

BULLETIN N° 114
ACADÉMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 10 avril 2007

**Conférence de Philippe HUNEMAN de l'IHPST :
Concept formel d'émergence, causalité et transitions évolutives**

Prochaine séance : le Mardi 15 mai 2007

**Conférence du Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI
Emergence et Stratégies des Théories effectives**

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

avril 2007

N°114

TABLE DES MATIERES

P. 3 Compte-rendu de la séance du 10 avril 2007 :
 P. 6 Compte –rendu de la Section Nice-Côte d’Azur
 P.13 Documents

Prochaine séance : Mardi 15 mai 2007,
 MSH, salle 215-18heures

Conférence du Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI:
« Emergence et Théorie des Stratégies effectives »

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

Séance du
Mardi 10 avril 2007

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

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Jean-Pierre FRANCOISE, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO, Emmanuel NUNEZ, Alain STAHL

Etaient excusés : Michel BERREBY, Bruno BLONDEL, Françoise DUTHEIL, Marie-Louise LABAT, Pierre SIMON,

I) Informations générales

1°) En vue de la publication des Actes du congrès « Physique et Conscience » divers conférenciers ont été sollicités pour fournir des textes écrits. Quelques réponses ont déjà été reçues :

a) réponses positives : Michel BITBOL, Michel CABANAC, Claude DEBRU, Jean Blaise GRIZE

b) réponses négatives : Pr. Alain BERTHOZ, Pr. Gilles de GENNES

c) réponses en attente : Florin AMZICA, Daniel ANDLER, Pierre BUSER, Stanislas DEHAENE, David HANSEL, Denis LE BIHAN, Jean PETITOT, Alain PROCHIANTZ,

Pour contourner la difficulté il est suggéré d'utiliser l'enregistrement vidéo qui peut être traduit en texte par des logiciels adaptés.

2°) Le problème de la diffusion des livres déjà publié est abordé. Il est suggéré de rencontrer Mr. D'IRIBARNE pour voir si les éditions de la MSH ne pourraient pas nous aider. Notre Collègue Jean-Pierre FRANCOISE nous signale une maison d'édition anciennement dépendante d'ELZEVIR qui pourrait nous intéresser.

3°) Pour une meilleure gestion du Site de l'AEIS, www.science-inter.com, il faudrait désigner un webmestre.

4°) Le bâtiment de la MSH dans lequel ont lieu nos séances doit subir un désamiantage. Il serait donc important de prendre rendez-vous avec Mr. D'IRIBARNE, Mme AUFRAY ou toute autre autorité compétente pour trouver un lieu pour nos séances.

II) « Introduction à l'émergence » par Philippe HUNEMAN de l'IHPST¹

Philippe HUNEMAN est un jeune chercheur né en 1970 qui eu d'abord une formation mathématiques, puis philosophique. Il s'est plus particulièrement penché sur l'épistémologie de la théorie évolutionniste en biologie. Sous la direction de Gérard Lebrun puis Anne Fagot-Largeault, il a soutenu à Paris I en 2000 une Thèse « Métaphysique et Biologie ; Kant et la constitution du concept d'organisme ». Cela l'a conduit à s'intéresser plus particulièrement au **concept de causalité**, dans la mesure où les arguments philosophiques au sujet du statut et des limites de la sélection naturelle ont généralement à employer ce concept de manière soi-disant décisive. Il cherche à élucider **la conception de la causalité impliquée** dans les explications darwiniennes, relativement aux divers genres de stratégies explicatives dans ce domaine. Il espère à la fin par là contribuer à **une théorie générale de la causalité** en philosophie des sciences, qui respecterait les réquisits spécifiques qu'imposent à ce concept les caractéristiques particulières du concept de sélection naturelle.

Il a également analysé l'émergence de la biologie en tant que Science autonome et les postures téléologiques diverses.

Pour Philippe HUNEMAN le terme d'émergence a subi une inflation.

L'émergence présupposerait la **nouveauté** à laquelle doit s'ajouter la notion de **robustesse**. Les nouvelles lois, les nouvelles entités doivent être durables. Par ailleurs l'émergence de ces phénomènes ne requiert aucunement l'intervention d'un principe transcendantal quelconque. Les événements ont des causes physiques qui obéissent au principe de clôture causale de la physique exprimé comme suit par Jaegwon Kim (1996, p. 147) :

« Sélectionner un événement physique quelconque, disons la décomposition d'un atome d'uranium ou la collision de deux étoiles distantes dans l'espace, et tracer leurs ancêtres causaux ou leur postérité causale aussi loin que vous le voudrez ; le principe de clôture causale du domaine physique dit que cela ne vous fera jamais quitter le domaine physique. »

Le principe de clôture physique impliquerait notamment que les phénomènes mentaux aient des causes physiques c'est-à-dire des assemblages neuronaux.

Les notions d'émergence et de « QUALIA », considérées comme des propriétés intrinsèques de nos expériences, seraient liées. Mais il existe d'autres propriétés émergentes non liées à notre perception

¹ INSTITUT D'HISTOIRE ET DE PHILOSOPHIE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES UNIVERSITÉ DE PARIS I - UMR 8590 CNRS

consciente comme par exemple la thermodynamique classique qui émerge de la Thermodynamique statistique. Il existe des émergences computationnelles, combinatoires.

La Non-Trivialité, c'est-à-dire le fait que les propriétés du tout ne seraient pas réductibles aux propriétés des parties, serait une exigence première pour l'émergence. Ainsi la propriété du tout ne dépendrait pas de l'enlèvement ou de l'ajout d'une des parties ce qui est différent des propriétés agrégatives.

L'émergence computationnelle doit avoir des propriétés d'incompressibilité et d'indépendance de nos capacités cognitives.

L'émergence est un concept particulièrement important en biologie. On y trouve une convergence entre recherches en informatique et en biologie, l'utilisation d'algorithmes génétiques...On y met en évidence l'évolution graduelle liée au fait que toutes les petites variations donnant un gros avantage sélectif conduisent à une évolution graduelle. L'émergence possède ainsi un caractère innovant. Il nous renvoie aux travaux de Jay GOULD, Richard WATSON, HUMPHREYS

L'émergence se caractériserait par des discontinuités modélisées par des phénomènes incompressibles et non gradualistes.

Philippe HUNEMAN relève quelques problèmes liés à ces définition :

- Si imprédictibilité il y a , comment faire intervenir le principe de clôture causale ?
- Problèmes de l'auto-favoritisme de certains phénomènes
- Relations avec la théorie du Chaos
- Relations avec la théorie des fractales

Le temps ayant quelque peu fait défaut pour exposer tous ces aspects, notre Président propose à notre Conférencier de venir compléter ce riche exposé par une nouvelle conférence en juin 2007. Après quoi, la séance a été levée à 20 heures,

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

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

Le savoir est le seul bien qui s'accroisse à la partager. Comprendre est bien sans limite qui apporte une joie parfaite.

Baruch SPINOZA (1632-1677)

Compte-rendu de la séance du 15 mars 2007 (103^{ème} séance)

Présents :

Jean Aubouin, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Paul Goux, Jacques Wolgensinger.

Excusés :

Pierre Coulet, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazi, Gérard Iooss, Michel Lazdunski, Jacques Lebraty, Jean-François Mattéi, Daniel Nahon, Maurice Papo.

1- Approbation du compte-rendu de la 102^{ème} séance.

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

2- Le mois écoulé.

a) René Blanchet : Les Universités, le CNRS, l'IFREMER, etc. ont créé un groupement d'intérêt scientifique dont le premier président est M. Riou, directeur de l'IFREMER Toulon. Je suis chargé de présider le conseil scientifique qui doit se réunir deux ou trois fois par an. La première réunion se tiendra à Toulon la semaine prochaine.

D'après les informations reçues, le « Laboratoire Méditerranée » devrait avoir une démarche pluridisciplinaire prioritaire, ce qui ne peut que nous satisfaire, notamment pour éviter les duplications de projets, obtenir des subventions significatives du Conseil Régional et relancer la notion des activités scientifiques sur l'arc latin (Catalogne, France, Italie).

Dans un tout autre domaine, nous avons eu, à Sophia Antipolis, la visite du Ministre de l'Enseignement et de la Recherche de Bavière, avec une délégation d'universitaires.

L'Allemagne a mis en route sa rénovation universitaire, décidant notamment de concentrer ses efforts sur quelques universités d'excellence (trois actuellement) qui auront à se partager 1,9 milliards d'euros de crédits chaque année pendant cinq ans, ce qui est considérable. Ils ont donc opté pour une concentration des moyens de recherche et de technologie. Deux de ces universités d'excellence sont celles de Munich-Bavière. Le projet est d'avoir au maximum huit à dix universités d'excellence.

Ce qui intéressait les visiteurs de Bavière était le campus de Science et Technologie de l'Information et de la Communication (STIC) de Sophia pour deux de ses composantes :

EURECOM et INRIA

Le ministre a retenu comme suite à sa visite, deux projets prioritaires : le développement sur les télécommunications avec EURECOM et le calcul intensif avec l'INRIA.

Viendraient ensuite un projet sur la cancérologie avec l'Université et le CHU et les échanges d'étudiants au niveau Master et Doctorat.

Il est important, au moment où l'on développe en France les pôles de compétitivité, que l'on s'associe avec le premier pôle d'Allemagne.

Enfin, en liaison avec l'Académie des Sciences, suite à l'opération « La main à la pâte » dans le Primaire, il a été décidé d'aller maintenant au niveau des collèges dans l'esprit de ce que fait déjà notre confrère Pierre Coulet qui a déjà commencé avec le collège de St Sauveur sur Tinée. Il envisage de voir, avec l'IUFM nouvelle formule intégré à l'Université, si on ne peut pas saisir cette occasion pour revoir la méthode de formation des maîtres pour l'enseignement des Sciences.

b) Jean Aubouin : sur la question du climat, l'Académie des Sciences a tenu un séminaire d'une journée le 5 mars et une séance de synthèse le 13 mars. Il s'agissait de voir un peu clair dans une affaire très médiatisée : l'effet de serre et le rôle des activités anthropiques considérées comme majeures, opinion majoritaire mais non unanime.

Il est évidemment difficile de résumer des séances riches en informations en quelques lignes. Voici, cependant, ce que j'en ai retenu.

Le séminaire comportait trois parties :

- le rappel des *modèles*, très nombreux, et leurs limites ;

- les *données*, maintenant bien connues de tous, sur

+ l'élévation de 0,6° C depuis la fin du XIX^{ème} siècle, de la température moyenne du globe ; encore que celle-ci soit d'une définition délicate étant donné la variabilité des données régionales ;

+ l'élévation du niveau des mers, remarquablement mesurée par les satellites des générations Topex-Poseïdon et Jason ; soit une moyenne de 3 mm par an donc de 30 cm par siècle ; on est loin de

l'effarant scénario du film du Vice-Président des USA Al Gore, qui annonçait une élévation de 6-7 m pour la fin du siècle, avec les conséquences qui en résultaient, submersion d'une partie de Manhattan par exemple ; etc. Justice est ainsi faite de ces extrapolations « politiquement correctes »...

- les *processus* : à côté de l'effet de serre largement attribué au CO₂ d'origine anthropique –et autres gaz comme le CH₄, l'ozone etc.-, le rôle

+ du volcanisme qui lance dans l'atmosphère des nuages de poussières qui font écran au rayonnement solaire, provoquant ainsi un refroidissement ; ainsi en fut-il, récemment, de l'éruption du Pinatubo, qui fit baisser la température moyenne d'environ 0,5 °C pendant quelques années – on se rappellera , sur la Côte d'Azur, les fabuleux couchers de soleil hivernaux , par éclairage de ces poussières stratosphériques dans les rouges du soleil couchant ;

+ des rayons cosmiques sur l'ionisation de la haute atmosphère ;

+ du soleil enfin qu'il s'agisse de son activité ou de ses conséquences magnétiques.

Tous ces facteurs se tiennent, pour leurs effets, dans les limites d'un ordre de grandeur du watt/m², avec un avantage quantitatif pour l'effet de serre.

La séance publique reprenait, en résumés synthétiques, les exposés du séminaire.

Que retenir de ces exposés et des discussions qui ont suivi ?

- les modèles, par leur nombre, découragent quelques peu l'auditeur, étant donné la variabilité de leurs conclusions précises ; encore que tous se placent dans l'optique d'un réchauffement climatique d'origine anthropique ; ce qui peut apparaître comme un postulat ; en effet,

- l'effet de serre du CO₂ anthropique – et du CH₄ etc. – est probable, sans cependant que la part soit faite du réchauffement naturel post glaciaire ; en effet,

- lors des épisodes glaciaires-interglaciaires de l'ère quaternaire, le CO₂ n'était pas déterminant : la courbe des températures précédait celle du CO₂ d'environ 1000 ans. Celui-ci était donc la conséquence de celle-la, par simple effet d'une loi simple sur la dissolution des gaz dans l'eau (en l'occurrence celle des océans). Même si le CO₂ a pu avoir un effet de rétroaction, cependant secondaire puisque le processus ne s'est pas emballé, ce qui aurait dû être le cas si un autre facteur n'avait pas assuré l'alternance glaciaire-interglaciaire. L'agacement était sensible sur cette question qui « allait de soi » ; mais quelle réponse lui donner ?

- l'Optimum climatique médiéval, qui vit les marges méridionales du Groënland cernées de vertes prairies et de forêts, au point d'être colonisées par des agriculteurs- éleveurs Vikings, est une question : n'aurions pas encore retrouvé cet optimum, ce qui limiterait les prévisions apocalyptiques ? L'embarras des réponses était caractéristique.

- le rôle des autres facteurs –sauf celui du volcanisme lequel est d'une périodicité aléatoire- reste en question, notamment celui du soleil ; deux observations attirent cependant l'attention :

+ le minimum d'activité solaire de Maunder, du nom d'un astronome britannique, caractérisé par une quasi-absence de taches solaires entre 1645 et 1715, qui fut la période du maximum de refroidissement du Petit âge glaciaire, - et fit du règne de Louis XIV une période climatiquement difficile - . De nouveau des réponses embarrassées furent apportées.

+ la brusque rupture des courbes de température, de CO₂, autour de 1987, ce qui s'expliquerait difficilement par un effet de serre continu ; mais qui, pour l'instant, n'a pas d'explication.

C'est donc une « affaire à suivre », même si la majorité penche pour l'effet de serre d'origine anthropique. Mais que vaut la majorité en science ? Qu'on pense à la majorité des opinions sur l'univers avant Copernic ...

De toute manière, quoi qu'il en soit du réchauffement climatique naturel, après la dernière glaciation et le Petit âge glaciaire, augmenté ou non de l'effet de serre anthropique, l'apocalypse n'est pas pour demain. Qu'on se rappelle qu'il y a encore quelques mois, on prévoyait une élévation du niveau de la mer de 6-7 m d'ici la fin du siècle, qui se ramènent à 30 cm selon les mesures effectuées.

Ce qui évidemment, ne dispense pas du soin à apporter à l'environnement : à la limitation de la pollution, à la gestion des déchets, à la gestion des ressources en eau – un problème essentiel dès maintenant-, à la gestion des ressources énergétiques, non moins essentiel pour l'avenir.

Mais ces problèmes n'ont pas besoin de scénarios d'épouvante encore légers, qui ont le défaut de condamner la société industrielle moderne, pourtant seule susceptible de les régler.

Le pire n'est pas toujours certain ...

c) Patrice Crossa-Raynaud : deux remarques. La première est qu'une petite différence de température peut avoir des conséquences considérables. Ainsi, lorsque la température de l'océan Atlantique équatorial dépasse 27 ° C, se déclenche toute une série de cyclones (2005) alors que si elle s'établit à 25 ° C par exemple, il y en a peu (2006). Evidemment, le public en 2005 a été impressionné, les attribuant au réchauffement climatique.

La deuxième remarque est que les modèles créés par les climatologues pour prévoir l'évolution des températures dans l'avenir proche repose sur le fait que le cycle normal du carbone dans l'année brasse environ 160 milliards de tonnes et que l'apport anthropique serait de 6 milliards.

Il est affirmé que cet apport aura des conséquences considérables car, depuis 5 000 ans, le cycle naturel du carbone serait si stable et l'équilibre si fin, qu'une perturbation de l'ordre de 4 % suffirait à le bouleverser durablement avec des effets rétroactifs.

On suppose donc que la biosphère serait incapable de réguler cet apport supplémentaire. Or on sait que la végétation est avide de CO₂ (on en ajoute dans les serres), mais surtout qu'une partie de ce CO₂ est fixée par le plancton calcaire marin (notamment les foraminifères) et qu'il tombe au fond où il se sédimente.

C'est le domaine des géophysiciens parmi lesquels Peter Westbroek (*Life as a geological force*, 1991) qui est un spécialiste de *Emiliania huxleyi*, une algue verte entourée d'une coquille de

calcite (cocolithe), présente dans tous les océans, dont la prolifération est accélérée par l'augmentation de la température. Son abondance est parfois telle qu'elle produit un albedo blanchâtre qui reflète les rayons infrarouges du soleil. Elle aurait alors le double rôle de fixer le CO₂ et de refroidir la température et donc de ramener celle-ci à l'équilibre compatible avec la vie avec d'autres organismes comme les bactéries, les algues qui dégagent d'autant plus de produits soufrés que la température augmente, comme cela a été le cas depuis l'origine sur Terre, ainsi que l'a souligné James Lovelock.

Pour Westbrook, les modélisations sont prématurées faute d'avoir des informations plus complètes.

Jean Aubouin : la végétation est un « puits » de Carbone provisoire car, tôt ou tard, celui-ci retourne à l'atmosphère par combustion ou simple pourrissement de la biomasse ; sauf s'il est stocké sous forme de charbon. En revanche, le plancton océanique est un puits durable, à l'échelle des millions d'années, car le CO₂ est piégé dans les calcaires qui se déposent au fond des océans et forment les accumulations énormes que l'on sait dans les terrains sédimentaires.

Patrice Crossa-Raynaud : j'ai lu que le plancton était abondant dans les zones côtières et qu'au large, c'était un véritable désert.

Jean Aubouin : les forages ont montré qu'il y a des dépôts calcaires au fond de tous les océans, (sauf aux grandes profondeurs car le carbonate de calcium y est dissous) même s'ils sont moins abondants que dans les zones côtières. Une des zones de pêche la plus riche au monde est celle du courant de Humbolt qui remonte du fond du Pacifique et, en se réchauffant, dégage du gaz carbonique qui permet un fort développement du plancton nourricier des poissons.

René Blanchet : dans tous les océans, il y a une pluie constante d'organismes calcaires qui est importante en matière de bilan, même si ces calcaires sont dissous vers 2 700 m.

Jean Aubouin : on devrait bientôt pouvoir répondre à la question : « S'il y a plus de gaz carbonique, la sédimentation calcaire augmente-t-elle ? »

En conclusion de ces journées, on peut dire qu'il y a beaucoup d'incertitudes et que celles-ci sont partagées par bien des académies étrangères.

Cette agitation vient essentiellement de l'existence du GIEC qui n'est pas un organisme scientifique, mais une association dans le cadre de l'ONU, dotée de moyens très importants et comportant une forte proportion d'administratifs à côté des scientifiques. Il y a, derrière tout cela, une pensée qui n'est pas anodine, comportant une condamnation de la civilisation industrielle, civilisation de la connaissance, ainsi frappée, en quelque sorte, du « péché originel ».

René Blanchet : ce qui m'a frappé, lors de cette réunion, c'est que tous les intervenants ont montré les mêmes courbes. Elles montrent toutes une rupture très forte en 1987. Ce serait donc un phénomène planétaire. Cela est en concordance avec ce qui est dit par Courtillot sur le magnétisme et les taches solaires. Incontestablement, cela va induire des recherches nouvelles, notamment des collaborations entre l'Institut de Physique du Globe, des astronomes et des astrophysiciens spécialistes du soleil.

Jean Aubouin : la cassure de 1987 ne peut pas être expliquée par un effet anthropique qui est forcément progressif.

Prochaine réunion
le jeudi 19 avril 2007 à 17 heures
au siège
Palais Marie Christine
20 rue de France
06000 NICE

Documents

Dans le cadre de la relation entre évolution et émergence nous vous proposons :

P. 14 : le résumé d'un un article consacré à « la morphogénèse animale » par Nadine Peyriéras de l'ENS

•

Dans le cadre général de Physique et émergence, nous vous proposons :

P. 19 : Emergence en physique :Comportements collectifs et fluctuations hors équilibre.

Résumés du Colloque "Vers une science des systèmes complexes" qui a eu lieu à l'Auditorium du CNRS 21-23 mars 2007 Contributeurs : Hugues Chaté, Olivier Dauchot et Daniel Bonamy.

Pour vous préparer à sa conférence du 15 mai, notre Collègue, Gilles COHEN-TANNOUDJI, nous a proposé deux articles de Murray GELL-MANN traduits par Irène HERPE-LITWIN:

P. 22 : « Une nature en consonance avec elle-même » Par Murray GELL-MANN Traduit de Complexity, Vol.1, n°4, John Wiley and Sons, Inc 1995

P. 29 : « Qu'est-ce que la complexité » Par Murray GELL-MANN Traduit de : Complexity, Vol 1, n° 1 1995 John Wiley and Sons

Morphogenèse animale (résumé)

Nadine Peyriéras

UMR 7138 « Adapatation, Systématique, Evolution »
Ecole Normale Supérieure, 46 rue d'Ulm, 75005 Paris
peyriera@wotan.ens.fr

La multicellularité s'accompagne d'une diversification et d'une spécialisation des cellules de l'organisme. Les métazoaires² sont caractérisés par des niveaux d'organisation cellulaire aboutissant à la formation d'organes jouant des rôles coordonnés dans le fonctionnement de l'organisme. La morphogénèse d'un individu est une caractéristique propre à chaque espèce. A partir d'une cellule unique, la genèse de la forme correspond à un processus complexe d'émergence que nous voudrions comprendre à tous les niveaux d'organisation et d'observation.

Les aspects cellulaires de la morphogenèse des organismes ont été accessibles à l'observation grâce à la microscopie³. Dès le XIX^{ème} siècle, les naturalistes ont exploré la morphogenèse d'un grand nombre de métazoaires. Il s'agissait alors d'une description morphologique à au moins trois niveaux d'organisation, global, tissulaire et cellulaire. Cette approche structurale et morphologique est essentielle à l'embryologie classique comme à la Biologie du Développement contemporaine. On peut certes identifier une période de l'histoire où les approches à l'échelle moléculaire et génétique se contentaient de références morphologiques sommaires⁴. Mais envisager la morphogenèse dans le champ des sciences de la complexité revient à intégrer tous les aspects de la morphodynamique cellulaire avec les descriptions moléculaires des vingt dernières années.

➤ Les premières étapes du développement embryonnaire et l'acquisition de la diversité cellulaire.

Anisotropie de l'oeuf

L'anisotropie de l'œuf est à l'origine d'une diversification des cellules de l'embryon. De nombreux travaux de l'embryologie expérimentale ont été réalisés sur l'œuf d'amphibien et corroborent une telle observation. En effet on distingue d'emblée dans l'œuf un pôle animal et un pôle végétatif. Ce dernier concentre les réserves nutritives de l'embryon mais aussi certains ARN déplacés à la faveur de la rotation corticale accompagnant l'entrée du spermatozoïde. L'anisotropie de l'œuf conduit donc directement à la diversification des cellules de l'embryon qui séquestrent des molécules différentes au fil des divisions. Mais il se pourrait que la diversification des cellules de l'embryon soit expliquée par la dynamique des interactions moléculaires et génétiques. En effet, on peut montrer dans l'embryon de *Xénope* ou de *Danio*⁵ que les différents ARN transcrits à partir du génome du zygote se localisent dans des territoires de plus en plus précis jusqu'au début de la gastrulation. La possibilité que l'établissement

² Les métazoaires désignent dans la classification phylogénétique du vivant les animaux multicellulaires, voir « Classification phylogénétique du vivant », G. Lecointre et H Le Guyader, Belin 2001.

³ L'interprétation de l'œuf comme une cellule unique n'est clairement établie qu'au XIX^{ème} siècle avec l'élaboration de la théorie cellulaire, voir « Des chimères des clones et des gènes », Nicole Le Douarin, Odile Jacob (2000).

⁴ En effet, les années 1970-1990 sont marquées par le déploiement des stratégies de la génétique moléculaire. Nombre de travaux en Biologie du Développement sont très peu documentés en termes d'analyse morphologique. La période actuelle voit un retour des investigations morphologiques avec de nouveaux outils d'imagerie et notamment ceux de la vidéo-microscopie et de la microscopie confocale. En outre de nouvelles méthodes informatiques sont utilisées pour traiter les images obtenues en épifluorescence (déconvolution).

⁵ *Xenopus laevis* est un amphibien. *Danio rerio* est un poisson téléostéen.

et la localisation de ces territoires résultent de la dynamique des interactions génétiques et moléculaires n'est envisagé que dans de rares approches théoriques⁶.

Opposition de type « dehors-dedans »

Quelles qu'en soient les modalités, les divisions cellulaires successives aboutissent à une masse cellulaire dont les cellules périphériques présentent une morphologie polarisée corrélée avec une activité physiologique polarisée des cellules (transports moléculaires par exemple). Cette différenciation peut être comprise comme une opposition de type « dehors-dedans » entre l'embryon et son environnement. Chez les mammifères, les cellules de la couche épithéliale externe du blastocyste ne participent pas à la formation de l'embryon proprement dit, mais sont essentielles à son implantation dans la paroi utérine⁷. Le blastocyste est formé d'une couche cellulaire externe et d'une cavité en partie remplie par la masse de cellules internes qui produira l'embryon : il s'agit déjà d'une morphogenèse dont la logique est largement incomprise.

- La morphodynamique cellulaire.

Les mouvements de la gastrulation

Les embryologistes distinguent les étapes de clivage, au cours desquelles les cellules ne se déplacent guère activement⁸, des étapes de la gastrulation caractérisées par des phénomènes de transformation morphologique des cellules et des mouvements cellulaires de plus ou moins grande amplitude. Chez les vertébrés en particulier, les mouvements de la gastrulation vont dessiner l'organisation de l'individu. Ils n'étaient jusqu'à récemment qu'induits à partir d'analyses statiques. Il est aujourd'hui possible de filmer les déplacements cellulaires pour les espèces dont les tissus embryonnaires sont transparents⁹. Chez le Xénope, dont les tissus sont opaques, Ray Keller a pu filmer la couche cellulaire externe et a réalisé, à l'aide de la microscopie électronique, une étude minutieuse des déformations cellulaires en jeu au cours des processus d'extension-convergence produisant l'allongement de l'axe antéro-postérieur de l'organisme¹⁰. Les modèles proposés pour ces processus sont fondés sur une interprétation biomécanique, essentiellement intuitive. Une approche plus formalisée pourrait maintenant contribuer à fonder rationnellement leur reconstruction par simulation.

Analyse des mouvements cellulaires à partir des lignages cellulaires

Les mouvements cellulaires de grande ampleur dans l'embryon de vertébré ne sont pas limités à la gastrulation. Certaines populations cellulaires, telles que les cellules germinales ou les cellules de la crête neurale manifestent des comportements migratoires spectaculaires, au cours de stades embryonnaires plus tardifs. L'origine embryologique et le comportement des cellules de crêtes neurales a été étudié d'une manière systématique par Nicole Le Douarin depuis la fin des années 1960. Ses travaux sont fondés sur l'obtention d'embryons chimères au moyen de la transplantation de portions de tubes nerveux de caille dans un embryon de poulet. Ces travaux ont notamment permis d'identifier l'origine embryologique du crâne des vertébrés.

⁶ Meinhardt, H. (2001) Organizer and axis formation as a self-organizing process. *Int. J. Dev. Biol.* 45 : 177-188.

⁷ Deux ouvrages de synthèse fournissent un état des lieux récent de ces questions et contiennent de nombreuses références bibliographiques : « Embryology, constructing the organism », S. Gilbert et A. Raunio Eds, Sinauer associates, Inc. Publishers; *Developmental Biology*, Scott Gilbert, Seventh edition, Sinauer associates, Inc. Publishers.

⁸ L'investigation des mouvements cellulaires *in vivo* montre cependant que dès les étapes de clivage, les cellules ne sont pas inertes mais déformées par diverses protrusions mobiles par lesquelles elles interagissent, voir les films de Philippe Herbomel, Institut Pasteur, Paris : <http://www-alt.pasteur.fr>

⁹ C'est en particulier le cas du poisson téléostéen *Danio rerio* ou zebrafish. Plusieurs films peuvent être téléchargés sur « zfin.org ».

¹⁰ Keller, R., Davidson, L., Edlund, A., Elul, T., Ezin, M., Shook, D., and Skoglund, P. (2000). Mechanisms of convergence and extension by cell intercalation. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 355, 897-922.

Les travaux de Nicole Le Douarin illustrent toute la puissance de l'analyse du lignage cellulaire. La génétique moléculaire fournit maintenant de nouveaux outils pour reconstruire la morphogenèse à partir d'une analyse de clones de cellules. Par exemple, une analyse clonale dite rétrospective a été réalisée pour la formation des somites, du cerveau ou du cœur de souris¹¹.

Si toutes ces observations ne fournissent pas d'explication de l'émergence des formes, elles permettent cependant d'appréhender leur construction comme résultant de l'agencement des cellules, de leur cohésion et de leur mobilité. On pourrait envisager à partir de là une interprétation en terme morphodynamique en fonction des divisions cellulaires et des forces physiques exercées par et sur les cellules. Les questions des biologistes confrontés à la dynamique cellulaire sont cependant d'une autre nature : elles interrogent les processus moléculaires sous-jacents aux comportements cellulaires.

➤ **Les approches moléculaires de la morphogenèse.**

La naissance d'une génétique physiologique.

La Biologie du Développement trouve ses fondements dans la rencontre entre génétique formelle et embryologie qui s'opère dès la fin des années 1930. Richard Goldschmidt œuvre alors en faveur d'une génétique physiologique s'intéressant à "l'activité des gènes" plutôt qu'à leur localisation, par opposition aux préoccupations de Thomas Morgan. Il s'agit alors d'interpréter le phénotype de mutants, dont le génotype diffère d'un individu sauvage par la présence d'une mutation à un locus donné. Richard Goldschmidt s'est ainsi trouvé confronté à la difficulté de relier génotype et phénotype mais il a aussi tenté de tirer parti de la possibilité de phénocopier des mutations par divers traitements de l'embryon correspondant à une manipulation des paramètres physiques et chimiques de son environnement.

Les concepts de l'embryologie classique.

L'essentiel des questions abordées par la Biologie du Développement contemporaine sont en fait une réinvestigation, avec les outils de la génétique moléculaire, des questions de l'embryologie classique. Cette dernière trouve ses fondements dans l'école allemande de l'Entwicklungsmechanik qui a imposé ses approches et ses concepts au début du XX^{ème} siècle. Il s'agissait alors de comprendre la morphogenèse dans sa globalité en fonction de l'interaction des différentes parties de l'embryon. Les méthodes à l'œuvre consistaient essentiellement en extirpation, transplantation et explantation de morceaux d'embryons. La plupart des concepts de la Biologie du Développement contemporaine ont été élaborés dans ce contexte. Il s'agit en particulier des concepts d'*organisateur* et d'*induction* embryonnaire. Les concepts de *champ morphogénétique*, *morphogène* et *information de position* en découlent aussi.

Le " rôle " des gènes dans la morphogenèse.

Les stratégies de la génétique fonctionnelle puis de la génétique moléculaire ont fourni une voie d'accès privilégiée pour explorer l'intervention d'un grand nombre de "gènes" dans les processus de morphogenèse. Après vingt cinq ans d'approches stéréotypées à la recherche de "gènes du développement", nous avons une image fragmentaire des réseaux d'interactions génétiques et moléculaires dont la logique reste en grande partie à élucider. Le mode de fonctionnement d'un système génétique tel que celui des complexes Hox ou celui de l'expression cyclique de gènes dans la formation des somites permet d'entrevoir comment les processus moléculaires peuvent régir le déroulement temporel d'événements morphogénétiques.

➤ **Intégration des différents niveaux d'organisation.**

¹¹ Bonnerot, C et Nicolas, J.F. (1993) Clonal analysis in the intact mouse embryo by intragenic homologous recombination. C.R. Acad.Sci. 316 : 1207-1217.

La Biologie du Développement contemporaine fournit plusieurs exemples de processus morphogénétiques où les niveaux d'organisation moléculaires et cellulaires peuvent être intégrés en un modèle cohérent. Ces exemples se trouvent nécessairement chez l'un des organismes modèles les plus étudiés : Drosophile, Xénope, Poulet, Nématode, Souris, Zebrafish. L'état de l'art sera examiné à partir de deux exemples et on discutera le type d'explication que ces modèles donnent des processus morphogénétiques

La formation de l'aile de la drosophile, comparaison avec celle du poulet

Chez la drosophile, la formation de l'aile est réalisée au cours de la métamorphose de la larve à partir d'un territoire cellulaire : par le jeu des interactions cellulaires et moléculaires, ce territoire est déjà compartimenté en différents domaines qui vont donner lieu aux différentes parties de l'aile.

Chez le poulet, la formation de l'aile obéit à des processus très différents qui ont suggéré un des premiers exemples de champ morphogénétique.

La mise en place de l'axe antéro-postérieur de la drosophile comparée à celle des vertébrés

La formation de l'axe antéro-postérieur de la drosophile dépend du gradient d'un morphogène clairement identifié. Il s'agit du gradient de la protéine Bicoïd. La formation des segments du corps de la drosophile apparaît comme un processus hiérarchique d'interactions moléculaires et génétiques qui impose simultanément l'organisation des différentes régions du corps.

Ce processus de segmentation est très différent de la formation, dans l'embryon d'un vertébré, des parties répétées que sont les somites : leur formation s'effectue selon un processus qui progresse rostro-caudalement au cours du temps.

Quelques autres systèmes tels que la formation de la vulve chez le nématode, la formation de l'œil ou des soies chez la drosophile pourraient aussi être réexaminés dans la perspective d'une reconstruction par des modèles.

➤ **Ontogenèse et phylogenèse.**

L'émergence de formes différentes au cours de l'évolution résulte nécessairement d'une modification des processus de l'ontogenèse.

De l'embryologie comparée à l'Evo-Devo.

En 1928 Carl Von Baer énonce quatre lois reliant morphogenèse et phylogenèse¹². A l'origine des lois de Von Baer se trouve l'observation qu'au cours de la formation des somites, les embryons de vertébrés ont un maximum de ressemblance. Ils acquièrent ensuite progressivement les caractéristiques qui les distinguent des autres espèces de vertébrés. Ce stade caractéristique du sous-phylum des vertébrés est aujourd'hui interprété comme résultant de contraintes phylétiques¹³.

Au cours du XIX^{ème} siècle, de nombreux naturalistes tentèrent de relier la morphogenèse de l'embryon à la phylogénie à travers l'étude des lignages cellulaires. Les travaux de E. B. Wilson fondèrent l'utilisation d'homologies embryonnaires pour établir les relations phylogénétiques.

Les questions de l'embryologie comparée sont aujourd'hui reprises dans le contexte de l'Evo-Devo. Cette discipline récente est née de la génétique du développement et utilise essentiellement des stratégies descriptives fondées sur la comparaison des domaines d'expression de gènes orthologues. Au delà des limites actuelles de ses méthodes et de ses concepts, l'Evo-Devo laisse entrevoir la possibilité d'une refondation de la théorie de l'évolution prenant en compte les processus morphogénétiques tels que les explicitent la biologie du développement.

¹² Von Baer, K. E. *Entwicklungsgeschichte der Thiere : Beobachtung und Reflexion*. Bornträger, Königsberg.

¹³ Gould, S. J. et Lewontin, R. C. (1979). *The Spandrels of the San Marcos and the Panglossian paradigm*. *Proc. R. Soc. London* 205 : 581-598.

Anatomie comparée et paléontologie.

Les travaux d'embryogenèse comparée ne peuvent que spéculer sur la morphologie des formes ancestrales. Il n'existe pas de données paléontologiques sur les formes embryonnaires. Cependant, la morphologie des formes fossiles permet de dater l'émergence des différents phyla de formes vivantes. Il apparaît que les différents plans d'organisation observés aujourd'hui étaient déjà établis il y a 540 millions d'années¹⁴.

Plus généralement les méthodes mathématiques développées en anatomie comparée et en paléontologie par d'Arcy Thompson permettent de proposer des modèles pour les transformations morphologiques survenues au cours de l'évolution ou encore lors de la croissance des individus. Dans cette logique, S. J. Gould a étayé les concepts d'allométrie et d'hétérochronie¹⁵ qui pourraient rendre compte d'une grande part des variations observées dans les formes vivantes et dont les fondements embryologiques restent à identifier.

¹⁴ Kauffman, S. A. (1993) *Origins of order*, Oxford University Press.

¹⁵ L'hétérochronie est un changement dans les durées relatives de deux processus développementaux d'une génération à l'autre. La néoténie qui correspond à une rétention de caractères juvéniles au moment de la maturité sexuelle en est un cas particulier.

L'allométrie correspond à une croissance différentielle de différentes parties du corps. On peut concevoir selon ce principe la transformation du crâne au cours de l'évolution.

Emergence en physique : Comportements collectifs et fluctuations hors équilibre.

Colloque "Vers une science des systèmes complexes"
Auditorium du CNRS 21-23 mars 2007

3, rue Michel-Ange - 75016 Paris
M^o Michel-Ange Auteuil

Contributeurs : Hugues Chaté, Olivier Dauchot et Daniel Bonamy.

A l'équilibre thermodynamique et à son voisinage, l'uniformité spatiale et la stationnarité temporelle sont la règle. Les fluctuations autour de ces états sont bien contrôlées et en un certain sens triviales. Les propriétés de transport sont gouvernées par un principe de réponse linéaire. A l'inverse, dès que l'on s'intéresse à des situations hors équilibre, (en présence de contraintes extérieures, ou au cours de relaxation extrêmement lentes – dynamique vitreuse), on constate à toutes les échelles l'émergence de comportements collectifs qui donnent naissance à des formes et des dynamiques complexes, fractales ou multi-fractales ainsi qu'à des propriétés de transport anormales. Les fluctuations autour de ces comportements globaux sont le plus souvent singulières; elles présentent des événements extrêmes significatifs qui peuvent dominer les effets moyens et sont très sensibles aux effets de taille finie. Comprendre les mécanismes sous-jacents et identifier les comportements universels propres à ces situations hors équilibre est un des enjeux majeurs de la physique du 21^{ème} siècle.

Mots clés : *Morpho-dynamique, Mouvements collectifs, Fluctuations hors équilibre, Dynamique lente, Statistique des extrêmes.*

Résultats attendus : Identifications de mécanismes élémentaires et de comportements universels hors équilibre, synthèse, auto-assemblage et analyse de matériaux complexes, modélisation des systèmes désordonnés, applications au-delà de la physique

Grands défis :

- Auto-organisation, transport et dynamique spatiotemporelle de la matière complexe
- Fluctuations hors équilibre
- Matériaux métastables, relaxation lente et dynamique vitreuse

Défi n°1 : Auto-organisation, transport et dynamique spatiotemporelle de la matière complexe.

La physique non linéaire s'est intéressée aux motifs (patterns) issus d'instabilités prenant place dans des milieux simples (par exemple des fluides purs). Les concepts de criticalité auto-organisée et de

croissance d'interfaces rugueuses ont ouvert des voies pour la compréhension des nombreuses lois d'échelles et structures fractales observées dans la nature. L'étude des comportements collectifs et de synchronisation des systèmes chaotiques modèles a engendré des perspectives nouvelles sur les dynamiques spatio-temporelles multi-échelles.

Aujourd'hui il s'agit de comprendre ce type de phénomènes émergents dans le cadre d'assemblées de constituants élémentaires plus complexes en interaction (entités auto-propulsées, nano-particules, biomolécules...). Ainsi se posent les questions de l'émergence du mouvement collectif (à toutes les échelles depuis la coopération de moteurs moléculaires, jusqu'aux groupes de grands animaux), de l'auto-organisation des bio-films et tissus cellulaires, de l'émergence des formes et de leur dynamique.

Avec en tête ces problèmes ayant toute leur acuité en biologie, en écologie, voire en sociologie, les physiciens privilégient les expériences modèles et bien contrôlées, exécutées sur des systèmes maintenus hors d'équilibre: fluides complexes (mousses, pâtes, milieux granulaires...) soumis à des flux d'énergie (cisaillement, vibrations...). La simplicité (relative) des systèmes étudiés permet en retour une compréhension plus fine, allant à l'essentiel, et, souvent, l'observation complète de la dynamique spatio-temporelle, pré-requis incontournable pour une véritable confrontation aux idées théoriques et aux modèles (numériques) qui en découlent.

Défi n°2 : Fluctuations hors équilibre

Le 20ème siècle a vu le développement d'outils et formalismes performants permettant de décrire de manière cohérente les systèmes au voisinage de l'équilibre thermodynamique. Ces systèmes présentent des comportements « moyens » bien définis et il est possible de relier ces fluctuations à la réponse du système à une petite perturbation extérieure (théorème dit de fluctuation-dissipation).

Hors équilibre, les fluctuations –spatiales et temporelles - peuvent alors devenir extrêmement importantes et il n'est plus du tout évident de définir le comportement « typique » du système comme une moyenne sur ces fluctuations. Comment par exemple définir la résistance à la rupture d'un matériau lorsque celle-ci est entièrement dictée par le défaut le plus important ? Comment faire une prévision météorologique lorsque celle-ci est sensible à une petite perturbation locale? Comment établir une stratégie de gestion de risque sur les marchés hautement volatiles? Un des enjeux de la physique du 21ème siècle sera de développer les formalismes permettant de caractériser la statistique des fluctuations observées dans ces systèmes hors équilibre. Il s'agira en particulier d'être en mesure (i) de définir clairement la notion de comportements « typiques », (ii) de reproduire les mises à l'échelle de ces comportements dits typiques et (iii) d'étendre la notion de théorèmes fluctuation-dissipation dans ces systèmes hors équilibre.

Défi n°3 : Matériaux métastables, relaxations lentes et dynamique vitreuse

Les systèmes désordonnés et en particulier les matériaux hétérogènes (verres, colloïdes, émulsions, milieux granulaires, alliages de polymères...) ont une très grande difficulté à rejoindre l'équilibre. Soumis à des contraintes internes d'ordre structurelles ou cinétiques, éventuellement frustrés dans la satisfaction de ces contraintes, la richesse de leurs configurations possibles rend tout retour à l'équilibre inaccessible sur des échelles de temps raisonnables en regard de leur environnement.

Dans ces situations intrinsèquement instationnaires, la dynamique est dominée par des effets de vieillissement ou de mémoire et la réponse à une sollicitation extérieure dépend de l'histoire du matériau.

La compréhension de l'interdépendance entre structure et dynamique qui prend place à toutes les échelles est un défi majeur pour les physiciens, et la condition sine qua non pour la maîtrise de nombreux procédés industriels existants et le développement de matériaux intrinsèquement complexes (verres adaptatifs, bétons auto-réparants, nanomatériaux intelligents...). Au delà de la physique, de nombreux problèmes fondamentaux en informatique théorique (problèmes de satisfiabilité) et en biologie (repliement de protéines et de macromolécules) relèvent de cette thématique.



UNE NATURE EN CONSONANCE AVEC ELLE-MEME

Par Murray GELL-MANN

Traduit de Complexity, Vol.1, n°4, John Wiley and Sons, Inc 1995

Pourquoi l'élégance et la simplicité sont-elles des critères convenables de description de la nature tout particulièrement au niveau fondamental ? La science a accompli un progrès notable dans l'élucidation des lois de base qui gouvernent le comportement de toute la matière partout dans l'univers – les lois des particules élémentaires et de leurs interactions - qui sont à l'origine de toutes les forces dans la nature. Et il est notoire qu'une théorie physique des particules élémentaires est plus susceptible de réussir à décrire et à prédire les observations si elle est simple et élégante. Pourquoi en serait-il ainsi ? Et que signifient exactement les termes de simplicité et d'élégance à ce propos ?

Pour répondre à ces questions, nous devons d'abord traiter de l'idée très répandue selon laquelle toute théorie scientifique n'est rien d'autre qu'un ensemble de constructions avec lesquelles l'esprit humain essaie de comprendre le réel, idée associée au philosophe allemand Emmanuel KANT. Bien que j'en aie entendu parler à de nombreuses reprises, je m'y suis heurté pour la première fois il y a trente six ans à Paris.

J'étais alors un Professeur visiteur au Collège de France, fondé par François 1^{er} il y a plus de quatre cents ans. (Autant que je sache, j'étais le premier Professeur visiteur dans l'histoire de cette noble institution). Mon bureau était situé dans le laboratoire de Physique Expérimentale fondé par Francis PERRIN, un savant réputé qui était Professeur Titulaire au Collège de France. En visitant les bureaux des jeunes chercheurs en bas du hall, je remarquais qu'il passaient une certaine partie de leur temps à faire de petits dessins sur leurs cahiers que je pensais au début être des diagrammes résultant de quelque expérimentation. Il se trouve cependant que beaucoup de ces dessins se révélèrent être des croquis de potences pour y pendre le Directeur adjoint du Laboratoire qui les rendait fous par sa rigidité.

J'appris bientôt à connaître le Sous-directeur, et nous nous sommes entretenus de divers sujets dont l'un était le Projet OZMA, une tentative précoce de détection d'éventuels signaux en provenance d'autres civilisations techniques habitant des planètes situées en orbite d'étoiles voisines. Ce projet est maintenant baptisé « Recherche d'une Vie Extraterrestre ». Nous avons discuté sur la façon dont la communication pourrait avoir lieu si les signaux diffusés par les intelligences extraterrestres étaient suffisamment proches du système solaire, en supposant que les deux interlocuteurs aient la patience d'attendre des années pour une transmission aller retour des signaux. J'ai suggéré que nous essayons bip, bip bip, bip bip bip etc..pour indiquer les nombres 1,2,3 etc, et peut-être ensuite 1.2 ,3,..., 42,44...60, 62...92, parce qu'il s'agit des numéros atomiques des 90 éléments stables –de 1 à 92 – sauf pour le 43 et 61. « Attendez, » dit le sous-directeur, « c'est absurde. Ces nombres allant jusqu'à 92 ne signifieraient rien pour ces extraterrestres...Pourquoi... s'ils ont comme nous 90 éléments chimiques stables, ils devraient alors avoir la Tour Eiffel et Brigitte Bardot ».

C'est ainsi je me suis familiarisé avec le fait que les écoles françaises enseignaient une sorte de philosophie néo-kantienne, selon laquelle les lois de la Nature n'étaient rien d'autre que des « catégories » kantiennees utilisées par l'esprit humain pour décrire le réel.

Les mathématiques et la description mathématique des phénomènes physiques utilisées par une civilisation technologique extraterrestre sont-elles susceptibles de ressembler à ce à quoi les êtres humains ont abouti sur la Terre, même avec une notation très différente ? A présent nous ne pouvons que spéculer sur la réponse, mais la question est pleine de sens et de profondeur et méditer à son propos peut être très instructif.

Je considère comme probable la présence de nombreuses civilisations évoluées sur des planètes tournant autour d'étoiles réparties dans l'univers. Considérons seulement :

- le nombre énorme d'étoiles appartenant à une galaxie et le nombre de galaxies de l'Univers
- la probabilité non négligeable pour qu'une étoile possède une planète un peu semblable à la Terre
- la facilité avec laquelle des systèmes adaptatifs complexes peuvent être mis en branle comme le fut le démarrage de la vie sur Terre il y a quelques quatre milliards d'années
- le fait que l'évolution des systèmes adaptatifs complexes équivaut à un processus qui permet à des formes de plus en plus complexes d'émerger au cours du temps.

De mon point de vue, les principales inconnues dans la recherche d'une intelligence extraterrestre résident dans la densité spatiale réelle des planètes sur lesquelles se situent une telle intelligence et dans la durée de vie d'une telle civilisation avant qu'elle ne se détruise elle-même, ou qu'elle cesse d'utiliser la technologie. Ces inconnues affectent la probabilité pour que les signaux émis par une civilisation technologique extraterrestre soient suffisamment proches pour que ces signaux soient détectables ici, mais une telle civilisation peut cependant s'être développée quelque part, si ce n'est à proximité. Ainsi je crois que la question de savoir de quel type de science mathématique une telle civilisation dispose est probablement une question concernant l'univers réel, bien que nous puissions ou ne puissions pas confronter nos réponses avec des faits quelconques.

Les lois scientifiques sont-elles seulement des constructions de l'esprit humain en sorte que des intelligences extraterrestres cherchant les lois de la Nature arriveraient à quelque chose de très différent ? Ou bien la Nature détermine-t-elle dans une grande mesure comment un être intelligent devrait décrire ses lois ? Et qu'en est-il des relations entre Science et Mathématiques ? La description des lois fondamentales de la Nature nécessite-t-elle l'usage des mathématiques au sens habituel du terme, ou existe-t-il quelque voie totalement différente de description des mêmes lois ?

Ce sont des questions difficiles et nous ne pouvons y apporter des réponses définitives, mais il est instructif d'examiner la façon dont l'entreprise scientifique humaine a pénétré de plus en plus profondément le domaine des lois fondamentales. Comme exemple de découverte d'une nouvelle théorie mathématique de physique fondamentale, prenons le cas de la théorie de YANG-MILLS discutée d'abord par CHEN NING (FRANK) YANG et Robert MILLS il y a environ quarante ans. Ils l'ont développée avec l'espoir qu'elle contribuerait quelque peu à la recherche des lois fondamentales, mais au début c'était une construction purement abstraite sans application connue. Il s'agissait d'une généralisation de la théorie merveilleusement fructueuse du champ électromagnétique développée par James Clerk MAXWELL au milieu du dix-neuvième siècle. Bon nombre d'entre nous, les théoriciens des particules élémentaires, ont montré comment généraliser plus avant l'idée de YANG-MILLS pour y inclure des niveaux de symétrie supérieurs et aussi des ruptures de symétrie. Nous avons aussi suggéré ces dernières années les façons dont des théories de YANG-MILLS légèrement généralisées pouvaient rendre compte des forces – les forces dites « fortes » ou « faibles » - que l'on savait exister en plus de l'électromagnétisme et de la gravitation. Tandis que les deux dernières sont des forces à longue portée-

c'est-à-dire qu'elles disparaissent lentement lors de l'accroissement de la distance, - les forces fortes et faibles sont des forces à courte portée qui, en fait, sont négligeables à des distances très supérieures à la taille d'un noyau nucléaire. Avant d'aller plus loin dans l'utilisation de la théorie de YANG-MILLS, revoyons l'histoire des forces à longue portée.

La gravitation est universelle, au sens où toute matière possède de l'énergie, et où toute énergie est sujette à la gravitation. Puisque toute matière exerce une attraction sur toute autre matière et est attirée par celle-ci, les forces gravitationnelles s'additionnent. Il en résulte que la gravité est très facile à observer.

L'électromagnétisme est quasi universel. Il est produit par – et agit sur – les charges électriques, qui ne font pas défaut : dans chaque atome, chaque électron possède une charge électrique et il en est de même pour chaque noyau atomique. Cependant, contrairement à la force de gravitation, la force électromagnétique sur un échantillon de matière ne croît pas simplement en fonction de la masse de l'objet. Comme les charges électriques de même nature se repoussent tandis que les charges opposées s'attirent, d'importantes neutralisations ont lieu dans la matière prise dans sa globalité qui est, quant à elle, pratiquement électriquement neutre. C'est pourquoi les phénomènes électromagnétiques sont restés, en quelque sorte, plus en retrait de l'expérience quotidienne des êtres humains de l'ère présocratique que la gravitation, qui nous attire tous vers le centre de la Terre.

Il n'est pas surprenant que la première force décrite par une théorie adéquate ait été la gravitation., qui est à la fois une force à longue portée et universelle, et que la seconde ait été la force électromagnétique qui est aussi une force à longue portée. Les forces à courte portée n'ont pas été découvertes avant le vingtième siècle, et c'est seulement dans les dernières décades, avec le développement du modèle de référence, que nous, les physiciens théoriciens, avons produit une représentation raisonnablement bonne de ce qui était fourni par l'observation.

La gravitation avait été à peu près convenablement décrite il y a à peu près trois cent ans avant que MAXWELL n'écrive ses équations décrivant l'électromagnétisme. Le premier théoricien brillant à apporter la première théorie sérieuse de la gravitation a bien sûr été Isaac NEWTON, qui a deviné et ensuite démontré que la même force qui nous est familière sur Terre régit aussi le mouvement des planètes et des lunes. Les historiens de la Science continuent à discuter pour savoir si c'est vraiment la chute d'une pomme dans la ferme de sa mère qui a inspiré sa magnifique intrusion dans l'universalité de la gravitation. Mais en revenant plus tardivement sur la découverte de cette loi, ce qui a le plus frappé NEWTON c'est la présence dans la Nature d'une sorte de cohérence logique. Il a exprimé ceci comme suit :

« J'ai montré, à la satisfaction de mes lecteurs, dans mes Principes Mathématiques de Philosophie comment les grands corps de la Terre, du Soleil et les planètes gravitent les uns autour des autres, ce que sont les lois et les quantités de leurs forces gravitationnelles quelles que soient leurs distances réciproques et comment tous les mouvements de ces corps sont régis par les forces de gravité : Et la Nature étant très simple et très cohérente avec elle-même, elle observe la même méthode de régulation des mouvements des petits objets que celle employée pour les grands objets. Ce principe de la nature étant très éloigné des conceptions des philosophes que je me suis abstenues de décrire dans ce livre, je devrais pour le moins passer pour un penseur hors norme et je devrais ainsi susciter, de la part de mes lecteurs, un préjugé défavorable à l'encontre de toutes ces choses qui ont été le principal concept du Livre. »

Ainsi, lorsque NEWTON réfléchissait à l'unité des forces terrestres de gravité et de celles qui régissent les corps célestes, il a considéré ceci comme un exemple de la consonance de la Nature. Nous pourrions traiter de la même manière l'unité de description des phénomènes électriques et magnétiques révélée par les équations de MAXWELL.

Mais n'oublions pas de remarquer que la loi de la force gravitationnelle découverte par NEWTON possède le même formalisme que celui des attractions et répulsion électriques découvertes beaucoup plus tard par COULOMB. En fait, NEWTON réfléchissait à de telles caractéristiques plus générales lorsqu'il répétait continuellement dans ses écrits l'idée que la Nature était « en cohérence » ou « en consonance » avec elle-même. A partir des « Opticks » :

« Parce que la Nature est très consonante et congruente avec elle-même...Parce que nous devons apprendre des Phénomènes de la Nature quels sont les corps qui s'attirent les uns les autres, et quelles sont les Lois et les Propriétés de l'Attraction, avant d'enquêter sur la Cause par laquelle l'Attraction se produit. Les Attractions de la Gravité, du Magnétisme et de l'Electricité sont du domaine des distances très sensibles, et ainsi elles ont été observées par des yeux ordinaires, et il peut y en avoir d'autres qui sont du domaine des faibles distances qui échappent jusqu'ici à l'observation ; et peut-être l'Attraction électrique se range-t-elle dans de telles courtes distances, même sans être excitée par Friction ».

Quelle richesse de savoir est résumée dans ces mots ! NEWTON suggère qu'aux faibles distances les interactions électriques pourraient jouer un rôle important, allant bien au-delà de l'attraction de morceaux de papier vers un bouchon d'ambre frotté contre la fourrure d'un chat. Il anticipe sur l'existence d'une multitude de forces de courte portée telles que nous en avons maintenant connaissance. (A vrai dire, les considérations théoriques actuelles sont en faveur d'une infinité de telles forces.) Il met en exergue le fait que des lois empiriques précèdent généralement des explications dynamiques détaillées. *Et il semble penser aux divers « phénomènes » comme démontrant une certaine consonance autant entre eux qu'au sein de chacun.* La dernière idée est la clé de compréhension des raisons pour lesquelles le critère de simplicité aurait une efficacité dans la recherche des lois fondamentales de la physique.

En discutant pourquoi il en est ainsi, utilisons la métaphore familière qui compare les découvertes successives en physique fondamentale à des niveaux d'énergie de plus en plus élevés (ou, ce qui est voisin, à des distances de plus en plus courtes) au fait de peler un oignon. En retirant une par une les pelures de l'oignon, nous rencontrons des similitudes entre une couche et la suivante. Nous avons remarqué qu'au cours des siècles, en passant de la force gravitationnelle à la force électrique (dans des conditions familières non relativistes), les scientifiques ont observé une similitude remarquable entre ces forces : toutes varient en raison inverse du carré de la distance. Pendant les dernières décades, en allant de la théorie électromagnétique vers la théorie combinée des forces électromagnétiques faibles vers la théorie de l'attraction forte, nous avons rencontré des similitudes profondes en évoluant depuis les équations de MAXWELL jusqu'à de légères généralisations des équations de YANG et MILLS, qui sont elles-mêmes une généralisation ingénieuse des équations de MAXWELL. Le type de théorie n'a pas encore été modifié drastiquement.

Lorsque nous pelons l'oignon, pénétrant à des niveaux de plus en plus profonds de la structure du système de particules élémentaires, les mathématiques avec lesquelles on se familiarise en raison de leur utilité à un niveau donné suggèrent de nouvelles mathématiques, dont certaines peuvent

s'appliquer au niveau inférieur suivant – ou à un autre phénomène au même niveau . Parfois même les vieilles mathématiques suffisent.

Une généralisation peut être réalisée par un physicien théorique, ou par un mathématicien, ou par tous les deux s'ils travaillent dans l'ignorance des efforts l'un de l'autre. Mais l'utilité pour la Science d'une généralisation n'est pas que fonction de ces activités humaines. Elle dépend du fait que la nature exprime réellement des similitudes entre un niveau et le suivant, entre une pelure d'oignon et la suivante. C'est ce que NEWTON, avec une précocité remarquable, a remarqué en apparence. Les lois fondamentales de la Nature sont telles qu'une sorte d'auto-similarité prévaut dans l'ensemble des théories efficaces de description des couches successives.

Nous pouvons maintenant nous pencher à nouveau sur la question de savoir pourquoi la simplicité est un critère utile à appliquer dans la recherche des lois fondamentales de la physique. La simplicité , bien sûr, s'oppose à la complexité. En discutant de la simplicité d'une théorie, nous nous référons à la quasi absence de ce que j'ai appelé la complexité effective. La complexité effective d'une chose correspond à la longueur d'une description très concise de ses régularités. Bien sûr, toute définition de la sorte, est quelque peu dépendante du contexte. Par exemple, la longueur de la description succincte dépend du langage utilisé , de l'expérience et de la compréhension du monde qui est supposée. Mais c'est précisément le point crucial. Puisque les mathématiques nécessaires pour décrire une pelure de l'oignon sont semblables à celles développées pour les pelures précédentes, la théorie peut être écrite de manière extrêmement concise avec une notation déjà familière dans le travail précédent. Une des raisons pour lesquelles les équations de YANG-MILLS paraissent simples et élégantes réside dans le fait qu'elles sont aisément décrites par un langage mathématique convenant pour les équations de MAXWELL.

Mais où s'arrête donc ce processus consistant à peler l'oignon ? Il semble probable aujourd'hui qu'il se termine par une théorie unifiée de toutes les forces de la nature. En fait il se peut que nous ayons réalisé ce but sous la forme de la théorie des supercordes. Pour la première fois dans l'histoire, nous avons une candidature plausible de théorie quantique de champ unifié adaptée à toutes les particules et à toutes leurs interactions. Cette théorie prédit la théorie sophistiquée de la relativité générale de la gravitation d'EINSTEIN (qui a remplacé celle de NEWTON il y a quatre-vingts ans) et elle en fait de même dans le cadre de la mécanique quantique sans occasionner de corrections de calcul grotesquement interminables qui pénalisaient les tentatives antérieures de quantifier la gravitation einsteinienne.

La théorie des supercordes prédit un nombre infini d'espèces de forces ; cependant toutes, sauf un nombre limité, sont de trop courte portée pour être détectées expérimentalement dans un proche avenir. Nombre des forces détectables à courte portée y compris les attractions fortes et faibles déjà connues, peuvent être décrites dans le cadre de la théorie des supercordes au moyen de mathématiques semblables à celles des équations de MAXWELL et de YANG-MILLS. Qui plus est, la théorie de la gravitation d'EINSTEIN partage avec l'ensemble des deux théories de MAXWELL et de YANG-MILLS la propriété mathématique très importante d'être une théorie de jauge.

Nous pouvons désormais faire volte face. Nous pouvons alors partir du cœur de l'oignon - la simple théorie quantique du champ unifié de toutes les particules élémentaires et de leurs interactions , qu'il s'agisse de la théorie des supercordes ou d'une autre – et progresser vers l'extérieur. Cette théorie fondamentale unifiée n'est pas seulement dotée de simplicité. Elle possède aussi la propriété de faire en sorte que ses conséquences expriment des similarités entre les pelures de l'oignon, c'est-à-dire, entre les

phénomènes (les forces par exemple) qui se manifestent dans un domaine d'énergies ou de distances, et dans un autre domaine. Ces similarités, qui sont liées aux mathématiques nécessaires dans un contexte à celles qui le sont dans un autre peuvent être considérées comme des propriétés intrinsèques de la loi fondamentale sous-jacente, plutôt que comme liées aux propriétés de l'esprit humain (ou de toute autre intelligence explorant les lois fondamentales de la nature).

Pour résumer, alors, nous avons cette image des lois physiques : une simple théorie unifiée (qui pourrait être celle des supercordes) décrit toutes les particules élémentaires et toutes les forces de la Nature. C'est une propriété de la Nature, et non de l'esprit humain, bien que la façon dont elle est formulée par les êtres humains puisse être particulière à notre espèce. Elle se caractérise par le fait que ses diverses manifestations à différents niveaux d'énergie ou de distance possèdent un niveau élevé de similarité les unes avec les autres et avec la théorie sous-jacente elle-même. La structure mathématique de la théorie unifiée se reflète dans certaines propriétés des structures nécessaires pour décrire ces manifestations. Tout groupe d'êtres intelligents tentant de décrire le système est susceptible de s'y mettre en partant de distances élevées ou de bas niveaux d'énergie et il va alors rencontrer successivement ces manifestations. En raison de la similitude de ces manifestations, ces êtres trouveront naturel de continuer à généraliser leurs mathématiques, et les étapes successives apparaîtront comme relativement simples. S'ils persistent, ils sont susceptibles de découvrir la théorie fondamentale unifiée avec sa structure mathématique essentielle, qui expliquera les autres structures rencontrées tout au long du parcours et leurs similitudes. Cette loi fondamentale est, alors, ce qui rend compte de l'utilité de certaines sortes de mathématiques en physique. Des êtres intelligents sur une autre planète peuvent parvenir à la même loi, même si chacun d'entre eux dispose de sept tentacules, treize organes sensoriels, et d'un cerveau en forme de « pretzel¹⁶ ». Bien sûr, leur notation a très peu de chance de ressembler à la notre, mais nous savons déjà à partir de nombre d'exemples, que ce qui est par essence identique en mathématiques peut souvent s'exprimer de manière très différente.

Les trois principes – la consonance de la nature avec elle-même, l'applicabilité du critère de simplicité et l'utilité de certaines parties des mathématiques pour décrire la réalité physique – sont alors des conséquences de la loi sous-jacente des particules élémentaires et de leurs interactions. Ces trois principes ne nécessitent pas d'être considérés comme des postulats métaphysiques. Ils constituent, en revanche, des propriétés émergentes des lois fondamentales de la physique.

Selon moi, on peut éviter beaucoup de confusion, dans différents contextes, en utilisant la notion d'émergence. Certains peuvent demander « la vie sur Terre n'implique-t-elle pas, dans une certaine mesure, plus que de la physique et de la chimie ajoutée à des résultats d'événements aléatoires dans l'histoire de la planète et au cours de l'évolution biologique ? l'esprit, en incluant la conscience et la conscience de soi, n'implique-t-il pas, dans une certaine mesure, plus que la conjonction de la neurobiologie et des accidents de l'évolution des primates ? Doit-il exister quelque chose en plus ? ». Mais ils ne tiennent pas suffisamment compte de la possibilité de l'émergence. La vie peut parfaitement émerger des lois de la physique ajoutées à des accidents, et l'esprit émerger de la neurobiologie. Il n'est pas nécessaire de faire l'hypothèse de mécanismes additionnels ou de causes cachées. Aussitôt l'émergence prise en considération, le sujet pensant qui enquête est soulagé d'un énorme fardeau. Nous n'avons besoin de rien de plus pour obtenir quelque chose de plus.

¹⁶ Sorte de petit pain salé de forme un peu tordue que l'on trouve à New York

Bien que la « réduction » d'un niveau d'organisation au précédent – plus les circonstances spécifiques issues des accidents historiques –soit en principe possible , ce n'est pas une stratégie adéquate en elle-même pour comprendre le monde. A chaque niveau de nouvelles lois émergent qui devraient être étudiées pour elles-mêmes ; de nouveaux phénomènes apparaissent qui devraient être appréciés et évalués à leur propre niveau.

En aucun cas cela ne diminue l'importance de la liaison chimique de savoir qu'elle émerge de la mécanique quantique, de l'électromagnétisme et de la prévalence des températures et des pressions qui permettent aux atomes et aux molécules d'exister. Similairement, cela ne diminue pas l'importance de la vie sur Terre de savoir qu'elle a émergé de la physique et de la chimie et de circonstances historiques spéciales permettant de se réaliser aux réactions chimiques qui ont produit la forme ancestrale de la vie et ainsi initié l'évolution biologique. Finalement, cela n'empêche pas les réussites de la race humaine, y compris les triomphes de l'intellect humain et les glorieuses œuvres d'art produites pendant des dizaines de milliers d'années , de savoir que notre intelligence et notre conscience de soi, supérieures à celle des autres animaux, ont émergé des lois de la biologie combinées aux accidents spécifiques de l'évolution des hominidés.

Lorsque nous autres, les humains, nous extasions face aux splendeurs de la nature , lorsque nous témoignons de l'amour l'un pour l'autre, lorsque nous nous soucions de nos parents plus lointains – les autres organismes avec lesquels nous partageons la biosphère – nous exprimons des aspects de la condition humaine qui ne sont pas moins merveilleux pour être des phénomènes émergents.

QU'EST-CE QUE LA COMPLEXITE ?

Par Murray GELL-MANN

Traduit de : Complexity, Vol 1, n° 1 1995

John Wiley and Sons

Qu'est-ce que la complexité ? Un grand nombre de quantifications ont été proposées en tant que mesures d'une chose telle que la complexité. En fait, diverses mesures différentes seraient requises pour saisir toutes nos idées intuitives à propos de ce qu'on entend par complexité et par son opposé, la simplicité.

Certaines quantités, telle que la complexité computationnelle sont des mesures du temps ou de l'espace. Elles ont trait au problème de savoir combien de temps minimum ou quelle capacité serait nécessaire pour un ordinateur universel standard pour accomplir une tâche particulière. La complexité computationnelle est elle-même liée au temps minimal (ou nombre de pas) nécessaire pour mener à bien un certain calcul.

D'autres ont suggéré que ces quantifications sont des mesures de l'information, concernant, toute approximativement, la longueur du plus petit message transportant une certaine information. Par exemple, le contenu informatif algorithmique ou (AIC) d'une chaîne de caractères est défini comme la longueur du plus court programme nécessaire pour entraîner l'impression et sa fin par un ordinateur standard de la chaîne caractères.

En tant que mesures d'une chose telle que la complexité d'une entité du monde réel, de telles quantités sont dans une certaine mesure dépendantes du contexte ou même subjectives. Elles dépendent de la granularité (niveau de détail) de la description de l'entité, de la connaissance et de la compréhension du monde présumées, du langage et de la méthode de codage utilisée pour la conversion de ce langage en une chaîne de caractères, et de l'ordinateur pris en référence. Cependant, si on considère une séquence d'entités similaires, de taille et de complexité croissantes, si on ne s'intéresse qu'à la manière dont se comporte la mesure lorsque la taille grandit, alors bien sûr, de nombreuses caractéristiques deviennent négligeables par comparaison. C'est ainsi ceux qui étudient la complexité computationnelle s'intéressent plus particulièrement à la question de savoir si le temps nécessaire pour résoudre une séquence de problèmes de plus en plus gros admet une croissance polynomiale en fonction de la taille du problème (plutôt qu'exponentielle ou pire) . Il est probablement raisonnable de dire que toute mesure de la complexité est très utile pour la comparaison de choses dont l'une d'entre elles possède un niveau de complexité élevée.

Un grand nombre de ces quantités ne sont pas calculables. Par exemple, on peut déjà montrer que le contenu informationnel d'une longue chaîne de caractères est inférieur ou égal à une certaine valeur. Mais pour une telle valeur, il n'existe aucun moyen d'exclure la possibilité que le AIC (contenu d'information algorithmique) soit diminué par un théorème encore inconnu à ce jour qui révélerait quelque régularité dans la chaîne de caractères. Une chaîne de caractères incompressible ne possède pas de telles sortes de régularités et est définie comme « aléatoire ». Une chaîne de caractères aléatoires possède un AIC maximal pour sa longueur, puisque le plus court programme qui cause le démarrage et l'arrêt de son impression par l'ordinateur de référence est justement celui qui donne l'instruction PRINT suivie de la chaîne proprement dite.

Cette propriété de l'AIC qui conduit à le nommer à l'occasion « caractère algorithmique aléatoire », révèle l'inadaptation de cette quantité pour mesurer la complexité, puisque les mots de SHAKESPEARE possèdent un plus petit AIC que le langage simiesque de la même longueur qui serait typiquement imprimé par la proverbiale cage de singes.

Une mesure, qui correspond beaucoup mieux à ce qu'on entend usuellement par complexité dans la conversation ordinaire comme dans le discours scientifique, se réfère non pas à la longueur de la description la plus concise d'une entité (qui est en gros ce que représente l'AIC) mais à la longueur d'une description concise d'un ensemble de régularités de l'ensemble. Ainsi quelque chose de totalement aléatoire, presque sans aucune régularité, aurait une complexité effective voisine de zéro. Il en serait ainsi de quelque chose de complètement régulier, comme une chaîne de caractères uniquement composée de zéros. La complexité effective peut n'être élevée que dans une région donnée , intermédiaire entre l'ordre et le désordre complet .

Il peut n'exister aucune procédure pour trouver l'ensemble des régularités d'une entité. Mais des classes de régularités peuvent être identifiées. Trouver des régularités revient normalement à prendre une des données disponibles sur l'entité, et à la traiter, disons-le, comme une chaîne de caractères ensuite à diviser cette chaîne en parties d'une manière particulière et à rechercher parmi ces parties les AIC mutuels . Par exemple, si on divise par exemple une chaîne en deux parties, l'AIC mutuel peut être pris comme la somme des AIC des deux parties moins l'AIC du tout. Au-dessus d'un certain seuil, une quantité d'information algorithmique mutuelle peut être considérée comme un diagnostic de régularité. Etant données les régularités identifiées, la complexité effective correspondante est l'AIC de description de ces régularités.

Plus précisément, toutes les régularités particulières peuvent être considérées comme intégrant l'entité en question dans un ensemble d'entités partageant ces régularités et ne différant que par d'autres aspects. En général , les régularités associent une probabilité à chaque entité de l'ensemble. (Les probabilités sont égales dans de nombreux cas, mais elles peuvent différer d'un élément de l'ensemble à l'autre). La complexité effective de ces régularités peut alors être définie comme l'AIC de description de l'ensemble des entités et de leurs probabilités. (la spécification d'une entité donnée , telle que celle d'origine nécessite de l'information supplémentaire .)

Quelques auteurs ont essayé de caractériser la complexité en utilisant la quantité d'information algorithmique mutuelle plutôt que par la longueur d'une description concise des régularités correspondantes. Un tel choix cependant ne satisfait pas bien cependant à ce qu'on appelle généralement complexité. Prenez simplement par exemple, une chaîne quelconque de caractères entièrement formée de paires 00 et 11. Une telle chaîne possède une régularité évidente mais qui admet une description très brève : les séquences de nombres impairs et de nombres pairs sont identiques. La quantité d'AIC mutuelle entre ces deux séquences est cependant énorme pour une longue chaîne. Evidemment, la complexité ici est mieux représentée par la longueur de la brève description que par la quantité d'information algorithmique partagée.

Puisqu'il est impossible de trouver toutes les régularités d'une entité, se pose la question de savoir qui ou ce qui détermine la classe des régularités à identifier. Une réponse consiste à pointer un ensemble très important de systèmes, dont chacun fonctionne précisément par identification de certaines régularités dans le flot de données qui lui parviennent et par compression de ces régularités en un paquet

concis d'information. Le flux de données inclut de l'information sur le système lui-même, son environnement, et l'interaction entre l'environnement et le comportement du système. Le paquet d'information ou « schéma » est sujet à des variations, en sorte qu'il existe une compétition entre les différents schémas. Chaque schéma peut être utilisé, en même temps que certaines des données, pour décrire le système et son environnement, pour prédire le futur, et pour imposer le comportement du système. Mais les véracités de description et de prédiction peuvent être confrontées à de nouvelles données, avec le rôle rétroactif de la comparaison sur la compétition entre les schémas. Un tel comportement en conformité avec une règle a des conséquences dans le monde réel, ce qui peut à son tour affecter la compétition. Ainsi, les schémas évoluent, avec une tendance générale à favoriser une amélioration de description ou de prédiction aussi bien qu'un comportement plus ou moins en conformité avec les pressions sélectives du monde réel.

Des exemples terrestres de systèmes adaptifs complexes à l'œuvre incluent l'évolution biologique, l'apprentissage et la pensée chez les animaux (y compris les humains), le fonctionnement du système immunitaire chez les mammifères et autres vertébrés, l'entreprise scientifique humaine, et le comportement d'ordinateurs construits ou programmés pour dérouler des stratégies – par exemple au moyen de réseaux neuronaux ou d'algorithmes génétiques. Clairement, les systèmes adaptifs complexes ont tendance à donner naissance à d'autres systèmes adaptifs complexes.

Il est important pour les lecteurs de ce journal de remarquer que John HOLLAND, par exemple, utilise un ensemble différent de termes pour décrire certaines idées similaires. Il utilise le terme d'« agents adaptatifs » pour désigner un système adaptatif complexe défini comme ci-dessus, en réservant le terme de système adaptatif complexe à un système adaptatif complexe composite (tel que l'économie ou un système écologique) consistant en de multiples agents adaptatifs faisant des prédictions sur leurs comportements mutuels. Il l'appelle modèle interne ce que j'appelle schéma. Nous sommes tous les deux en accord avec le vieux dicton qui veut qu'un savant utilise la brosse à dents de quelqu'un d'autre plutôt que la terminologie d'un autre.

Tout système adaptatif complexe peut bien sûr commettre des erreurs en identifiant les irrégularités. Nous autres, êtres humains, portés à la superstition et engagés dans le déni de l'évidence, sommes trop coutumiers de telles erreurs.

En plus des possibilités d'erreur, nous devrions aussi prendre en considération les difficultés de calcul. Quel est le temps nécessaire pour déduire en pratique les prédictions à partir d'un schéma hautement compressé- disons une théorie scientifique -, comportant en même temps quelques données spécifiques additionnelles telles les conditions aux limites ? Ici, nous rencontrons des mesures temporelles de « complexité », par exemple la profondeur logique, qui pour une chaîne de caractères est liée au temps de calcul nécessaire pour qu'un ordinateur universel standard calcule cette chaîne, l'exprime, et ensuite s'arrête. Ce temps est déterminé en moyenne à partir de divers programmes qui vont accomplir la tâche, avec une procédure de calcul de la moyenne qui affecte un poids plus élevé aux programmes les plus courts. Nous pouvons alors considérer la profondeur logique d'une entité quelconque si on en encode la description suffisamment granulée, sous forme d'une chaîne de caractères.

Une sorte de concept inverse à celui de profondeur logique est celui de crypticité, qui mesure le temps nécessaire pour un ordinateur pour inverser le processus et pour aller d'une chaîne de caractères vers l'un des programmes les plus courts susceptibles de la générer. Dans l'entreprise scientifique

humaine, nous pouvons donner un exemple grossier de la crypticité avec la difficulté de construction d'une bonne théorie à partir d'un ensemble de données., tandis que la profondeur logique est une mesure approximative de la difficulté de faire des prédictions à partir de la théorie.

Il est souvent difficile de dire si quelque chose qui est apparemment complexe possède réellement un haut niveau de complexité effective ou si cela reflète à la place une simplicité sous-jacente combinée avec une certaine profondeur logique. Confronté, par exemple, à un diagramme assez détaillé d'un fameux ensemble fractal de MANDELBROT nous pourrions lui attribuer un complexité effective très élevée jusqu'à ce que nous apprenions qu'il peut être généré par une formule très simple. Il possède une profondeur logique (et même pas en quantité énorme) plutôt qu'une complexité effective. En contemplant des phénomènes naturels, nous devons souvent distinguer entre une complexité effective et la profondeur logique. Par exemple, le diagramme en apparence compliqué des niveaux d'énergie des noyaux atomiques pourrait facilement être attribué par méprise à quelque loi complexe au niveau fondamental, mais on croit maintenant qu'il dérive d'une simple théorie sous-jacente de quarks, gluons, et photons , bien que de longs calculs soient nécessaires pour déduire le schéma détaillé à partir des équations de base. Ainsi le schéma possède une grande quantité de profondeur logique et très peu de complexité effective.

Il semble maintenant probable que la loi fondamentale qui régit le comportement de toute la matière de l'Univers – la théorie quantique du champ unifié de toutes les particules et de leurs interactions –soit assez simple. (En fait, nous avons déjà une candidature plausible par la théorie des supercordes.) Il semble également que la condition aux limites qui spécifie la condition initiale de l'Univers au voisinage du commencement de son expansion, puisse elle même être assez simple. Si ces deux propositions sont vraies, cela signifie-t-il qu'il n'existe pratiquement aucune complexité effective dans l'Univers ? Pas du tout, en raison du rôle incessant de la chance.

La loi fondamentale et les conditions initiales étant connues, l'histoire de l'Univers n'est aucun cas déterminée , parce que la loi est celle de la mécanique quantique, qui ne fournit que des probabilités pour des alternatives d'histoires. Qui plus est, on peut assigner des probabilités aux histoires seulement si elles ont une granularité suffisamment grossière pour exprimer une décohérence (une absence de termes d'interférence entre elles). La mécanique quantique introduit ainsi une grande quantité d'indétermination, qui va très au-delà de l'indétermination triviale associée au principe d'incertitude de HEISENBERG.

Bien sûr, dans de nombreux cas les probabilités de la mécanique quantique sont très proches de certitudes, en sorte que la physique classique déterministe est une bonne approximation. Mais même dans la limite classique et même si les lois et les conditions initiales sont spécifiées avec exactitude, l'indétermination peut cependant être introduite par l'ignorance de la théorie précédente. Qui plus est, les effets d'une telle ignorance peuvent être amplifiés par le phénomène de chaos rencontré dans la dynamique non linéaire, selon laquelle les résultats futurs sont arbitrairement sensibles à de minuscules changements des conditions présentes.

Nous pouvons réfléchir aux possibilités alternatives d'histoire à granularité grossière de l'univers qui auraient formé une arborescence avec une probabilité pour chaque embranchement. Notez qu'il s'agit plutôt de probabilités *a priori* que de statistiques, à moins que nous nous engagions dans l'exercice consistant à traiter l'univers comme un univers parmi un énorme ensemble d'univers alternatifs, formant un « multivers ». Bien sûr, même au sein d'un univers unique il se produit des cas

d'événements reproductibles (comme les expériences de physique), et pour ces événements les probabilités *a priori* de la mécanique quantique fournissent des probabilités statistiques conventionnelles.

Toute entité dans le monde qui nous entoure, tel un être humain individuel, doit son existence non seulement à la loi de la physique fondamentale et aux conditions aux limites de l'univers aux âges précoces mais aussi aux résultats d'une séquence incroyablement longue d'événements probabilistes, qui chacun aurait pu avoir une issue différente.

Maintenant une grande partie de ces accidents, par exemple la plupart des cas de rebondissements d'une molécule donnée dans un gaz qui sont dextrogyres plutôt que lévogyres au cours d'une collision moléculaire n'offrent que peu de ramifications pour les futures histoires à granularité grossière. Cependant parfois, un accident peut avoir des conséquences étendues pour le futur, bien que celles-ci soient particulièrement confinées à des régions particulières de l'espace et du temps. Un tel « accident figé » produit une grande quantité d'information algorithmique mutuelle au sein des diverses parties ou aspects d'une future histoire à granularité grossière de l'univers, qui concerne nombre de telles histoires et diverses modalités de leur division.

Mais une telle situation dans laquelle il y a génération d'une grande quantité d'information algorithmique mutuelle , correspond précisément à ce que nous avons appelé une régularité. Ainsi, tandis que le temps s'écoule dans l'histoire de l'Univers et que les accidents (avec des probabilités de résultats variés) s'accumulent, les accidents figés en font de même produisant des régularités. La plus grande partie de la complexité de l'univers réside dans l'AIC qui décrit de tels accidents figés et dans leurs conséquences , tandis que seule une petite partie dérive des simples lois fondamentales de l'Univers., (la loi des particules élémentaires et la condition au début de son expansion) . Pour une entité donnée dans l'Univers, il n'y a bien sûr que les accidents figés pour conduire à ses propres régularités qui contribuent, ensemble avec les lois fondamentales, à sa complexité effective.

Tandis que l'univers vieillit et que les accidents figés s'accumulent , les chances de croissance de la complexité continuent aussi bien s'accumuler. Ainsi, il existe une tendance de l'enveloppe de la complexité à l'expansion même bien que toute entité donnée puisse autant présenter une complexité croissante que décroissante pendant une période donnée.

L'apparition de formes de plus en plus complexes n'est pas un phénomène restreint à l'évolution des systèmes adaptatifs complexes, bien que pour ces systèmes la possibilité survienne lors de l'association d'un avantage sélectif dans certaines circonstances, avec un accroissement de complexité.

La seconde loi de la thermodynamique qui requiert l'accroissement de l'entropie moyenne (ou désordre) , n'interdit d'aucune manière à un ordre local de survenir ,par divers mécanismes d'auto-organisation qui peuvent transformer des accidents en accidents figés et produire des régularités étendues. De nouveau, de tels mécanismes ne se limitent pas aux systèmes adaptatifs complexes.

Des entités différentes peuvent avoir des différentes potentialités de développer une élévation de complexité. Une chose qui, de par sa complexité effective, n'est pas particulièrement saillante parmi ses semblables peut cependant être remarquable au titre de la complexité qu'elle pourra réaliser dans le futur. C'est pourquoi il importe de définir une grandeur nouvelle, la « complexité potentielle » comme une fonction du temps futur relativement à un temps fixé, disons , le présent. La nouvelle grandeur est

la complexité effective de l'entité à chaque époque future dont on prend la moyenne sur toutes les histoires à granularité grossière de l'univers entre le présent et ce temps , pondérée selon leurs probabilités.

L'ère pendant laquelle des formes de plus en plus complexes apparaissent au cours du temps, n'est peut-être pas éternelle. Si , dans un futur très éloigné, tous les noyaux de l'Univers se décomposent en électrons et positrons, neutrinos et antineutrinos, et en photons, alors l'ère caractérisée par des objets individuels bien définis peut tirer à sa fin, tandis que l'auto-organisation se raréfiera et que l'enveloppe de la complexité commencera à rétrécir.

Ces remarques résument certains éléments de mon livre, « Le Quark et le jaguar », destiné au lecteur de base intéressé par la Science. Une présentation plus précise et une version mathématique seront présentées ailleurs, avec les références convenables au travail antérieur.

C'est un plaisir d'exprimer ma reconnaissance pour la grande qualité des conversations que j'ai eues avec Charles H. BENNETT, James CRUTCFIELD, James B. HARTLE, John HOLLAND et Seth LLOYD.