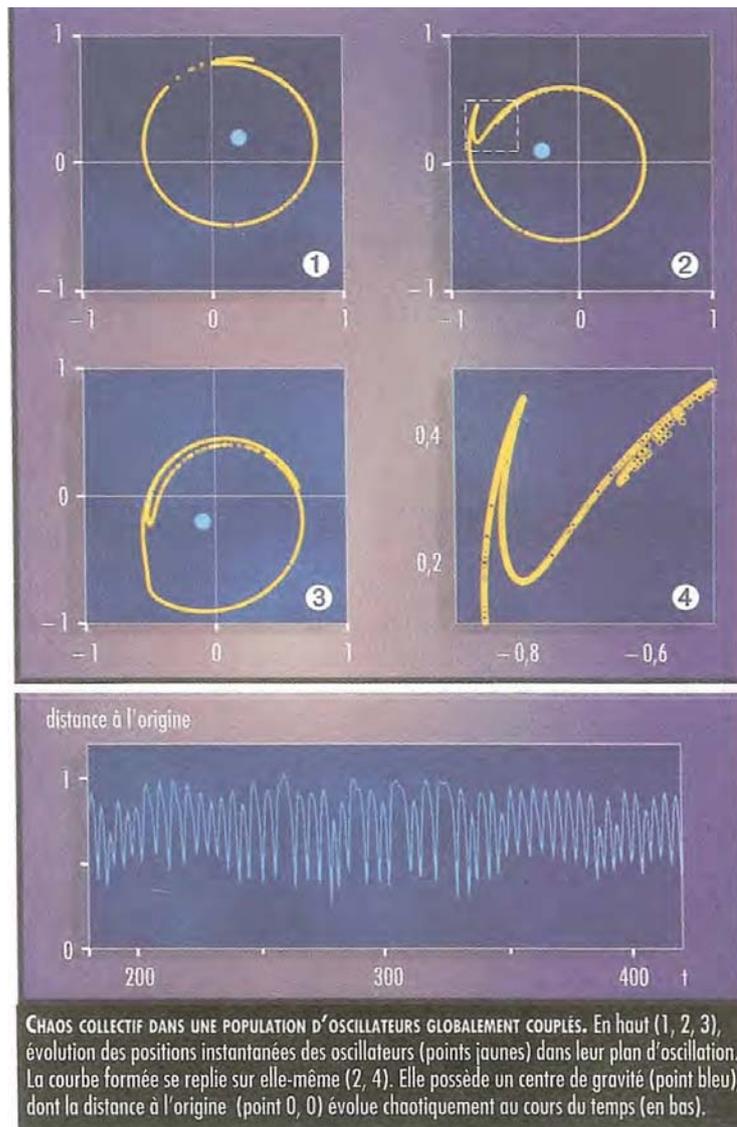
Il est certes difficile de quantifier directement la robustesse de la dynamique produite par une règle d'automate cellulaire car l'espace des règles est lui aussi discret. Impossible donc de faire varier continûment la dynamique. Mais des voies indirectes le démontrent, qui construisent des chemins quasi continus dans l'espace des règles. On s'aperçoit alors que les comportements collectifs tels ceux que nous décrivons ici sont bien robustes en ce sens également, et donc parfaitement génériques.

Enfin, ce type de propriété émergente n'est pas limité aux automates cellulaires. Les variables locales peuvent être continues, le temps également, par exemple. L'uniformité des éléments n'est pas non plus nécessaire; leurs paramètres propres peuvent être distribués aléatoirement et soumis à des bruits extérieurs plus ou moins forts. Mieux, il est possible de montrer qu'un tel désordre microscopique peut provoquer des changements qualitatifs de la dynamique collective. Citons un exemple assez instructif: alors que les règles d'automates cellulaires sur réseau ne semblent donner lieu qu'à des comportements collectifs périodiques, des collections d'oscillateurs non linéaires – à temps continu - couplés *globalement* peuvent exhiber une dynamique collective non triviale *chaotique* alors même que ces éléments, lorsqu'ils sont isolés, ne montrent que des cycles limites réguliers !

Ce phénomène a été mis en évidence par le groupe de Yoshiki Kuramoto (*voir l'illustration page suivante*). Une fois qu'ils sont couplés entre eux, la position des éléments dans leur plan d'oscillation forme, à chaque instant, une courbe complexe très différente d'un cercle. Cette courbe se replie, se feuillette, tourne continûment dans le temps. C'est la dynamique irrégulière de cette courbe effective émergente qui caractérise le chaos collectif. La densité des points sur cette courbe - chacun représentant un oscillateur - et leur position relative varient rapidement par rapport aux déformations de la courbe elle-même: le *chaos collectif* émerge d'un chaos microscopique aux propriétés différentes.

Pour le physicien, un vaste champ d'investigation s'est ouvert : comment prévoir - sans ordinateur! - la dynamique collective qui va émerger d'une dynamique locale et d'un plan de couplage donné? Comment caractériser les comportements critiques (transitions de phase) et les structures fractales apparaissant au passage d'une dynamique collective à une autre? Comment prouver - toujours sans ordinateur! - que ces comportements collectifs non triviaux existent bien. dans les limites, importantes théoriquement, des tailles et des temps infinis ?

Autant de questions toujours largement ouvertes. Il n'en reste pas moins que pour tous ceux - pas seulement les physiciens! - qui s'intéressent à la complexité, les systèmes chaotiques couplés fournissent un exemple concret et fascinant d'émergence. Plus qu'un exemple en fait, car presque tous les systèmes complexes peuvent entrer dans ce cadre, surtout si l'on s'autorise un certain degré de bruit, de variabilité, ce qui, nous l'avons mentionné, ne détruit pas le phénomène, au contraire. Soudain, l'activité erratique et décorrélée des neurones ne semble plus aussi difficilement réconciliable avec les manifestations collectives de leur activité

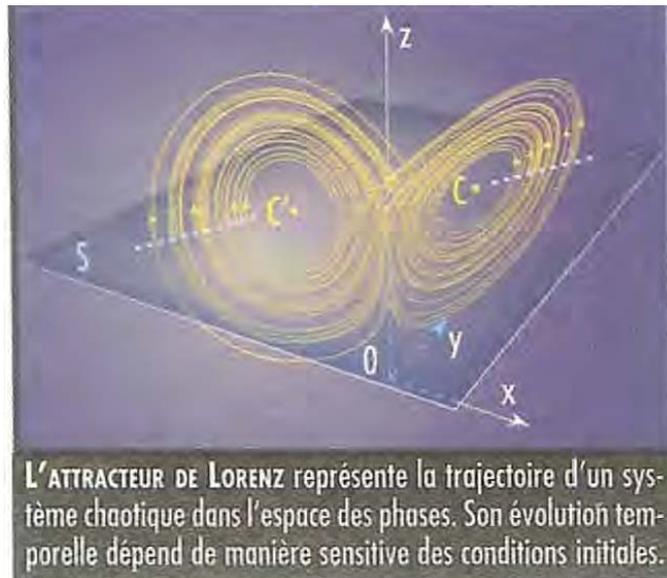


LE CHAOS DETERMINISTE

C'est avec l'apparition des ordinateurs, dans les années 1960, que la notion de chaos déterministe voit le jour. Si des mathématiciens tel Henri Poincaré, puis ceux de l'école russe des systèmes dynamiques ont pressenti certains aspects du chaos, celui-ci n'a été vraiment observé et compris que plus tard.

Si quelques idées clés sont passées dans le langage courant - comme l'effet papillon -, rappelons les fondements du phénomène. Presque tous les phénomènes sont en fait descriptibles par des équations du type $dX/dt = F(X)$, où t représente le temps, X les variables décrivant le système, et où F est une fonction non linéaire. Bien que cette équation soit parfaitement déterministe - aucun terme de bruit ici -, l'évolution de X peut être désordonnée et imprédictible, et on parle alors de chaos déterministe.

Des propriétés importantes sont constitutives du chaos: si pour une condition initiale donnée le système possède une solution unique, le chaos est généralement caractérisé par le fait que deux solutions proches à un moment s'éloignent en général l'une de l'autre (en moyenne) exponentiellement vite. C'est cette sensibilité aux conditions initiales qu'on appelle communément « effet papillon ». Dans l'espace des variables X , les solutions chaotiques du système sont des trajectoires formant un objet géométrique complexe, fractal et feuilleté, nommé « attracteur étrange » (voir l'illustration ci-dessous).



Insistons sur le fait que le chaos se distingue fondamentalement du bruit, qui implique une infinité de degrés de liberté, alors qu'un système à trois variables peut déjà montrer du chaos. Il est important de le noter: coupler des bruits entre eux ne donne jamais qu'un autre bruit! C'est parce que le désordre des unités couplées est d'origine chaotique que peuvent émerger les comportements collectifs que nous décrivons.

POUR EN SAVOIR PLUS

« From Collective Oscillations to Collective Chaos in a Globally Coupled Oscillator System », de Naoko Nakagawa et Yoshiki Kuramoto (*in* « Physica » D, 75, 1994).

« (Emergence of Collective Behavior in large Chaotic Dynamical Systems », d'Hugues Chaté (*in* «International Journal of Modern Physics» B, 12 (3), 199B).

« Synchronization - A Universal Concept in Nonlinear Sciences », d'Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum et Jürgen Kurths (Cambridge University Press, 2001).