

BULLETIN N° 111
ACADÉMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 9 janvier 2007

Conférence du Pr. Jean-Paul DELAHAYE
« *Complexité aléatoire, complexité organisée* »

Prochaine séance : le Mardi 13 février 2007

Conférences :

Roger BALIAN de l'Académie des Sciences
« *Introduction à l'émergence* »

Michel BITBOL membre du C.R.E.A.
« *L'émergence sans propriété fondamentale* »

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris
NOUVEAU Site Web en construction : <http://www.science-inter.com>

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

Janvier 2007

N°111

TABLE DES MATIERES

- P.3 Compte-rendu de la séance du 9 janvier 2007 :
- P.5 Compte –rendu de la Section Nice-Côte d’Azur
- P.10 Documents

Prochaine séance : Mardi 13 février 2007,
 MSH, salle 215-18heures

Conférences :

Roger BALIAN membre de l’Académie des Sciences « *Introduction à l’émergence* »

Michel BITBOL membre du C.R.E.A.
 « *L’émergence sans propriété fondamentale* »

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
 Siège Social : Maison des Sciences de l’Homme 54, bd Raspail 75006 Paris
 NOUVEAU Site Web en construction : <http://www.science-inter.com>

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

Séance du Mardi 9 janvier 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, Bruno BLONDEL, Françoise DUTHEIL, Jean-Pierre FRANCOISE, Irène HERPE-LITWIN, Saadi LAHLOU, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS, Alain STAHL

Etaient excusés : François BEGON, Bruno BLONDEL, Alain CARDON, Marie-Louise LABAT, Victor MASTRANGELO, Pierre SIMON

I) Informations générales

Avant de donner la parole à notre conférencier la Pr. Jean-Paul DELAHAYE notre Président nous propose d'envisager le déroulement du Congrès sur l'Emergence pour le début de l'année 2008.

II) « Complexité aléatoire, complexité organisée » par le Pr. Jean-Paul DELAHAYE

Agrégé de mathématiques, docteur en mathématiques (1982), Jean Paul DELAHAYE est Professeur d'informatique à la faculté de Villeneuve d'Ascq et membre du Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille. Il est lauréat en 1998 du Prix d'Alembert, du Premier Prix Auteur de la Culture Scientifique et Technique et Technique du Ministère de l'Education Nationale.

Il est auteur de plusieurs ouvrages parmi lesquels :

- "Information, complexité et hasard". Collection Langue-Raisonnement-Calcul dirigée par Mario Borillo et Frédéric Nef. Livre. Editions Hermès, Paris, 1994, 1999.
- "Le fascinant nombre Pi". Editions Pour-La-Science/Belin, Paris, 1997.
- "Jeux mathématiques et mathématiques des jeux". Editions Pour-La-Science/Belin, Paris, 1988
- "Merveilleux nombres premiers". Editions Pour-La-Science/Belin, Paris, 2000.
- "L'intelligence et le calcul : de Gödel aux ordinateurs quantiques". Editions Pour-La-Science/Belin, Paris, 2002.
- "Les inattendus mathématiques : casse-tête, art, paradoxes, superstitions", Editions Belin/Pour la science, 2004.
- "Complexités : aux limites des mathématiques et de l'informatique". Editions Belin/Pour la science, 2006.

Il a publié par ailleurs le 1^{er} janvier 2007 un dossier intitulé « **Qu'est-ce que l'émergence ?** » dans la revue « Futura Sciences » dont nous vous proposons la lecture dans notre rubrique documents.

Lors de sa conférence, Jean-Paul DELAHAYE nous explique les différences conceptuelles entre **Complexité aléatoire** et **Complexité organisationnelle** et les formalisations mathématiques qui en découlent. La complexité aléatoire a été tout d'abord étudiée dans les années 1960 par le mathématicien russe **Kolmogorov** qui mesure la complexité d'une série par la longueur du plus court programme nécessaire pour la décrire. Quelques décennies plus tard **Bennett** introduira la notion de **Profondeur logique** qu'il mesurera non pas par la longueur du programme de description mais par le temps de calcul minimal nécessaire.

Le conférencier a illustré les deux concepts par quelques exemples : La complexité de Kolmogorov $K(s)$ est élevée pour un gaz mais elle est faible pour un cristal en revanche elle n'est guère performante pour expliquer la complexité d'un ordinateur par exemple. Selon Bennett en revanche la complexité d'un gaz est faible...

Pour plus de précisions nous vous renvoyons à la lecture des deux articles du Conférencier publiés dans le précédent bulletin (n°110) ou à la lecture du dossier sur l'émergence. La conférence du Pr. DELAHAYE, remarquablement claire malgré –sans jeu de mots– la complexité du sujet a suscité de nombreuses questions notamment relatives au calcul de la complexité de Bennett ou à la relation entre complexité de Kolmogorov et entropie d'un système.

Après ce riche débat, 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 21 décembre 2006

(100^{ème} séance)

Présents :

Jean Aubouin, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Patrice Crossa-Raynaud, René Dars, Jean-Paul Goux, Jacques Lebraty, Maurice Papo, Jacques Wolgensinger.

Excusés :

Alain Bernard, Pierre Couillet, Guy Darcourt, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazy, Gérard Iooss, Michel Ladzunski, Jean-François Mattéi, Daniel Nahon.

1- Approbation du compte-rendu de la 99^{ème} séance.

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

2- Le mois écoulé.

➤ René Blanchet

Un événement important s'est tenu à l'Université de Nice. Ce fut la réunion des présidents d'université de toute l'Europe (33 pays).

Ces réunions se passent successivement dans différents pays en vertu du « processus de la Sorbonne » dont le but est de fonder un espace universitaire européen. Les pays fondateurs ont été la

Grande-Bretagne, l'Allemagne, l'Italie, la France et l'Espagne, à l'initiative de Claude Allègre, pour éviter que la technocratie européenne ne mette la main sur le système universitaire.

L'idée fondatrice était d'harmoniser et non pas d'uniformiser, car l'uniformisation est très difficile à faire, compte tenu des traditions, de l'histoire, du développement de chaque pays.

Sous le mandat de Claude Allègre, cette initiative s'est appelée le 3-5-8 et, depuis 2002, le LMD. Ces réunions ont eu lieu en 1998 à la Sorbonne, en 1999 à Bologne, concrétisée par un accord des pays de l'Europe statutaire, en 2002 à Prague, qui l'a élargie à de nombreux pays, y compris ceux qui ne sont pas dans l'Europe communautaire.

Comme il n'y avait plus eu de réunion depuis, le Ministre de l'Enseignement supérieur M. Goulard et le Directeur de l'Enseignement supérieur M. Monteil ont souhaité relancer cette affaire et ont demandé à l'Université de Nice de recevoir les 7, 8 et 9 décembre les présidents de toutes les universités d'Europe sur le thème : les études doctorales et l'harmonisation des thèses.

Tous les présidents étaient là, ainsi que leurs équipes directement impliquées : 450 participants au Petit Valrose, réunion précédée d'une conférence de presse de M. Goulard et du Président M. Marouani.

M. Goulard a demandé au Président de l'Université d'exposer les grands programmes prioritaires de Nice-Sophia Antipolis pour le contrat de plan devant la presse nationale et étrangère : il y a 5 programmes prioritaires : la maison des Sciences de l'homme pour les sciences humaines et sociales, le secteur des Sciences de la planète et de l'Univers, le secteur de la cancérologie, les sciences et techniques information et communication et le projet autour des mathématiques et de la physique (une partie de l'excellence du laboratoire Dieudonné en mathématiques rayonnant sur la chimie, la biologie, la physique, etc.). Ce projet s'intitule : complexité, expérimentation, modélisation, calcul.

M. Goulard a dit publiquement à cette occasion que l'Université de Nice avait une activité remarquable.

M. Jean-Marc Monteil, directeur général de l'enseignement supérieur, après avoir eu un mot aimable sur notre Académie, a axé son discours vers les études doctorales et la recherche, en insistant sur le fait, à l'étonnement semble-t-il de plusieurs présidents étrangers et du Directeur des instances européennes, qu'il ne pouvait pas y avoir d'enseignement supérieur sans recherche et qu'un des rôles d'un chercheur était de transmettre.

Le deuxième point souligné a été la responsabilité du chercheur.

Le troisième fut l'éthique, avec une remise en question permanente ; le doute doit être au cœur de la pratique scientifique.

Enfin, il a insisté sur la chaîne ininterrompue qui devrait exister entre la recherche fondamentale, l'ingénierie, l'innovation, jusqu'au commercial. Chacun de ces éléments doit connaître l'ensemble de la chaîne sans qu'aucun soit évidemment spécialiste de tout. Donc travailler sur les fonctions et sur les liaisons.

Les écoles doctorales en France devraient tout à fait contribuer, si elles en prenaient la décision, à enclencher des démarches nouvelles.

Ce furent donc des journées très importantes qui n'ont eu aucun écho dans la presse !

Il a été décidé de donner un rythme annuel à ces réunions, la prochaine devant avoir lieu à Londres.

3- L'éthique.

M. Papo : Alain Crémieux a publié un livre remarquable sur « L'éthique des armes ». Polytechnicien, Ingénieur "Sup Aero" et de l'Armement, Il a exercé des fonctions techniques, de politique industrielle et internationales de 1960 à 2001 à la Délégation Générale pour l'Armement. Il a été attaché d'armement auprès des ambassades de France à Londres et Washington, ainsi qu'à l'OTAN à Bruxelles. Il a été directeur du Centre des Hautes Etudes de l'Armement. Il a donc traité d'un domaine qu'il connaît parfaitement et a pu interroger des personnes responsables des programmes de mise au point d'armes nouvelles, notamment les armes chimiques ou biologiques.

Ce livre m'a révélé que presque tous, nous avons dans notre esprit des "a priori" restrictifs. L'éthique par exemple, évoque automatiquement pour nous la bioéthique dont on parle beaucoup en ce moment, et nous fait oublier tous les autres aspects de l'éthique tels que celle-là et bien d'autres.

Le "Petit Larousse" de 1972 définissait l'éthique comme : Science de la morale ... Le "Petit Larousse" de 2003 la définissait de la manière suivante :

1. Partie de la philosophie qui étudie les fondements de la morale.
2. Ensemble de règles de conduite.
3. Éthique médicale : ensemble des règles morales qui s'imposent aux différentes activités des médecins.

Synonyme : déontologie médicale, bioéthique.

ce qui démontre amplement s'il en était besoin, l'évolution de la pensée sur cette question..

On pourrait donc envisager un cycle de conférences ou un colloque dont les mots clefs seraient: Ethique – Déontologie – Religion – Convictions personnelles de conduite – Règles d'entreprise – Lois ... et qui pourrait s'intituler : Ethique et action.

Pourraient participer un certain nombre de conférenciers locaux, (dont nombre de notre académie) par exemple sur les sujets suivants non limitatifs, parmi lesquels il faudra choisir :

Bioéthique

Ethique/Morale/Religion

Ethique de l'ingénieur, du chercheur

Ethique des armes

Ethique du médecin, du chirurgien

Toute vérité est-elle bonne à dire ?

Ethique du psychiatre

Le droit de tout savoir sur un patient et l'influencer ?

Ethique du magistrat

Ethique de l'avocat

Mentir pour faire acquitter un dangereux criminel dont on connaît la culpabilité

Ethique du publiciste

Documents

Le thème retenu pour notre prochain colloque étant « l'émergence » nous vous proposons quelques nouveaux articles sur ce thème :

P .11 : « *Qu'est-ce que l'émergence* » parle Pr. *Jean-Paul DELAHAYE* issu de la revue *Futura-sciences* du 01 01 2007

P .23 : « *La nature est-elle un puits sans fond ?* » par Michel BITBOL philosophe de la physique au CREA issu de ma revue « *La Recherche* » février 2007

P. 29 « *de l'émergence en psychanalyse* » par notre Collègue Antoine FRATINI

P. 31 « *Un va-et-vient entre émergence et réduction* » par Roger BALIAN membre de l'Académie des Sciences issu de la Revue « *Sciences et Avenir* » Hors-Série sur l'énigme de l'émergence –juillet-août – 2005

Par ailleurs, notre Collègue Alain STAHL a recensé pour vous un ouvrage très intéressant sur l'inconscient:

P.33 *L. Naccache (2006), Le nouvel inconscient. Freud , Christophe Colomb des neurosciences. O. Jacob.*

Qu'est-ce que l'émergence ?

Par Jean Paul DELAHAYE

Futura Sciences (<http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier676-1.php>)

L'émergence peut être celle d'un ordre élémentaire dans un chaos sans structure : en rangeant une grosse pile de livres par taille croissante, sur les rayons de la bibliothèque apparaissent — émergent— des séries homogènes d'ouvrages publiés dans une même collection ou par un même éditeur. Autre exemple : des atomes en vrac,ensemencés par un microcristal se rangent et font surgir —émerger— une régularité géométrique parfaite où chaque atome trouve sa place.

Mais l'émergence peut aussi être celle d'un objet finement structuré s'imposant à une confusion initiale : du tas de feuilles en décomposition surgit un champignon inattendu ; des mouvements non coordonnés des molécules à la surface de la terre il y a trois milliards d'années naissent — émergent— les premières formes auto-répliquantes, qui deviennent plus tard des cellules vivantes, puis des êtres d'une infinie variété.



© Futura-Sciences

Ces deux types d'émergence ne doivent pas être confondus : dans le premier que j'appellerai l'émergence triviale, rien de nouveau ne se passe vraiment : le chaos s'efface, mais pour laisser la place à une structure pauvre, répétitive, sans contenu véritable. Le second type —l'émergence innovatrice— ressemble à une création, c'est lui qui pose problème et constitue ce mystère qui défie les sciences de la complexité.

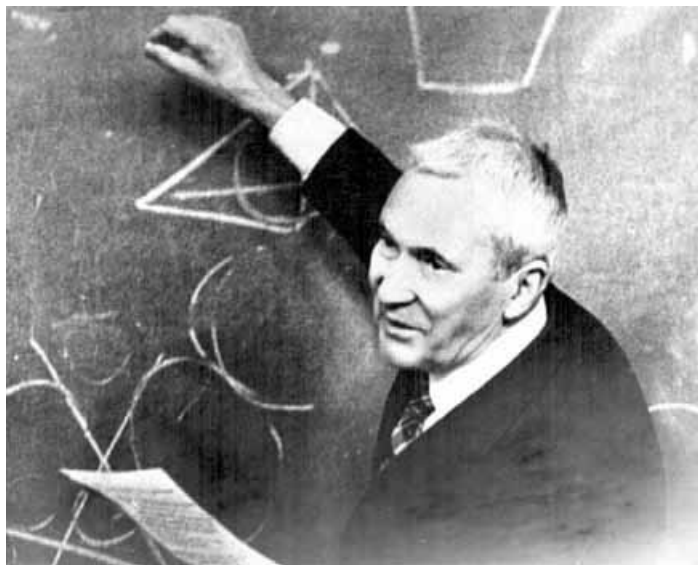
Sommaire

1. *Deux complexités*
2. *Information aléatoire*
3. *Complexités*
4. *Loi de la croissance lente*
5. *Transition et contenu computationnel*
6. *Émergences*
7. *Bibliographie*

1°) Deux complexités

Pour comprendre la nature profondément différente de ces deux types d'émergence, il faut cesser d'opposer trop naïvement simplicité et complexité. Car au simple s'oppose en fait deux sortes de complexité que la théorie algorithmique de l'information a réussi à définir proprement —**c'est-à-dire mathématiquement**— mettant fin à une confusion ancienne et désastreuse. Il s'agit de la complexité aléatoire et de la complexité organisée.

Cet éclaircissement résulte des progrès de la théorie du calcul —ou théorie de la calculabilité— née dans la décennie 1930 des travaux de Kurt Gödel, Alonso Church, et Alan Turing. **En proposant une définition mathématique claire de la notion d'algorithme**, non seulement la logique mathématique s'est donné l'outil qui lui a permis de démontrer l'insolubilité de certaines questions par un procédé fini (c'est l'indécidabilité de l'arrêt d'un programme, et la multitude de résultats analogues qui ont suivi), mais de plus, elle a fondé une science théorique de l'information qui s'est révélée d'une efficacité surprenante pour l'élucidation de questions aussi délicates que celle de l'opposition **simple/complex** ou celle plus délicate encore de l'opposition **complexité aléatoire/complexité organisée**.



Andrei Kolmogorov (en URSS) bien informé des avancées de la nouvelle science du calcul, en même temps que Gregory Chaitin (aux États-Unis) propose au milieu des années 1960 de définir la

complexité d'un objet fini Ob (par exemple un nombre entier, une suite finie de 0 et de 1, un fichier informatique, une image numérisée) par la taille du plus petit programme capable de le produire :

$K(Ob)$ = taille en nombre de chiffres binaires du plus court programme Pr qui, lorsqu'il calcule, produit (par exemple en l'imprimant à l'écran) l'objet Ob .

Une telle définition, dont on démontre moyennant quelques précautions, qu'elle est peu sensible au langage utilisé pour écrire les programmes permet d'une façon parfaitement rigoureuse et cohérente de dire qu'une image toute blanche d'un million de pixels est plus simple que l'image d'un million de pixels d'un arbre, ou d'un paysage urbain. L'image toute blanche est produite par un court programme du type «pour chaque numéro de ligne i , pour chaque numéro de colonne j , imprimer un pixel blanc en position (i, j) ». En revanche l'image de l'arbre ne peut être produite que par un programme qui contient en lui la donnée des diverses branches, feuilles, aspérités du tronc, etc. ce qui en fait un programme long : pour un million de pixels noirs ou blancs, il faudra au moins un programme de 10 000 chiffres binaires. Le pire des cas est l'image parfaitement mélangée de points noirs ou blancs, car alors le programme minimal en longueur pour produire l'image d'un million de pixels aura lui-même une longueur d'un million de chiffres binaires : le hasard ne se résume pas.

Calculer $K(Ob)$ est souvent très difficile et l'on démontre même que la fonction $Ob \rightarrow K(Ob)$ n'est pas calculable (aucun algorithme ne sera jamais en mesure, pour tout objet Ob d'en déterminer exactement la complexité de Kolmogorov $K(Ob)$). **En pratique**, cela ne signifie pourtant pas qu'on ne fait rien du concept de complexité de Kolmogorov, mais qu'il faut accepter de mesurer cette complexité de manière approchée. Les algorithmes de compression de données sont pour cela d'excellents outils : la taille de la version comprimée d'une image est une valeur approchée de la complexité de Kolmogorov de cette image. **Ce sont d'ailleurs les algorithmes de compression sans perte** (c'est-à-dire permettant la reconstitution exacte de l'objet initial) qui sont utilisés avec un succès étonnant par divers chercheurs, dont Paul Vitanyi, dans les méthodes de classification automatique (de textes, de musiques, de séquences génétiques, etc.) fondées sur la complexité de Kolmogorov.

2°) Information aléatoire

La complexité de Kolmogorov $K(Ob)$ d'un objet Ob mesure son contenu incompressible d'information, son désordre, son "aléatoirité". Grâce à cette notion mathématique parfaitement précise dès qu'on s'est fixé le langage de référence pour écrire les programmes, les notions vagues d'objets simples et celle d'objets complexes prennent un sens technique dépourvu de toute ambiguïté, qui a d'ailleurs été utilisé pour l'élaboration de certaines démonstrations mathématiques et la formulation d'une nouvelle analyse de l'entropie en physique statistique (par W. Zurek en 1990).

Cependant la complexité qui est considérée ici n'est que celle donnée par le désordre d'un mélange qui ne produit rien de nouveau : c'est la complexité du détail d'un tas de sable, c'est la complexité des résultats d'une suite de tirages à pile ou face, ce n'est pas la complexité d'un organisme vivant, ni celle d'une ville ou d'une puce électronique, ni celle d'ailleurs des décimales d'un nombre comme π ou $\sqrt{2}$ qui suivent des règles précises ne devant rien au hasard. La complexité aléatoire (mesurée par $K(Ob)$) est la complexité d'un désordre sans règle, elle ne dit rien de l'autre complexité : la complexité organisée, la richesse en structures et sous-structures que l'on trouve dans les organismes vivants, les organisations sociales et les machines de toutes sortes inventées par l'homme. **Comment**

formuler une définition mathématique qui soit pour la complexité organisée ce que la complexité de Kolmogorov est pour la complexité aléatoire ?



Pendant un moment la chose parut impossible, jusqu'à ce que Charles Bennett un physicien (bien informé des théories du calcul et connaissant le concept de Complexité de Kolmogorov) propose une définition complémentaire de celle de Kolmogorov.

Dans la définition de $K(\text{Ob})$ on ne s'occupe pas du temps de calcul des programmes considérés mais seulement de leur taille (en nombre de symboles binaires). L'idée de Bennett est de prendre en compte cette durée de calcul (mesurée par le nombre de pas élémentaires de calcul). **L'idée la plus naturelle est de regarder le programme le plus rapide qui produit un objet Ob, comme on a considéré le programme le plus court qui produit Ob.** Cette idée ne fonctionne pas à cause des programmes triviaux du type print "00100010011" qui très rapidement produisent leurs résultats et sont donc, à de rares exceptions près, toujours les programmes les plus rapides. Pour que le temps de calcul d'un programme ait un sens, il faut que le programme soit bien ajusté à son objet et en exploite les structures et les régularités, ce qui n'est pas le cas des programmes du type print "00100010011" qui s'appliquent à tout, trivialement. **La solution de Bennett**, dont il a démontré de manière satisfaisante qu'elle est celle attendue, consiste à considérer le temps de calcul du plus court programme qui produit Ob. Ce temps de calcul s'appelle la profondeur logique de Ob. On la note $P(\text{Ob})$:

$P(\text{Ob})$ = temps de calcul, mesuré en nombre de pas de calcul, du plus court programme Pr qui, lorsqu'il fonctionne, produit (par exemple en l'imprimant à l'écran) l'objet Ob.

La profondeur logique d'une image toute blanche et celle de l'image d'un nuage de points aléatoires sont toutes les deux faibles : ce sont des images d'objets sans richesse de structure, sans contenu authentique en information. **En revanche, la profondeur logique d'un objet finement organisé comme les chiffres de Pi ou une puce d'ordinateur est sensiblement plus élevée** : en effet, le plus court programme exploite les propriétés particulières de l'objet que l'exécution du plus court programme "déplie" ce qui demande de nombreuses étapes de calcul.

Dans de tels cas, le passage du plus court programme à l'objet n'est pas la simple exécution d'un print mais le parcours d'un chemin computationnel, riche en boucles récursives, en appel à sous-procédures, etc.

3°) Complexités

Un objet simple est un objet qu'on peut décrire entièrement en peu de mots. De cette idée naît celle de la complexité de Kolmogorov : un objet simple est un objet produit par un court programme.

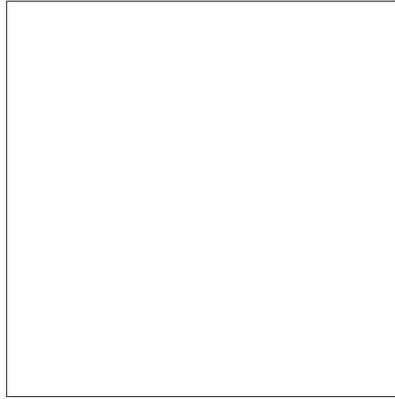


Image 1

Une image toute blanche est simple. Une image occupée par un motif répétitif est simple elle-aussi.

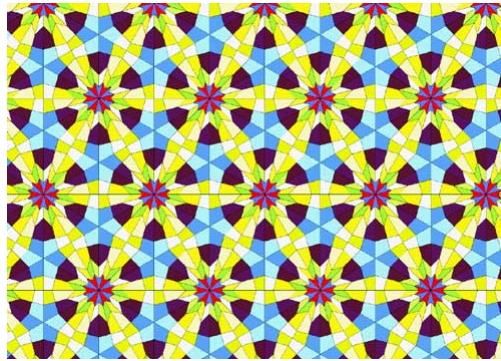


Image 2

$K(\text{Image 1})$ très petit ; $K(\text{Image 2})$ assez petit.

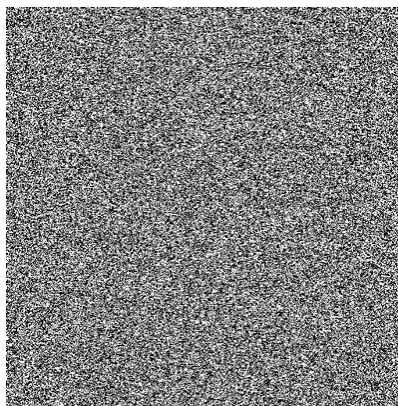


Image 3

Les objets complexes sont ceux qu'on ne peut pas décrire brièvement. Il faut cependant distinguer la complexité aléatoire (une image Image 3 entièrement composée de points au hasard) et la complexité organisée (l'image d'une puce électronique Image 4, l'image d'une ville Image 5, l'image d'un être vivant Image 6).

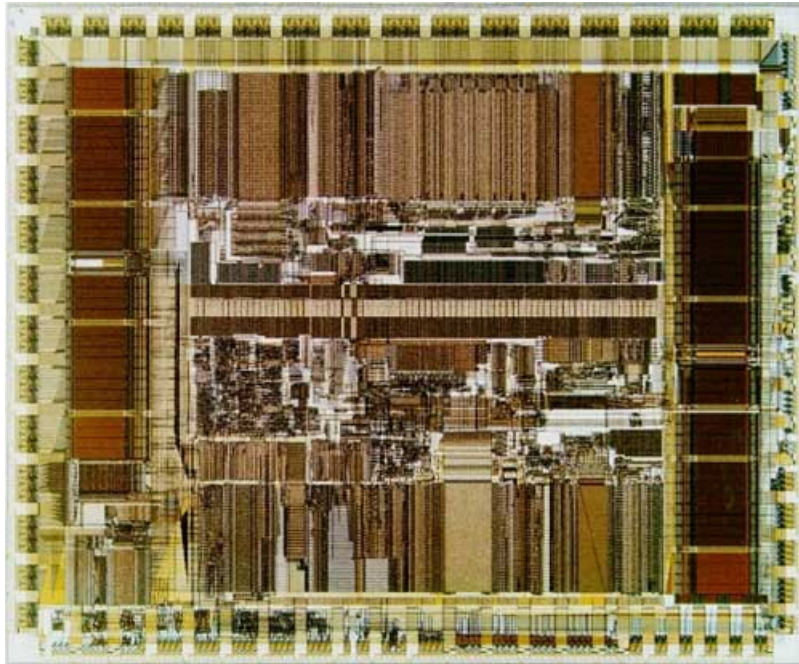


Image 4

La complexité organisée est la marque que porte un objet attestant qu'il a été produit par un long processus d'élaboration ou de calcul.

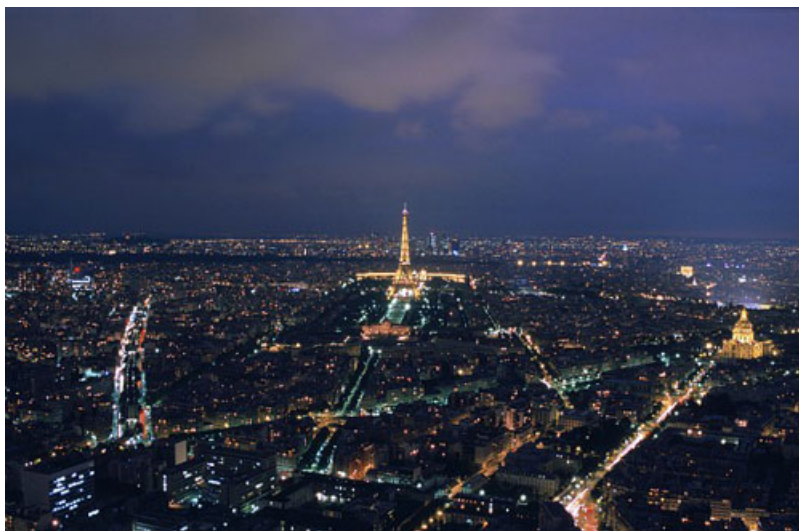


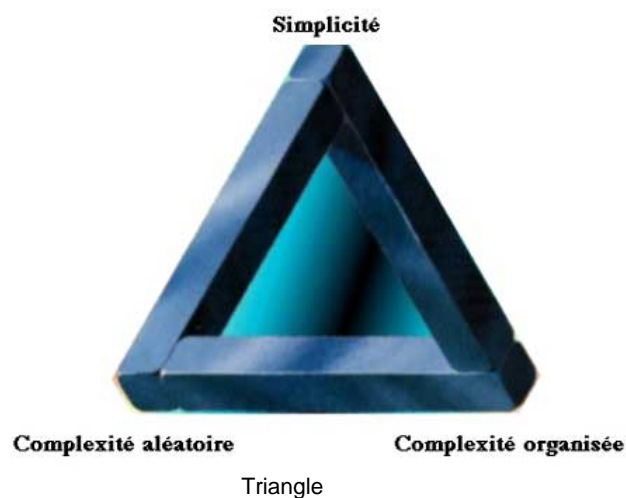
Image 5

La complexité aléatoire est mathématiquement mesurée par la complexité de Kolmogorov. La complexité organisée est mathématiquement mesurée par la profondeur logique de Bennett.



Image 6

Le triangle du simple et des deux complexités



Les êtres vivants évolués (par exemple les mammifères) portent des traces des deux types de complexité. La structure de l'être vivant dont l'essentiel est tiré du génome est de la complexité organisée. La "calcul" qui y a donné naissance est celui effectué de manière indirecte pendant des centaines de millions d'années par l'évolution Darwinienne. **La partie aléatoire de la complexité d'un être vivant évolué est celle qui fixe par exemple l'emplacement précis des cheveux, ou des vaisseaux sanguins et qui dans le détail ne sont pas déduits de l'information génétique.** En négligeant la complexité organisée contenu dans le cerveau et provenant de l'apprentissage, on pourrait dire que deux vrais jumeaux portent en eux le même contenu en complexité organisée, et différent très fortement pour leur complexité aléatoire.

4°) Loi de la croissance lente

La proposition de Bennett n'est peut-être pas une proposition ultime, et il se peut que la notion de complexité organisée puisse encore être formalisée en se fondant sur d'autres bases ou en enrichissant l'idée de Bennett (cette possibilité d'une évolution ne semble pas envisageable pour la complexité de Kolmogorov qui, elle, est une proposition définitive). Il n'en reste pas moins que la notion de profondeur de Bennett dispose de quelques arguments de poids en sa faveur, le plus sérieux étant la loi de croissance lente qui va nous ramener au concept d'émergence.



Lors du déroulement d'une dynamique, l'évolution de la complexité de Kolmogorov peut être brusque : en jetant un verre de cristal au sol, on passe d'une complexité de Kolmogorov faible à une complexité assez forte : le détail des morceaux brisés a soudainement accru la complexité aléatoire (donnée par K) de l'objet. **En revanche et c'est ce que Bennett a appelé la loi de la croissance lente** : (a) la profondeur logique $P(\text{Ob})$ ne peut jamais croître brusquement dans un univers déterministe ; (b) dans un univers indéterministe, la profondeur logique d'un objet ne peut croître brusquement que dans des cas très rares (impossibles en pratique).

Ces résultats qui sont des théorèmes dans la théorie développée par Bennett satisfont les demandes de notre intuition : un objet richement structuré et organisé ne peut pas sortir de rien, instantanément, mais demande un long processus d'interaction entre ses divers éléments, c'est-à-dire une sorte de calcul prolongé et cumulatif. **La profondeur logique de Bennett mesure la quantité de calcul fixée dans un objet, c'est une mesure du contenu computationnel de l'objet, c'est une mesure de la longueur de la dynamique qui y a donné naissance.**

L'émergence d'un objet profond ne peut être brusque, alors que l'apparition d'un objet complexe (au sens de la complexité de Kolmogorov) dans certaines situations se produit instantanément. L'émergence triviale mentionnée au début de l'article correspond au passage d'un objet complexe au sens de la complexité de Kolmogorov à un objet simple par substitution d'un ordre simple à un aléa sans structure. **Dans l'émergence triviale, on passe d'un fort K à un faible K , mais on ne change pas, pour l'essentiel, P .** En revanche dans l'émergence innovatrice la valeur de K ne change pas nécessairement, mais P augmente, ce qui marque la trace d'un phénomène créatif engendrant des structures non triviales, des organisations fonctionnelles complexes (mais pas arbitraires), un véritable contenu structurel.

5°) Transition et contenu computationnel

L'émergence innovatrice apparaît parfois comme marquée par des transitions rapides, comme si tout à coup quelque chose de nouveau survenait de rien. C'est que la richesse en contenu structuré (mesurée par P) d'un objet n'est pas forcément évidente à nos yeux : nous n'avons pas de détecteurs de profondeur de Bennett (qui, pas plus d'ailleurs que les détecteurs de complexité de Kolmogorov ne peuvent exister dans l'absolu). **L'émergence innovatrice brusque n'est que la marque de nos insuffisances perceptives et fondamentalement, c'est une illusion : il faut laisser à P le temps de croître, et cette croissance n'est jamais brusque.**

L'émergence innovatrice est progressive et si nous la découvrons parfois soudainement, c'est qu'elle fait apparaître dans les objets des signes particuliers que nous avons la capacité de voir alors que

l'instant d'avant lorsque P avait une valeur proche nous ne percevions rien. L'exemple le plus simple est celui du tas de feuilles en décomposition dont surgit brusquement un champignon. Le champignon en fait était présent (sous la forme d'un spore peut-être, qui détenait en lui toute la structure à venir du champignon). L'apparition du champignon n'est pas celle de la complexité organisée, c'est simplement l'apparition d'une de ses manifestations perceptible par nous ; le véritable processus ayant conduit au champignon —la véritable émergence— étant lui ancien, progressif et lié à l'évolution biologique sur terre.

Il est vraisemblable que la présence de propriétés avancées dans les objets est liée (en partie au moins) à la valeur de P. On peut imaginer qu'en deçà de certaines valeurs de P, l'intelligence est impossible. Peut-être qu'une fois un autre seuil franchi la conscience apparaît, etc. La théorie de la calculabilité n'est pas en mesure aujourd'hui de démontrer de telles affirmations, du moins en rend-elle l'idée exprimable dans un cadre cohérent et formel ce qui est déjà une avancée et offre une perspective de travail en formulant des objectifs et des schémas théoriques précis.

Les sortes de transitions de phases lors du processus d'accroissement de la profondeur doivent être analysées, et il s'agit d'un travail difficile appelant la coopération d'une multitude de disciplines. On peut sans doute défendre que ces transitions de phase (chacune caractérisée par une valeur de seuil pour P ?) méritent aussi le nom d'émergence : ce serait un troisième type d'émergence. Il faut cependant éviter les tentations d'une sorte de romantisme de l'émergence ! **Rien ne se crée à partir de rien, cela est vrai du contenu computationnel (mesuré par P) comme cela est vrai de la matière et de l'énergie.** Le concept de contenu en calcul attaché à P (et que les chercheurs accepteront peut-être un jour d'ajouter aux concepts fondamentaux de la physique que sont la masse, l'énergie, le temps, la force, etc.) est aujourd'hui très délicat à mettre en œuvre concrètement —à cause des phénomènes d'indécidabilité. Cependant, en posant un nom et une idée mathématique sur ce qui croît lorsque de nouvelles formes plus riches, plus organisées, plus finement structurées émergent, c'est un pas important qu'a franchi Charles Bennett dans la construction du nouveau rationalisme qu'appellent les sciences de la complexité. Même si parfois les points de vue déduits de la théorie de la calculabilité et les perspectives qu'elle offre sont perçus comme réductionnistes, ils font surgir une vision nouvelle et pleine de promesses d'un monde où l'épanouissement computationnel est le cœur des processus d'émergence dont nous sommes à la fois les objets, les témoins et les acteurs.

6°) Émergences

La distinction entre complexité organisée (mesurée par la profondeur logique de Bennett) et la complexité aléatoire (mesurée par la complexité de Kolmogorov) permet une classification des divers phénomènes d'émergence.

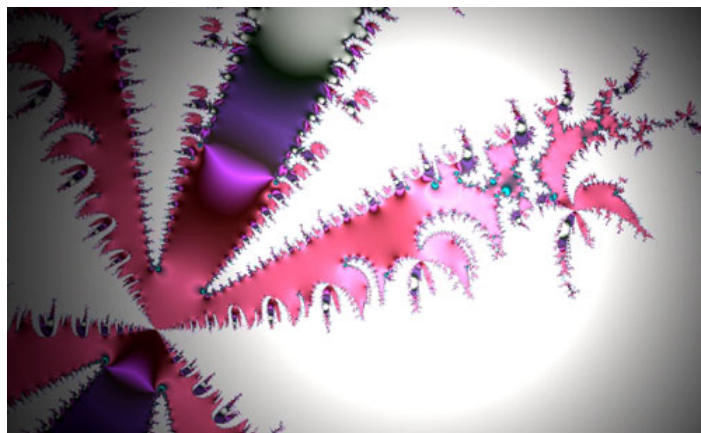
□ A Emergence triviale



C'est ce qui se passe lorsqu'un milieu aléatoire s'organise selon un schéma simple et répétitif. De la complexité aléatoire disparaît (K diminue) mais aucun contenu profond n'apparaît (P reste faible).

Exemple : La cristallisation : un certain désordre s'efface, mais pour laisser la place à une sorte d'uniformité structurelle et peu intéressante.

□ B Emergence innovatrice



Lors d'un long processus évolutif ou dynamique, dans certains cas particuliers, une structuration s'élabore, des éléments s'organisent les uns relativement aux autres, s'amalgament, établissent des relations stables et complexes. Alors qu'au départ n'était présent que du désordre sans contenu (des objets ayant éventuellement une forte complexité de Kolmogorov, mais n'ayant qu'une faible

profondeur logique de Bennett) au terme du processus, on se trouve en présence de complexité organisée.

Exemple : l'apparition de la vie sur terre ou le déroulement d'un algorithme qui fait apparaître à l'écran un objet fractal.

□ **C Illusion perceptive d'émergence**



Dans certaines situations, l'émergence est une illusion. Nos sens qui ne sont capables ni de mesurer précisément la complexité de Kolmogorov, ni d'évaluer la profondeur logique de Bennett, peuvent avoir l'illusion d'une émergence à partir d'un substrat originellement sans complexité véritable (par exemple le développement d'une plante à partir d'une graine cachée). Dans de tels cas, le long processus de calcul (l'émergence véritable) est celui qui a donné naissance à la graine, et qui dans notre exemple se confond avec l'évolution biologique sur terre, et non pas le simple déploiement de l'information génétique contenue dans la graine et qui conduit en quelques jours ou quelques heures à une plante.

7°) Bibliographie

- Jean-Paul Delahaye. Information, complexité et hasard. Hermès Publishing, Paris, 1999.
- Bennett C.H. 1987. Information, Dissipation and the Definition of Organization. In Emerging Syntheses in Science, edited by David Pine, Reading, MA, 215-231.
- Bennett C.H. 1988b. Logical Depth and Physical Complexity. In The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey, Edited by R. Herken, Oxford Univ. Press, 227-57.
- Bennett C.H. 1990. How to Define Complexity in Physics, and Why. In Complexity, Entropy and the Physics of Information, SFI Studies in the Sciences of Complexity, Vol. VIII, Ed. W. H. Zurek, Addison-Wesley, 137-148.
- Eric Bonabeau, Jean-Louis Dessalles. Detection and Emergence. Intellectica 25-2, 1997, pp. 85-94

□ John Maynard Smith, Eörs Szathmary. The Major Transitions in Evolution. W.H. Freeman/Spectrum, Oxford, 1995.

□ JP Delahaye. Complexités : aux limites des mathématiques et de l'informatique. Editions Belin/Pour la science, 2006.

La nature est-elle un puits sans fond ?

Un dossier sur l'émergence de Michel BITBOL

Philosophe de la Physique au Centre de Recherche en épistémologie appliquée

Michel.bitbol@shs.polytechnique.fr

paru dans « La Recherche » N° 405 Février 2007

Aucune théorie physique ne serait vraiment fondamentale. La nature s'organiserait sans fondement originel, ni entités élémentaires. Tel est l'audacieux credo « émergentiste », partagé par de nombreux physiciens.

En mars 2005, Robert Laughlin, Prix Nobel 1998 pour ses travaux de physique de la matière condensée, a lancé un débat passionné, décisif pour notre compréhension du monde, qui ne cesse de s'amplifier dans la communauté scientifique. Dans un livre intitulé *Un Univers différent*, il soutient que toutes les lois de la nature sont « émergentes ». Elles résultent d'un comportement d'ensemble, et sont pratiquement indépendantes de celles qui régissent les processus individuels sous-jacents. L'affirmation de Laughlin¹ paraît défier le bon sens, parce que si l'on admet que des lois sont « émergentes », il faut bien qu'il y ait un niveau d'organisation inférieur d'où elles émergent. Et que, sauf à amorcer une régression à l'infini, on doit tenir l'un de ces niveaux pour ultime et fondamental, les lois qui le régissent ne pouvant plus émerger de rien d'autre.

La thèse de Laughlin s'oppose en première analyse à une doctrine née avec le projet de rationaliser la connaissance : le réductionnisme. Le réductionnisme consiste à rendre compte de la grande variété des phénomènes naturels par un petit nombre d'entités « élémentaires » et de lois « fondamentales ». Son but, selon le physicien français Jean Perrin, est d'« expliquer du visible compliqué par de l'invisible simple », faisant de la simplicité une marque de vérité².

L'atomisme grec de l'Antiquité, fondé par Leucippe et Démocrite, comptait déjà parmi ses succès d'expliquer les phénomènes de raréfaction (état gazeux) et de condensation (états liquide ou solide), en admettant que la matière soit faite de corpuscules séparés par des distances plus ou moins grandes dans le vide. Les propriétés visibles de la matière étaient ainsi « réduites » à celles des atomes.

Mais ce n'était là qu'une esquisse. Au XIX^e siècle, un atomisme rénové s'est montré capable d'unifier un domaine plus vaste de phénomènes chimiques et physiques. Il a été utilisé en 1808 par l'Anglais John Dalton pour expliquer que les substances chimiques se combinent en proportion variant de manière discontinue. Puis il a permis, à partir de 1850, d'interpréter les phénomènes thermodynamiques* comme la pression des gaz ou le transfert de chaleur entre les corps³. Cette interprétation supposait que la pression et la température reflètent le comportement statistique d'une immense population de molécules, individuellement soumises aux lois de la mécanique classique. Les succès spectaculaires de l'atomisme se révélaient pourtant ambivalents pour la doctrine réductionniste. Car ils faisaient ressortir la distance entre une physico-chimie atomiste et certains phénomènes naturels comme la vie.

Les êtres vivants apparaissent en effet défier les lois de la physique, en particulier celles de la thermodynamique. Leur comportement intentionnel, dirigé vers un but, n'est-il pas étranger aux lois causales ? Et leur développement, qui les porte à une organisation croissante, ne semble-t-il pas en contradiction avec le second principe de la thermodynamique, qui impose aux systèmes physiques une tendance à l'ordre décroissant ? Au moins était-il clair que rien n'aurait permis d'anticiper les

¹ R. Laughlin, *A Different Universe : Reinventing Physics From The Bottom Down*, Basic Books, 2005.

² J. Perrin, *Les Atomes*, Flammarion, 1991.

³ R. Dugas, *La Théorie physique au sens de Boltzmann*, éditions du Griffon, 1959.

phénomènes biologiques à partir des seules lois physico-chimiques connues. Mais si la stricte réduction du vivant à la physique apparaissait hors de portée, fallait-il faire intervenir un « principe vital » ? Refusant ce dilemme, un groupe de biologistes et de philosophes britanniques proposa, autour des années 1920, une « voie moyenne » entre le réductionnisme et le vitalisme⁴. Cette voie neuve à l'époque n'était autre que l'émergence, ici appliquée aux êtres vivants.

Tout en posant que rien d'autre qu'une base physico-chimique d'atomes n'intervient dans le domaine biologique, les émergentistes britanniques soulignaient que des systèmes complexes de relations entre éléments de cette base sont susceptibles de faire surgir des propriétés et des lois inédites. Les lois qui caractérisent la vie ; et aussi des lois macroscopiques intermédiaires, comme celles qui régissent les fluides et les solides. Cela était rendu vraisemblable par l'idée d'une non-linéarité des processus complexes, résumée dans le slogan : « Le tout est plus que la somme des parties. » Du vieux projet réductionniste on préservait ainsi le pouvoir unificateur, en accordant que le seul fondement du monde est constitué par les atomes et les lois de la physique microscopique. Mais on atténuait son pouvoir explicatif, puisqu'on devait admettre l'impossibilité de prédire, voire de déduire, les propriétés et lois émergentes à partir des propriétés et des lois sous-jacentes.

Les êtres vivants semblent ne pas se soumettre aux lois de la physique

Lois émergentes

Le statut des propriétés et lois émergentes ne s'en trouvait pas élucidé pour autant. Si c'est en principe qu'elles ne sont pas dérivables du niveau « élémentaire », alors il faut leur attribuer une autonomie réelle par rapport à ce dernier. Si c'est seulement en raison de nos moyens mathématiques imparfaits qu'on ne parvient pas à les déduire (sauf à faire appel à des techniques de simulations pas à pas par ordinateur), et qu'elles nous semblent à cause de cela inattendues, les propriétés et lois émergentes ne sont que des épiphénomènes. Dans le premier cas, on reconnaît aux propriétés et lois émergentes une forme d'existence absolue (autant qu'aux propriétés et lois « élémentaires »). Dans le second cas, on ne leur concède qu'une forme d'existence relative à nos moyens mathématiques.

Vers la même époque, autour de 1920, une réflexion sur les succès du réductionnisme en physique suscitait, paradoxalement, des doutes sur la possibilité de savoir à quoi les phénomènes sont réduits. Évaluons la démarche de la physique statistique sans préjugé, demandent les physiciens autrichiens Franz Exner et Erwin Schrödinger, et le mathématicien français Émile Borel⁵. À première vue, celle-ci repose sur la conviction que le mouvement des molécules obéit à des lois déterministes : celles de la mécanique newtonienne, qui régit également le mouvement des corps matériels macroscopiques.

Physique statistique

Mais on pourrait parfaitement se dispenser de cet acte de foi. En effet, tout ce que montre la physique statistique, c'est que les lois de la thermodynamique sont réductibles au comportement désordonné de myriades de molécules. Qu'on suppose ou non ces molécules régies individuellement

⁴ C. Lloyd Morgan, *Emergent Evolution*, Williams & Norgate, 1923

*La **thermo-dynamique** se définit comme la science du rapport entre la chaleur stockée ou échangée par un système, et le travail des forces exercées sur lui.

⁵ E. Borel, *Le Hasard*, Felix Alcan, 1914 ; F. Exner, *Vorlesungen über die physikalischen Grundlagen der Naturwissenschaften*, Franz Deuticke, 1919 ; E. Schrödinger, *Science, Theory and Man*, Routledge & Kegan Paul, 1957.

par des lois déterministes n'a guère d'importance : la seule chose qui compte pour retrouver les lois de la thermodynamique macroscopique, ce sont les distributions statistiques, qui pourraient aussi bien résulter de processus microscopiques aléatoires.

À la fin des années 1920, l'avènement de la mécanique quantique a montré le bien-fondé de ce scepticisme. On a désormais de bonnes raisons d'admettre que non seulement les lois de la thermodynamique, mais aussi les lois de la mécanique classique elles-mêmes émergent des lois quantiques. Or, les lois quantiques sont caractérisées par une forme d'indéterminisme microscopique. Il suffit de penser aux relations d'« incertitude » de Heisenberg, ou au fait que les états quantiques ne permettent d'évaluer que les probabilités des valeurs des variables qu'on mesure.

Une leçon plus générale ressort de là : il y a une multiplicité de lois élémentaires pouvant servir de base aux lois émergentes. Autrement dit, les lois émergentes sont « multiréalisables », ou « survenantes » (lire « Une histoire de l'émergence », p. 44). Cela impose une cloison étanche entre les divers niveaux de lois, puisque la connaissance des lois émergentes ne renseigne presque pas sur les lois élémentaires. Durant les années 1980, Stephen Wolfram et d'autres spécialistes de simulation de systèmes complexes sur ordinateur, ont porté ce constat à son comble⁶. Ils sont parvenus à montrer que les lois macroscopiques de l'hydrodynamique ou de la thermodynamique, qu'on suppose fondées sur les lois microscopiques de la mécanique classique ou quantique, peuvent aussi bien émerger d'une base beaucoup plus simple. La base de substitution choisie est un modèle d'« automates cellulaires », fait d'une grille de « cellules » pouvant se trouver dans un nombre fini d'états (par exemple 0 ou 1) et changeant d'état en fonction de l'état des cellules voisines.

Le principe de « protection »

Il ressort de cet itinéraire de pensée que les lois émergentes sont dans une large mesure découplées de leur base présumée. Les lois émergentes restent stables sous des variations considérables de leur base. On dit qu'elles sont « protégées » des vicissitudes de cette base. Ce concept de protection des lois émergentes vis-à-vis de la base est crucial. Il a servi de guide aux auteurs, comme Laughlin, qui soutiennent que les lois dites « fondamentales », celles qu'on suppose pourtant servir de base à toutes les autres (telles les lois de la gravitation et de l'électromagnétisme), sont aussi émergentes.

La protection des lois émergentes vis-à-vis du détail de ce qui se passe au niveau sous-jacent permet d'expliquer plusieurs particularités surprenantes des lois fondamentales. Elle explique d'abord leur remarquable exactitude. Une moyenne sur un nombre astronomique de processus désordonnés aboutit en effet inévitablement à un comportement global lisse et ordonné. C'est ce que Laughlin appelle la « perfection émergeant de l'imperfection »⁷. La protection explique ensuite les analogies formelles entre certaines lois de la matière condensée que l'on tient pour émergentes, et des lois de la matière élémentaire qu'on suppose « fondamentales ». Ainsi, l'analogie entre les « phonons », modes quantifiés de vibration portés par le réseau d'atomes d'un cristal, et les « photons », quanta d'énergie électromagnétique supposés « fondamentaux ». Ou bien l'analogie entre les trous dans les bandes de valence de semi-conducteurs, qui se comportent comme des électrons de charge positive, et les positrons ou anti-électrons « fondamentaux » de Dirac.

La rigueur de ces analogies, dont la liste est loin d'être limitative, se révèle tellement remarquable qu'on peut difficilement croire qu'elle ne traduit pas une identité de principe. Une identité non pas dans le détail des processus sous-jacents, bien sûr ; mais dans la simple circonstance qu'il y a des processus sous-jacents, dont la résultante se manifeste de manière constante au niveau émergent.

La thèse audacieuse du caractère émergent des lois de la nature a été confortée, ces vingt dernières années, par une connaissance mieux assurée de l'une des théories physiques réputées les

⁶ S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.

⁷ R. Laughlin, *A Different Universe*, Basic Book, 2005, p. 76

plus fondamentales : la théorie quantique des champs. Elle unifie la théorie quantique et la théorie de la relativité restreinte, et rend raison avec une précision inouïe des interactions entre particules « élémentaires ». À sa naissance, dans les années 1930, elle a pourtant manifesté un grave défaut : l'apparition de termes infinis lors du calcul de l'auto-interaction des particules jouant le rôle de sources de champs (par exemple, lors du calcul de l'interaction de chaque électron avec le champ électromagnétique émis par lui-même). Une correction mathématique de ce défaut a donc été mise au point vers la fin des années 1940 sous le nom de « renormalisation » (lire encadré ci-dessous).

La « renormalisation »

LA PROBABILITÉ pour qu'une particule, interagissant avec d'autres ou avec elle-même, aille d'un point à un autre se calcule en sommant, au moyen d'une intégrale, toutes les potentialités pour cette particule et pour les médiatrices d'interaction de se déplacer, d'être créées ou annihilées. Cependant, au fur et à mesure que les itinéraires potentiels des médiateurs d'interaction deviennent plus foisonnants en événements de création-annihilation, l'énergie qu'ils portent augmente, les intégrales divergent, et on aboutit à des énergies, des masses ou des charges infinies.

La stratégie employée à partir des années 1940 pour éviter ces valeurs infinies est une technique mathématique appelée la « renormalisation ». Elle consiste, pour aller vite, à compenser les quantités tendant vers l'infini en les soustrayant de quantités auxiliaires qui tendent parallèlement vers l'infini. Certaines de ces quantités auxiliaires sont appelées « masses nues » des particules sources de champs ; on peut en effet les assimiler aux masses qu'auraient les particules dans la situation imaginaire où elles n'interagiraient pas avec elles-mêmes.

À la surprise de bien des physiciens, cette curieuse méthode a abouti à des prévisions admirablement corroborées par l'expérience. Ainsi, en 1947-1948, elle permit de rendre compte très précisément d'une anomalie du spectre de l'hydrogène appelée le « Lamb-shift ». Elle est également devenue un guide pour la construction de nouvelles branches de la théorie quantique des champs, comme la théorie unifiée électrofaible formulée au tournant des années 1970, qui a valu le prix Nobel 1979 à ses créateurs Steven Weinberg, Seldon Glashow et Abdus Salam.

Une multiplicité de lois élémentaires servent de base aux lois émergentes

Théorie des champs

Mais quel rapport peut bien avoir la renormalisation, présentée au départ comme un simple artifice de calcul, avec la question conceptuelle de l'émergence des lois de la physique ? Pour le comprendre, il faut être attentif à l'évolution récente des techniques de renormalisation. Au fur et à mesure de leur progrès, on s'est mis à prendre au sérieux les seuils d'énergie qu'on se contentait jusque-là de faire tendre vers l'infini. Ne se peut-il pas que ces seuils, maintenus à une valeur finie, aient le sens de limites effectives de validité de la théorie ? Ne séparent-ils pas le domaine à basse énergie, où la théorie est valide, d'un domaine à haute énergie encore inexploré ?

S'il en va ainsi, on peut considérer le domaine à basse énergie comme un niveau d'organisation émergent : un niveau de constituants et de lois porté par un niveau d'organisation sous-jacent à haute énergie dont il est partiellement indépendant, c'est-à-dire dont il est « protégé ». Cette hiérarchie de niveaux a des réalisations théoriques bien connues. Supposons qu'on prenne la théorie quantique des champs standard pour base. En fixant un seuil d'énergie fini appelé « énergie de coupure », on sait construire à partir d'elle des « théories de champs effectifs » représentant un ensemble de lois émergentes approximatives. Par extension, il est tentant d'admettre que la théorie quantique des champs standard, qui peut aussi faire appel à des énergies de coupure dans ses procédés de

renormalisation, représente elle-même un système de lois physiques émergentes⁸ Mais cette fois les lois émergentes d'un niveau sous-jacent encore indéterminé.

Aucune théorie fondamentale ne serait alors vraiment fondamentale. Toutes les lois acceptées à l'heure actuelle seraient émergentes. Deux conceptions du futur s'opposent à partir de là. La première, inspirée par le programme réductionniste, consiste à croire qu'on finira par édifier une théorie unifiée fondamentale, qu'on identifiera les particules élémentaires dont tout le reste est fait, qu'on parviendra à énoncer des lois ultimes de la nature⁹. Peut-être les lois de la théorie des « supercordes » ou de l'une de ses héritières.

La seconde conception envisage au contraire la possibilité qu'il n'y ait aucun niveau fondamental à atteindre, ni lois ultimes à formuler ni éléments au sens strict ; que tous les niveaux soient émergents, que la structure de toutes les lois dérive de leur « protection » vis-à-vis d'un milieu sous-jacent, et que les particules de n'importe quel type soient décomposables à condition d'accélérer suffisamment les particules qui servent à les sonder¹⁰. La première option a pour elle le bon sens et l'héritage de la pensée atomiste, mais c'est à elle que revient la charge de la preuve. Un pas dans cette direction pourrait être franchi si la conjecture selon laquelle la théorie des supercordes ne doit pas avoir recours à la renormalisation était prouvée¹¹. La seconde option est vertigineuse, mais elle peut se prévaloir du simple fait de l'inachèvement persistant de la physique, de son allure de « poupées russes » imbriquées et indéfiniment hiérarchisées.

Conflits d'intérêts

Au-delà de leur valeur intrinsèque, ces deux options ont aussi un grand pouvoir polémique en raison de l'appui que chacune d'entre elles apporte aux demandes de fonds (publics ou privés) de deux communautés distinctes de physiciens. La première option conforte les intérêts professionnels des spécialistes de physique des particules et des hautes énergies. Car les crédits publics gigantesques consacrés à leur discipline sont justifiés par le caractère supposé plus fondamental, plus élémentaire et plus « ultime » de son objet, à partir duquel on pense pouvoir reconstruire tout le reste¹². Au contraire, la seconde option sert les intérêts de la communauté des spécialistes de physique macroscopique de la matière condensée, dont fait partie Laughlin. Car s'il n'existe ni vrai fondement ni entités authentiquement élémentaires, les études menées à un niveau intermédiaire ont exactement autant d'importance que celles qui concernent le niveau tenu (à l'heure actuelle) pour fondamental. Pour ma part, je vais choisir mon camp dans ce débat brûlant, en concentrant mon attention sur la seconde option. Ce choix-là n'est lié à aucun intérêt professionnel de physicien, mais à un désir de philosophe : celui de mieux comprendre une possibilité intellectuelle inédite. J'essaierai donc de défendre l'option du « sans fond » contre deux objections. La première objection couramment faite à l'option d'une cascade de lois sans fondement, est qu'elle annule tout le bénéfice historique des approches réductionnistes. Mais, en vérité, il n'en va pas ainsi. La possibilité d'unifier un grand nombre de lois en les considérant comme portées par une même « base » est préservée ici. Car elle est indifférente au caractère « ultime » ou non des lois de cette base, et au statut « élémentaire » ou non de ses constituants. L'option du « sans fond » a même un avantage sur ce point. En elle, la question de la base ne se pose plus en termes d'existence, mais en termes de méthode. On n'a plus à se préoccuper de ce qu'est la base ultime et réelle (ce qui a toutes les chances de rester indécidable), mais seulement de savoir quelle représentation d'une base intermédiaire remplit le mieux sa fonction unificatrice. Les démarches de la réduction et de l'émergence des lois

⁸ E. Castellani, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 33, 251, 2002.

⁹ S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1993

¹⁰ T. Cao et S. Schweber, *Synthese*, 97, 33, 1993 ; J. Schaffer, *Noûs*, 37, 498, 2003.

¹¹ M. Kaku et J. Thompson, *Beyond Einstein*, Oxford University Press, 1995.

¹² A. Weinberg, *Minerva*, 1, 159, 1963 ; P. Anderson, *Science*, 177, 393, 1972.

sont ainsi rendues coopératives dans une dynamique de recherche, plutôt que conflictuelles dans une prise de position dogmatique. La seconde objection contre la thèse des lois toutes émergentes est aussi la plus lancinante. C'est celle, souvent évoquée, du bon sens : comment l'édifice du monde peut-il tenir sans fondations légales absolues, et sans « briques » ultimes ? La réponse est déjà contenue, pour qui sait la lire, dans le détail de la thèse des lois émergentes. Elle revient à transformer, une fois encore, les questions d'existence en questions de méthode. Selon la thèse des lois émergentes, ne l'oublions pas, il n'y a même plus lieu d'opposer un niveau de base, absolu, à des niveaux supérieurs, relatifs et épiphénoménaux. Car toutes les déterminations et toutes les lois sont relatives à des moyens d'accès expérimental ou à un domaine d'énergie exploré. En allant au bout de ce jugement, dire qu'on peut trouver pour n'importe quelle loi une base d'où elle émerge ne signifie pas que la nature est un puits sans fond dans l'absolu. Cela signifie seulement : (a) que le cours des recherches relativement auxquelles chaque niveau d'organisation est défini n'a pas de point d'arrêt prévisible ; et (b) que cela n'a de toute manière pas de sens de parler de la nature indépendamment des recherches qu'on peut y conduire. Ici, le seul « fondement », d'ailleurs mobile, de l'édifice légal des sciences est la pratique de la recherche.

Comment l'édifice du monde peut-il tenir sans briques ultimes ?

De l'émergence en psychanalyse

Par notre collègue Antoine FRATINI

Le concept d'émergence apparaît directement issu des sciences qui s'occupent de la complexité, en particulier la systémique. Cette relation directe entre complexité et émergence, soulignée par Alain STAHL (Bulletin N°109), nous autorise à affirmer qu'il ne peut y avoir de phénomènes émergents en l'absence d'une situation complexe et aussi que l'émergence de propriétés nouvelles représente un signe tangible de la présence, en amont, d'un système complexe.

Bref, le rapport entre complexité et émergence risque de devenir tautologique: c'est la vieille question relative à « *qui est né le premier entre l'oeuf et la poule ?* » !

Notons encore que la notion d'émergence est surtout descriptive. Elle se limite en effet à décrire l'existence d'un phénomène lié à la naissance de nouvelles propriétés, mais ne l'explique pas vraiment. Les systémiciens ont recours à ce propos au paradigme de la boîte noire: quand un système est complexe, il est possible de l'étudier en ne considérant que l'*input* et l'*output* et en renonçant à comprendre exactement comment les résultats ont été obtenus.

La notion d'émergence introduit donc dans les sciences modernes une limite de plus à la connaissance objective du monde. Les scientifiques utilisent le terme "émergence" devant la constatation que des propriétés ou des fonctions nouvelles sont nées d'une dynamique trop complexe pour être appréhendée d'une façon linéaire selon les instruments conceptuels de la science classique (Voir par ex Baquiast, Bulletin N°109).

Plus les sciences ouvrent leurs horizons, plus nombreuses deviennent les occasions de découvrir l'existence de systèmes complexes et donc de propriétés émergentes. La psychanalyse ne fait pas exception. Etant donné l'extrême complexité non seulement de notre cerveau (en quelque sorte le "hardware" de notre personnalité), mais également de notre structure psychique (les informations emmagasinées dans notre "software"), il ne pourrait en être autrement. Que l'on se réfère aux effets du signifiant (Lacan), à la ronde des opposés (Jung) ou aux conflits entre le Ça, le Moi et le Sur-Moi (Freud), la situation s'annonce des plus complexe.

Comment ne pas considérer comme complexe, par exemple, une opération psychique comportant la production d'un oxymoron, c'est à dire d'un élément de langage ayant la propriété de cacher *et en même temps* d'exprimer un signifiant? Pourtant, telle est bien selon Freud la formule de l'inconscient et de ses infinies productions (qu'il s'agisse de rêve, de lapsus, de symbole ou de symptôme). La rencontre avec le refoulé advient en un lieu où se produit une révélation, où un signifiant avec sa charge d'affect passe dans la chaîne des signifiés en produisant une nouvelle signification. En cet instant absolument imprévisible, non seulement "l'inconscient, Ça parle", mais "Ça me parle", c'est à dire que le Moi augmente sa prise sur ce qui le déterminait inconsciemment. Ceci éclaire le sens du plus fameux apophtegme freudien "là où ça était, je dois advenir". Ce qui pourrait passer pour de simples jeux de mots trahit au contraire une réelle difficulté à décrire un phénomène complexe de cet ordre, obéissant à une "autre logique", une logique non classique (Verdiglione). Le résultat même d'une analyse (la "solution" du sujet), en tant que toujours unique et imprévisible, peut être considéré comme le produit d'une émergence liée à la naissance de nouvelles significations.

Sur le versant jungien la chose est encore plus frappante. L'inconscient décrit par Jung (principalement l'*inconscient collectif*) est considéré comme la partie la plus profonde de la psyché. Cette partie est constituée par des dispositions innées à imaginer sur un mode collectif et universel

les dynamiques fonctionnelles profondes survenant à l'intérieur du sujet. Ainsi, les mythes sont remplis de symboles et de motifs archétypiques exprimant les grandes opérations de l'âme comme par exemple les motifs de mort et renaissance liés au renouvellement de la personnalité.

Le névrosé est selon Jung assailli par des positions contraires. Afin de résoudre ses divisions internes, il doit maintenir courageusement la confrontation entre les opposés. De cette confrontation, toujours délicate et difficile (un des termes est souvent inconscient), doit naître un troisième terme résolutif, souvent symbolique, émergeant de la complexité de l'âme.

Le psychotique au contraire succombe devant l'offensive de l'inconscient auquel il a déclaré la guerre et est envahi par ses productions. Tirailé entre les oppositions, le névrosé souffre d'un manque de contact avec l'inconscient et l'influence de ses archétypes, tandis que le psychotique en est submergé jusqu'à en perdre ses capacités de discernement.

Dans l'expérience jungienne, la solution des conflits est encore un résultat unique et imprévisible. A titre d'exemple, je citerai, pour sa simplicité et sa clarté d'exposition, un cas clinique relaté par Jung dans *Aion, études sur le symbolisme du Soi*:

Il s'agit d'une jeune étudiant universitaire qui s'était adressé à Jung pour résoudre un état de confusion mentale et de détresse profonde causé par la découverte que la faculté de philosophie à laquelle il était inscrit ne lui convenait pas. Il n'arrivait pas à comprendre s'il devait continuer ou bien changer d'études. Et, en ce dernier cas, il savait encore moins quelle autre faculté choisir. Il se trouvait donc dans une impasse et, plus le temps passait, plus son anxiété et sa confusion augmentaient. Un rêve vint à son secours: il se promenait dans un bois qui devenait toujours plus sauvage, jusqu'à ce qu'il s'aperçoive qu'il se trouvait dans une forêt vierge. Poussé par la curiosité, il s'enfonça toujours plus dans la forêt et arriva à un étang circulaire. C'était une source d'eau souterraine au milieu de laquelle reluisait une méduse d'à peu près 50 cm de diamètre. A cet instant le rêveur se réveilla en sursaut et opta immédiatement pour la faculté de sciences naturelles.

Jung interprète la forêt vierge comme une image de l'inconscient et l'étang avec la méduse au centre comme un mandala tridimensionnel, c'est à dire un symbole du Soi en tant que centre inconscient de la personnalité, véritable boussole intérieure apte à orienter la conscience dans les moments de difficulté. Ce symbole à la structure universelle (mandala) a donc fait émerger la solution grâce à la pratique d'une confrontation authentique. Ce patient aurait bien pu, comme le font nombre de sujets, suivre des conseils ou des directives extérieurs, mais en ce cas il n'aurait probablement pas eu cette expérience intérieure ni par conséquent acquis cette conviction si forte et intime. En d'autres termes, la confrontation authentique avec l'inconscient introduit, par la voie du symbole, un troisième terme, un élément nouveau et résolutif émergeant de la complexité de l'âme humaine.

Antoine Fratini

Un va-et-vient entre émergence et réduction

Si le réductionnisme vise à unifier et à simplifier notre vision du monde, l'émergence qui l'accompagne permet de comprendre la variété de celui-ci sans recourir à des hypothèses ad hoc¹³

Roger BALIAN Membre de l'Académie des Sciences
Service de Physique Théorique
CEA/DSM (SACLAY)

Comment pourrait-on suivre le mouvement des milliards de milliards d'atomes d'un milligramme de matière ?¹⁴

Les propriétés macroscopiques d'un système diffèrent radicalement de celles de ses constituants; pourtant elles en découlent, et c'est le passage d'une échelle à l'autre qui donne naissance à des comportements nouveaux. L'énergie microscopique, grandeur mathématique abstraite, se manifeste à notre échelle sous les formes les plus variées: chaleur, travail énergies cinétique, électrique, chimique ou nucléaire. Il a fallu plusieurs siècles pour trouver cette correspondance; en témoigne la date tardive (1875) où le mot « énergie » a été utilisé pour la première fois dans son acception scientifique. L'émergence introduit souvent des changements qualitatifs. Le caractère discret des atomes est occulté à notre échelle, où la matière apparaît continue.

On se heurte ainsi à des paradoxes. Les lois dynamiques qui régissent le mouvement des atomes sont réversibles, restant inchangées si l'on imagine remonter le temps, et pourtant il en émerge l'irréversibilité des processus thermodynamiques, caractérisée par la croissance dans le temps de l'entropie. De même, notre description microscopique quantique, est irréductiblement probabiliste, mais il en découle à notre échelle des lois déterministes. De plus, des concepts nouveaux émergent par changement d'échelle. De très nombreuses grandeurs: température, pression, entropie, viscosité, conductance, indice de réfraction, etc., n'existent pas à l'échelle microscopique. Elles s'interprètent en termes d'effets collectifs, explicables à l'aide des lois élémentaires de la microphysique. Si le réductionnisme vise à unifier et à simplifier notre vision du monde, l'émergence qui l'accompagne permet de comprendre la variété et la complexité de celui-ci sans recourir à des hypothèses ad hoc. Grâce au développement de la biologie moléculaire, il est admis que les processus du vivant ne découlent que de mécanismes chimiques, sans qu'intervienne une force vitale. En physique, on a longtemps pensé qu'une transition liquide-vapeur, par exemple, est causée à l'échelle microscopique par des interactions entre atomes différentes dans les deux phases, jusqu'à ce que Lars Onsager démontre en 1944 qu'une seule et même interaction peut engendrer les discontinuités caractéristiques d'un changement de phase. L'immense variété des espèces chimiques émerge en dernier ressort des simples règles de la physique quantique appliquées à des électrons et à des noyaux atomiques en interaction électromagnétique: rien d'autre que cela, mais combien de faits nouveaux!

Il arrive, dans une perspective réductionniste, qu'un certain ordre émerge du désordre. L'homogénéité et l'isotropie d'un fluide en font un matériau ordonné à notre échelle, mais ces propriétés sont issues du complet désordre régnant à l'échelle moléculaire. Il existe des situations inverses: le désordre d'un écoulement fluide turbulent provient des simples équations de Navier-Stokes lorsque la viscosité est suffisamment faible. D'autres fois, l'ordre se transforme par changement d'échelle sans se détruire: la forme régulière d'un cristal reflète directement

¹³ Article issu de la revue Sciences et Avenir Hors –Série « L'énigme de l'émergence » juillet août 2005

¹⁴ A lire: «Du microscopique au macroscopique», de Roger Balian (2 volumes; Ellipses, 1990) ; disponible en anglais: « From Microphysics to Macrophysics » (Springer, 1992).

l'arrangement presque parfait de ses atomes en un réseau. En fait, le concept d'ordre est partiellement subjectif. Si l'on veut parler avec précision, il faut lui donner un contenu quantitatif, ce que la mécanique statistique est parvenue à faire par analogie avec la théorie de la communication. Dans ce domaine, on associe à chacun des messages que l'on cherche à transmettre un nombre mesurant la quantité d'information qu'il véhicule. Ce nombre est d'autant plus faible que le contenu du message est plus prévisible. L'information qui nous manque avant réception d'un message définit l'entropie statistique. En physique, le message que nous adresse un système, c'est tout ce que nous pouvons apprendre sur lui, qui se caractérise par une probabilité. Le désordre existant dans le système s'identifie alors à notre manque d'information, l'entropie statistique. Bien que partiellement subjective puisque liée à une connaissance humaine, cette définition du désordre est quantitative; elle ne dépend pas de l'observateur, car deux observateurs placés dans les mêmes conditions attribueront la même entropie statistique au système étudié. Dans ces conditions, c'est la finesse de l'observation et de la description qui caractérise l'ordre. Un système connu dans le détail doit être considéré comme ordonné; si on le décrit à une échelle plus grande, on caractérise son état par la donnée d'un plus petit nombre de variables, de sorte qu'un système présentant un certain ordre - selon la présente définition générale lorsqu'il est décrit à l'échelle microscopique devient plus désordonné dans une description macroscopique.

L'attitude réductionniste, qui aide à concevoir le monde avec une grande économie de pensée, est intellectuellement séduisante. L'émergence qui l'accompagne, si on savait la mettre en oeuvre, permettrait d'appréhender l'ensemble immense des phénomènes englobés dans la réduction. Malheureusement, même si les constituants élémentaires d'un objet macroscopique sont simples, même si les lois qui les gouvernent à l'échelle microscopique sont connues, il est extrêmement difficile d'en déduire le comportement de cet objet, puisqu'un milligramme de matière est formé de plusieurs milliards de milliards d'atomes! Si on parvient à comprendre un certain nombre de cas d'émergence, c'est grâce à des modèles simplificateurs- fournis par des méthodes mathématiques élaborées - qui aident à passer d'une échelle à l'autre. L'énorme hiatus séparant les échelles rend impossible toute déduction rigoureuse à partir des premiers principes, et tout calcul numérique. D'ailleurs, même si on utilisait tous les ordinateurs du monde pour suivre le mouvement des molécules d'une infime quantité de matière, cela ne servirait à rien car les nombres ainsi manipulés seraient totalement inintelligibles. Il importe donc de simplifier la description, et une méthode efficace pour le faire est l'emploi des probabilités, sur lequel repose la physique statistique. La mise en oeuvre du réductionnisme implique un double mouvement ascendant et descendant. Ce va-et-vient entre induction et déduction, émergence et réduction, macroscopique et microscopique, est établi en physique depuis longtemps; la physique statistique est l'un des outils qui permettent de relier des niveaux de description différents.

L. Naccache (2006), *Le nouvel inconscient. Freud, Christophe Colomb des neurosciences*. O. Jacob.

Dans une première partie, l'auteur, neurologue connu, nous initie aux *processus mentaux inconscients*. Ils sont mis en évidence par des expériences subtiles, conjuguant la psychologie expérimentale – aussi bien sur des sujets sains que sur d'autres, souffrant de lésions cérébrales – et les méthodes les plus modernes d'exploration du cerveau. Un exemple célèbre en est la « vision aveugle », par laquelle un malade est capable - mais par des voies nerveuses latérales - de répondre à des questions concernant des objets qu'il n'a pas conscience de voir. Les processus mentaux inconscients sont multiples, toujours fugaces, mais peuvent même concerner des fonctions supérieures, sémantiques.

Dans une deuxième partie, l'auteur propose une interprétation de ces phénomènes dans le cadre d'un modèle de l'*espace de travail global conscient*, réseau neuronal très interconnecté, et relié à des petits réseaux variés, spécialisés dans cet inconscient cognitif.

La dernière partie s'interroge sur les liens avec l'inconscient freudien. Il apparaît clairement que certains traits de l'inconscient cognitif, comme sa fugacité, sont absents du second. Inversement, l'auteur n'a jamais constaté dans le premier le refoulement, si important pour Freud. Sa conclusion personnelle est que Freud, « Christophe Colomb des neurosciences », a eu des intuitions majeures, mais a mal identifié où il était parvenu ; l'inconscient psychanalytique ne serait-il pas plutôt « une interprétation consciente fictionnelle » ? Les psychanalystes préféreront probablement penser qu'inconscient mental et inconscient psychanalytique existent tous deux, différents. Ce livre, d'une grande clarté, est – au moins dans ses deux dernières parties – « discutable », mais au sens noble qu'il permettra des discussions, scientifiques et philosophiques, sur des sujets majeurs.

Alain Stahl. 4-2-07.