

**BULLETIN N° 99**  
**ACADÉMIE EUROPÉENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**Séance du Mardi 8 novembre 2005**

**Conférence de Paul BOURGINE,**

**Directeur de l'Institut des Systèmes Complexes de Paris.**

**« Introduction à la problématique de la complexité »**

**Prochaine séance : le Mardi 13 décembre 2005 :**

**1<sup>er</sup> Bilan du congrès PHYSIQUE et CONSCIENCE**

**(à 18h)**

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**  
**MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME**

**PRESIDENT** : Michel GONDRAN  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**SECRETAIRE GENERAL ADJOINT** :  
**TRESORIER GENERAL** : Bruno BLONDEL  
**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES** :  
**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDI.  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES** : Pr. François BEGON  
**PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE** : Doyen René DARS

**PRESIDENT FONDATEUR**  
**DOCTEUR** Lucien LEVY (†).  
**PRESIDENT D'HONNEUR**  
Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR**  
Pr. P. LIACOPOULOS

novembre 2005

**N°99**

**TABLE DES MATIERES**

- P. 3 Compte-rendu de la séance du 8 novembre 2005
- P. 6 Comptes-rendus de la Section Nice Côte d'Azur.
- P.12 Documents

Prochaine séance : Mardi 13 décembre 2005,  
MSH, salle 215

**1<sup>er</sup> Bilan sur le congrès**  
**« PHYSIQUE et CONSCIENCE »**  
**(à 18 h.)**

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences  
Siège Social : Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris  
Site Web : <http://aeis.ifrance.com/aeis/>

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

*Séance du*  
*Mardi 8 novembre 2005*

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 Jacques BARBIER, François BEGON, Gilbert BELAUBRE, Michel BERREBY, Thierry BLONDEL, Noëlle CAGNARD, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Manuel GALAN, Irène HERPE, Marie-Louise LABAT, Jean POIRIER.

Etaient excusés Gérard LEVY, Françoise DUTHEIL et Alain STAHL.

- Entre temps nous avons eu la triste nouvelle du décès de notre collègue Henri GULAND survenue le dimanche 12 novembre 2005 -.

### **PROPOSITIONS ADMINISTRATIVES**

Gilbert BELAUBRE nous propose avant le congrès « PHYSIQUE et CONSCIENCE » d'éditer le Tome 1 de nos travaux sur la conscience – ouvrage consacré aux actes du congrès de 2002 « BIOLOGIE ET CONSCIENCE » et de le proposer aux participants et intervenants du congrès de décembre prochain.

Notre Président, Michel GONDRAN, nous fait part de la candidature du Pr. Jean Pierre FRANCOISE, un mathématicien qui a travaillé à PARIS VI chez le Pr. Jean Louis LIONS. Jean Pierre FRANCOISE a travaillé sur la théorie de la bifurcation des systèmes dynamiques et à ses applications aux domaines de la biologie et notamment à la modélisation des rythmes du vivant.

Lauréat d'un Prix de l'Académie des Sciences, il a écrit 88 publications internationales.

Sa candidature soumise à un vote à bulletins secrets a été retenue à l'unanimité des votants.

En dernier point, Michel GONDRAN et Gilbert BELAUBRE nous font part de l'abandon de l'idée d'un colloque sur les Sciences de la Terre pour lequel une concertation précise avec la Section de Nice serait souhaitable. En revanche, un colloque sur les problèmes de la Complexité et de la Plasticité serait envisageable pour la section de la MSH.

C'est d'ailleurs à ce titre que Michel GONDRAN a invité Paul BOURGINE pour nous introduire la Problématique de la Complexité.

## **Conférence de Paul BOURGINE**

### **« Introduction à la Problématique de la Complexité »**

Paul BOURGINE, polytechnicien, est directeur adjoint du C.R.E.A. (Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée), chercheur au CEMAGREF, fondateur de l'Institut de Recherche sur la Complexité (IRC). Il a fait une thèse d'économie et en sciences cognitives. Il a travaillé également dans l'Intelligence Artificielle (IA) sur les systèmes experts.

Dans son introduction, Paul BOURGINE déclare se limiter au traitement des Systèmes complexes, le terme complexité étant trop polysémique.

Il nous donne en exemple de systèmes complexe celui du vivant. Pour lui, un système complexe est défini par plusieurs critères :

- Emergence
- Grands réseaux en interaction
- Plasticité
- Adaptabilité
- Robustesse
- Existence d'un invariant régissant les rapports entre les divers éléments du système et caractérisant sa structure, son identité.

Dans le vivant, le maintien de cette structure qui doit nécessiter une dépense d'énergie minimale est appelé Autopoïèse. Il définit le rapport du *Tout* avec les *Parties*.

Par exemple, dans les systèmes sociaux on distingue 2 grands courants :

- 1) Le système économique qui repose sur un individualisme méthodologique se transformant en un système complexe émergent des comportements individuels.
- 2) Le système sociologique dans lequel les actes individuels doivent obéir à des impératifs sociaux.

Dans les deux cas, la complexité prend en compte les 2 aspects individuels et globaux. La complexité mêle « émergence et immergence ».

La complexité consiste à prendre en compte plusieurs niveaux d'organisation :

- Par exemple dans le vivant, gène, cellule, organes, avec les moteurs macromoléculaires que sont l'ADN, les enzymes (protéines) .

Les systèmes les plus complexes diffèrent aussi bien du cristal (trop figé) que de la fumée (trop aléatoire).

La complexité maximale se situe entre ordre et désordre au bord du chaos.

#### **Thèmes de recherche sur la complexité**

Les questions partagées par les systèmes complexes sont :

- la capacité à construire des dynamiques multiéchelles de systèmes complexes
- l'impossibilité d'établir les lois des systèmes complexes à partir des simples lois de la physique

Les seules méthodes d'approche possibles sont :

- Prendre les données à tous les niveaux d'échelle
- Reconstruire les dynamiques d'une échelle à l'autre (modélisation de l'émergence)
- Faire intervenir des problèmes morphodynamiques en s'inspirant des travaux de René Thom
- Etudier la vitesse de transformation d'une forme

Gouvernance des systèmes complexes

Par exemple en médecine on peut opposer les « médecines douces » qui proposent une stratégie de contrôle de l'ensemble des éléments du système aux médecines « dures » qui attaquent une seule pathologie.

De nombreux centres d'étude des systèmes complexes existent de par le monde :

- Santa-Fe (Gell-Mann) , la Nouvelle Alliance (Prigogine) et en France des centres tels que le CNRS, l'INSERM, l'INRA.

Paul BOURGINE ne cherche pas à créer un nouveau laboratoire, mais un Institut en voie de Création avec LARRUTURU (INRIA) au caractère trans-disciplinaire et interdisciplinaire.

La complexité mobilise de grandes capacités de calcul. Les travaux sont en partie basés sur ceux de KOLMOGOROV qui définit le niveau de complexité par le plus petit programme capable de reconstruire les données en éliminant le bruit de fond , ou de BENNETT qui se base sur le temps nécessaire pour reconstruire le système.

Parmi les ouvrages à lire :

- Prigogine « Exploring the Complexity » ou d'autres de Varela, Edelman.

Après cet exposé, la séance a été levée à 20heures.

Bien amicalement à vous.

Irène HERPE-LITWIN.

## *Comptes-rendus de la Section Nice-Côte d'Azur :*

Le savoir est le seul bien qui s'accroisse à le partager. Comprendre est bien sans limite qui apporte une joie parfaite. Baruch SPINOZA (1632-1677)

### *Compte-rendu de la séance du 15 septembre 2005* (86<sup>ème</sup> séance)

#### **Présents :**

Jean Aubouin, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Jean-Paul Goux, Michel Lazdunski, Alexandre Sosno, Jacques Wolgensinger.

#### **Excusés :**

Pierre Couillet, Emile Girard, Thierry Gontier, Gérard Iooss, Jean Jaubert, Jean-François Mattéi, Daniel Nahon, Maurice Papo.

#### **1- Approbation du compte-rendu de la 85<sup>ème</sup> séance.**

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

#### **2- 6<sup>ème</sup> colloque : Les peurs de notre temps.**

Le 4 octobre prochain se tiendra, au Château Valrose, une conférence de presse au sujet du programme prévu pour la fête de la Science. Il serait bon que notre académie soit représentée puisque notre colloque au CUM se tient dans le cadre de ces manifestations.

Sonia Chakhoff souhaite recevoir rapidement tous les résumés de communications.

La liste des intervenants est arrêtée définitivement pour permettre l'impression et la diffusion des invitations et des affichettes.

### **3- Les pôles de compétitivité (Michel Lazdunski).**

C'est une opération à géométrie variable lancée par le gouvernement pour favoriser des actions conjointes entre la Recherche (fondamentale et appliquée) et l'Industrie. On a demandé à toutes les régions de France de définir tout ce qui était le plus compétitif dans chacune d'elles avec l'idée que l'on sélectionnerait, à partir de cela, quatre ou cinq pôles de compétitivité.

Il fallait donc constituer des dossiers de proposition sachant que déjà étaient retenus : le Plateau de Saclay pour tout ce qui concerne l'énergie, Toulouse pour l'aéronautique, Grenoble pour les nanotechnologies et probablement aussi Lyon.

Une inconnue était de préciser les buts de ces pôles et les financements éventuels.

Finalement, c'est l'esprit civique qui a dominé et beaucoup de gens se sont mis au travail sans trop savoir ce qui en sortirait.

Pour notre département, l'initiative est venue exclusivement du Préfet Pierre Breuil. Pour un pôle « parfums » le Préfet a sollicité Jean Mane, directeur de la plus grosse entreprise de parfums à Grasse.

On a abouti ainsi, pour notre région, à deux pôles de compétitivité majeurs : « solutions communicantes sécurisées » et senteurs, arômes, saveurs ».

Le premier englobe tout ce qui concerne la sécurisation des communications par internet ou par mobiles, ce qui met en jeu l'Université, l'INRIA et les entreprises locales (IBM, Texas instrument, etc.).

Au départ, ce projet concernait uniquement notre département mais il s'est très rapidement élargi à Marseille avec toute la microélectronique.

Le deuxième ne pouvait se justifier que par un effet de niche : 51 % du chiffre d'affaires français dans ce domaine est réalisé à Grasse dans des entreprises qui sont toutes des PME, parfois minuscules mais très spécialisées, mais qui représentent tout de même 8 % du chiffre mondial, malgré une concurrence effrénée de l'Allemagne, de la Suisse et de l'Extrême-Orient. Le sujet « senteur » s'est ajouté car c'est un sujet important pour les Basses-Alpes (lavande).

La notion de pôle a beaucoup évolué (au début, il n'était pas question que les laboratoires publics reçoivent quoi que ce soit), mais surtout leur nombre a beaucoup augmenté. C'est ainsi qu'en PACA on trouve un pôle mer (associant Toulon et Brest), un pôle risques et environnement (national et PACA).

Il y a eu finalement une centaine de projets proposés. On a donc créé un Comité National qu'on a chargé d'en choisir trente, en classant les quinze premiers susceptibles de développer le plus d'emplois.

Le projet de Sophia Antipolis sur les « Solutions communicantes sécurisées » est arrivé dans les premiers mais d'autres ont également été retenus.

Cependant tous les sujets n'étaient pas couverts : finalement, on est arrivé à soixante-sept dont sept ont été retenus pour PACA (soit 10 % au total).

Le rôle des chambres de commerce et d'industrie est d'accompagner ces projets en attirant sur ces créneaux les PME et PMI et de promouvoir le savoir-faire de la région.

Il a fallu, pour chaque projet retenu, rédiger un rapport pour la fin septembre, ce qui a été particulièrement ardu du fait de la période estivale d'où des présentations sans doute assez disparates. C'est par exemple le cas pour le

pôle sur les parfums où les industriels concernés ne fonctionnent pas avec des brevets mais avec le secret. Donc, dans le rapport sur ce pôle, la page sur les projets de recherche sera pratiquement une page blanche. Par contre, il y aura une partie importante sur la recherche (plateformes chimiques très performantes) et sur la formation en adéquation avec les industries locales. Il y aura évidemment un chapitre très important sur la santé humaine. En effet, tous les arômes et parfums industriels doivent être étudiés avec le plus grand soin pour vérifier s'ils ne sont pas nocifs (irritation, cancer, digestion, etc.) d'une quelconque manière (le CHU de Nice est très impliqué). Programme RICH : tous les produits chimiques arômes, parfums doivent être testés toxicologiquement « in vitro » (!!).

Il s'agit donc de précéder dans ce domaine les réglementations européennes. On pourrait déboucher sur un Institut, à Sophia Antipolis, qui travaillerait les mécanismes de fonctionnement des arômes et des parfums sur le modèle du « MONEM » américain. Il ne s'agirait pas seulement de développer les recherches en neurobiologie, mais aussi de comprendre pourquoi les sensations évoluent avec l'âge, la maladie, pourquoi ce qui sent bon agit sur l'optimisme, pourquoi ce qui sent mauvais a une influence négative, etc.

Pour les Basses Alpes enfin, il y a nécessité d'étudier la pathologie de la lavande ainsi qu'on le fait pour la vigne ou certains légumes.

Un des intérêts de ces pôles de compétitivité est qu'ils concernent peu les grandes entreprises mais principalement les PME, PMI.

Lors d'une prochaine séance, René Blanchet, qui a suivi l'ensemble des dossiers à la Fondation Sophia Antipolis, fera une présentation générale des 7 pôles de compétitivité validés en région P.A.C.A. :

- Solutions communicantes sécurisées
- Mer : sécurité, sûreté
- Gestion des risques et vulnérabilités des territoires
- Photonique
- Arômes, senteurs, saveurs (*traité ce jour*)
- Energies non génératrices d'effet de serre
- Fruits et légumes

\*\*\*\*\*

Prochaine réunion  
le jeudi 20 octobre 2005 à 17 heures  
au siège  
Palais Marie-Christine  
20 rue de France  
06000 NICE



**Compte-rendu de la séance du 20 octobre 2005**  
(87<sup>ème</sup> séance)

**Présents :**

Jean Aubouin, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Jean-Paul Goux, Yves Ignazi, Maurice Papo, Jacques Wolgensinger.

**Excusés :**

René Blanchet, Sonia Chakhoff, Emile Girard, Thierry Gontier, Gérard Iooss, Jean Jaubert, Michel Lazdunski, Jean-François Mattéi, Daniel Nahon.

**4- Approbation du compte-rendu de la 86<sup>ème</sup> séance.**

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

**5- 6<sup>ème</sup> colloque : Les peurs de notre temps.**

Le colloque a eu lieu vendredi 14 octobre 2005 au Centre Universitaire Méditerranéen. On peut regretter cependant que l'on n'ait pas touché un public plus nombreux. Nous en avons tiré les enseignements suivants :

a) Le colloque prochain devra se tenir en octobre le samedi précédant la semaine de la « Fête de la Science » durant laquelle de nombreuses manifestations concurrentes sont organisées.

b) le programme (titre et intervenants) doit être connu au plus tard en juin afin de permettre une meilleure information du public. Notre confrère Jacques Wolgensinger a accepté d'être le coordonnateur de cette manifestation avec Sonia Chakhoff et Guy Darcourt. Il conviendra notamment de mieux informer l'Université que notre colloque doit intéresser (professeurs, étudiants).

Il faut organiser toute la série d'actions qui permettront d'informer et d'attirer un plus large public.

**6- Les pôles de compétitivité et les pôles de recherche.**

La prochaine réunion nationale sur les pôles de compétitivité aura lieu à Nice le 4 novembre prochain en présence des ministres Nicolas Sarkozy et Christian Estrosi.

Durant cette période va être discuté également l'avant-projet de programme pour la recherche française qui doit créer des « pôles de recherche de l'enseignement supérieur (PRES)

Ces pôles vont être situés dans différentes universités et le président de Nice-Sophia Antipolis a proposé aussitôt d'héberger l'un d'entre eux avec l'Observatoire, le CNRS et peut-être l'Université de Paris 6 (Villefranche) et l'Université de Toulon.

La création des pôles de compétitivité et des pôles de recherche de l'enseignement supérieur n'est-elle pas un moyen de réformer la vieille conception du CNRS calquée sur l'Académie des Sciences d'URSS ?

**Jean Aubouin** : Le CNRS a été lancé en 1939 par les Joliot-Curie qui, à la suite d'un voyage, avaient été frappés par le rôle joué par l'Académie des Sciences de l'URSS qui avait le double rôle d'être une académie, mais aussi de diriger les laboratoires de recherches les plus importants.

En France la direction des laboratoires de recherche a été –heureusement– séparée des Académies et confiée au CNRS nouvellement créé .Or,le rôle des chercheurs,en principe en charge « démocratique » de l'institution, est plus que contrebalancé par les organisations syndicales qui ont envahi le système. Dès lors, l'égalitarisme guide l'attribution des crédits qui sont ainsi saupoudrés ; et le critère d'excellence n'est pas le seul qui guide les recrutements et les promotions de carrière.

Le système anglo-saxon, et surtout américain, dont il faut bien admettre les succès, est fondé sur la sélection et la compétition entre les Universités et entre les Chercheurs, sur des critères de qualité scientifique, largement mesurés sur les publications. La NSF (National Science Foundation), à la différence du CNRS, est une agence d'objectifs attribuant les crédits aux projets de recherche les plus sérieux. Une bonne solution serait donc de fondre le CNRS dans l'Université, le CNRS devenant une agence d'objectifs. Ce fut le projet de Claude Allègre qui, dans un premier temps fonctionnarisa les personnels pour pouvoir les intégrer dans l'Université ; le projet resta à mi-chemin ...

Le CNRS est-il réformable ?

Une autre question est le recrutement des étudiants par les Universités qui n'ont droit ni à la sélection ni à la concurrence. Celles-ci existent pour les Grandes Ecoles qui drainent les meilleurs éléments ; mais ceux-ci se destinent le plus souvent, surtout pour les plus prestigieuses, vers les fonctions gratifiantes de gestion et de direction, loin de la recherche proprement dite ; du moins pour la recherche fondamentale, car, pour les recherches appliquées beaucoup d'entre eux s'y destinent avec succès. Certes quelques organismes recrutent dans ce vivier d'excellence, comme le CEA, l'INRA, l'INRIA, etc. (cette liste n'est nullement exhaustive !).Les étudiants qui vont à l'Université sont bien souvent ceux qui n'ont pas pu faire autre chose (il y a heureusement des exceptions).

Rendre aux Universités le droit à la sélection et à la concurrence changerait du tout au tout les perspectives de la Recherche fondamentale. Aux USA les Universités de l'Ivy league (Harvard,Yale, Columbia etc.) ou celles de Californie comme l'UCLA, Stanford etc. qui ont nourri la Silicon valley, sont sélectives et concurrentielles ; comme d'ailleurs toutes les Universités qui se classent ainsi selon leur notoriété.

L'Université française est-elle réformable ?

Les pôles de compétitivité répondront-ils à ce besoin de réforme tant du CNRS que de l'Université en organisant la compétition des programmes ?

Peut-être.

A moins que ce ne soit une énième tentative de développer le tissu de la recherche selon la méthode bien française qui consiste à aider les structures que ne marchent pas aux dépens de celles qui marchent, dans un souci ... d'égalité .

Il n'est pas interdit d'espérer.

**7- Accueil d'un nouveau membre.**

Le Président propose d'accueillir un nouveau membre dont il distribue le *curriculum vitae* à titre d'information confidentielle. Il demande à chacun de le lire.

Tout renseignement complémentaire ou tout refus doit être formulé par téléphone ou autrement au Président.

**8- Un sujet de réflexion.**

THUCYDIDE

Extrait de la « Guerre du Péloponnèse »

III, 89

*« Tandis que des séismes se produisaient, en Eubée à Orabiai, la mer recula loin de ce qui était alors la terre, puis se souleva et envahit un secteur du territoire de la cité, dont elle submergea une partie, alors qu'elle se retira du reste, si bien qu'est actuellement mer ce qui auparavant était Terre ; et la mer fit périr tous les gens qui n'avaient pas pu la devancer en courant sur les hauteurs ».....*

*« La cause d'un tel phénomène est, à mon avis, qu'au point où le séisme est le plus fort, à cet endroit la mer se rétracte, puis soudain s'étirant en sens inverse produit une vague plus violente ; tandis que sans séisme il ne me semble pas qu'un tel phénomène puisse se produire ».*

Outre la description d'une précision extraordinaire d'un raz de marée ce qui dans ce texte laisse rêveur est l'interprétation parfaite qu'il en fait cinq siècles avant J. C.

Tout cela fut oublié ou nié, attribué à la vengeance de Dieu, il fallut attendre Roger Bacon et les Lumières pour retrouver ces interprétations. Quel temps perdu !

★★

Prochaine réunion  
le jeudi 17 novembre 2005 à 17 heures  
au siège  
Palais Marie-Christine  
20 rue de France  
06000 NICE

## Documents

Dans le cadre d'une série d'informations sur la complexité, nous vous proposons deux textes sur la complexité. Par ailleurs, notre président qui est entrain de rédiger un ouvrage de mécanique quantique « *Et si Einstein et de Broglie avaient raison ?* » nous en propose une introduction .

P. 13 :Un extrait du très beau livre de Dominique LAMBERT et René RESZSÖHAZY, « Comment les pattes viennent aux serpents » pour introduire le problème de la complexité

P. 24 : Une théories des systèmes proposée par notre collègue Alain STAHL

P. 25 : « Et si Einstein et de Broglie avaient raison ? » par notre collègue Michel GONDRAN

# "COMMENT LES PATTES VIENNENT AUX SERPENTS »

de Dominique Lambert, *philosophe et physicien, Professeur aux Universités Notre-Dame de la Paix à Namur, et de René Rezsöhazi, Professeur d'embryologie et de Biologie moléculaire à l'Université catholique de Louvain à Louvain-la-Neuve.*

Nouvelle Bibliothèque Scientifique Flammarion, 2004

## Chapitre X

### LES MATHÉMATIQUES DE LA PLASTICITÉ III.

#### L'ÉMERGENCE DE LA THÉORIE DES PAYSAGES

Le touriste qui passe ses vacances dans la vallée de Chamonix est sans doute passé par le joli village des Houches. Il ignore sans doute qu'en remontant la côte des Chavents, il va la plus célèbre école d'été de physique théorique, fondée en 1951 par Cécile DeWitt-Morette, pour permettre aux jeunes chercheurs de se former au contact des professeurs les plus réputés<sup>1</sup>. L'école des Houches a vu dans ses chalets, car il s'agit bien d'une montagne, Wolfgang Pauli, Enrico Fermi, mais aussi plus près de nous, Pierre-Gilles de Gennes, Georges Charpak, David Ruelle et Alain Connes. En 1986, dans cet environnement alpin, les participants - que l'on soustrait au charme du mont Blanc à la fin de chaque pause-café, au son... d'une cloche de vache -, vont suivre des cours où se découvrent des «paysages» aux multiples vallées... C'est que l'école s'intéresse cette année-là aux systèmes complexes ou désordonnés dont la description, qui intéresse au plus haut point les physiciens de l'état solide, les biologistes mais aussi les informaticiens, fait intervenir ce concept central de paysage énergétique «accidenté» et les propriétés des «promenades» dans de tels paysages! Nous allons examiner les sources de cette notion et montrer son importance pour la biologie la plus récente<sup>2</sup>.

#### **Retour aux sources: les travaux de Fisher et de Wright**

Remontons donc un peu dans le temps en évoquant un débat qui opposa, dans les années 1930, deux géants de la génétique contemporaine: R. A. Fisher et S. Wright. Comme l'a bien montré récemment Robert A. Skipper, philosophe des sciences à l'université de Cincinnati, cette controverse, à propos de l'explication de l'évolution, persiste encore aujourd'hui<sup>3</sup>.

En 1930, Ronald A. Fisher, à qui l'on doit d'importants travaux en mathématiques, a décrit, dans *The Genetical Theory of Natural Selection*<sup>4</sup>, l'évolution de grandes populations d'individus se reproduisant au

---

<sup>1</sup> R.-L. Bénichou, «L'École de physique théorique des Mouches», *Pour la science*, n° 189, juillet 1993, p. 10-11.

<sup>2</sup> Pour la compréhension de ce chapitre, il sera utile de se reporter à notre annexe 4, p. 349,

<sup>3</sup> R.A. Skipper, «The Persistence of the R.A. Fisher-Sewall Wright Controversy», *Biology and Philosophy*, 17 (2002), 341-367.

<sup>4</sup> Oxford University Press, 1930.

hasard et dont le génome subit des mutations aléatoires, en utilisant les outils de la mécanique statistique. Il considère que les diverses variantes des gènes, les allèles, sont indépendantes les unes des autres et il étudie sur cet ensemble d'allèles, vu un peu comme un «gaz de particules», l'effet statistique de la sélection naturelle. Celle-ci conduit progressivement la population vers un état d'adaptation maximale. On voit ici à l'œuvre toute la fécondité de l'image « physique » qui sous-tend la théorie de Fisher : tout comme le second principe de la thermodynamique conduit inexorablement les systèmes fermés vers un maximum d'entropie, de même la loi de la sélection naturelle fait monter les populations de gènes vers des états correspondant à des organismes de plus en plus adaptés à leur environnement<sup>5</sup>.

On peut donner une image éclairante de la théorie de Fisher. Imaginons un paysage formé d'une grande plaine flanquée, au milieu, d'un pic rocheux élevé. Les populations d'allèles sont alors comme des groupes d'alpinistes qui, alors que tout le paysage est perdu dans le brouillard, tentent de trouver leur chemin et de gravir le pic en aveugles, par tâtonnements. Lorsqu'un groupe atteint la base du pic, il est enthousiaste et son courage redouble, l'ascension en est favorisée. Les groupes errants dans la plaine se découragent et finissent par abandonner la partie. De même, il peut arriver qu'un ou plusieurs alpinistes, arrivés à une certaine altitude, dévissent soudainement et se retrouvent bien plus bas. Découragés, ils se retirent alors de la course.

Dans un article publié en 1932 et dont le contenu va inspirer un grand nombre de généticiens, de biologistes du développement et de mathématiciens spécialistes des problèmes d'optimisation, Sewall Wright<sup>6</sup> propose une vision plus complexe de l'évolution. Les gènes, qui subissent des mutations aléatoires, ne sont plus considérés comme indépendants des autres du point de vue de l'adaptabilité globale d'un individu. Un même gène peut en effet intervenir dans la détermination de plusieurs caractères phénotypiques différents (pléiotropie) ou agir sur l'expression d'un caractère phénotypique d'un autre (épistasie). Ainsi, le modèle de Wright abandonne complètement l'hypothèse d'une sorte de cumulativité, d'additivité pure et simple des contributions des gènes à l'adaptabilité globale. Les gènes forment donc un système en interaction où certains peuvent rétroagir sur d'autres. On peut donc dire que la vision de Wright est d'emblée non linéaire, contrairement à celle de Fisher. Pour Wright, la sélection naturelle joue un rôle important dans l'évolution des populations, mais il faut tenir compte en outre des migrations de populations et de la dérive génétique. Explicitons un instant cette dernière. Dans une population donnée, les individus présentent des variations génétiques : certains sont porteurs de tels allèles et d'autres d'allèles différents. Cependant, ils se distribuent tous autour d'une moyenne statistique. Il peut se faire que, à la suite d'une catastrophe qui élimine une grande partie des individus ou lors d'une migration, volontaire ou accidentelle, une petite partie d'une population porteuse d'allèles relativement rares se trouve devoir évoluer seule. La fréquence des allèles a donc changé par rapport à la population initiale, non en raison d'un effet mutationnel, mais par un phénomène que l'on appelle justement la «dérive génétique».

Pour illustrer sa théorie, Wright utilise l'image du «paysage adaptatif» (*adaptive landscape*). L'idée est en réalité la même que celle que nous avons expliquée dans le cadre de la théorie de Fisher: on représente un paysage dont l'altitude symbolise le niveau d'adaptabilité d'une population caractérisée par un ensemble bien précis d'allèles. Mais il y a maintenant une différence majeure, qui suscite toute la différence et le débat entre les deux théories : l'interaction entre gènes et le fait que leur valeur adaptative n'est plus simplement cumulative font que le paysage ne présente plus un seul pic adaptatif, mais plusieurs d'altitudes différentes et séparés par des vallées plus ou moins profondes. La sélection naturelle fait

<sup>5</sup> Cet environnement est lui-même évolutif et fluctuant, ce qui veut dire que la description que nous donnons ici ne peut être qu'une première approximation !

<sup>6</sup> S. Wright, «The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding and Selection in Evolution», in D.F. Jones (ed.), *Proceedings of the Sixth Animal Congress of Genetics I.*, 1932, p. 356-366; cité par W. B. Provins (éd.), *Sewall Wright. Evolution, Selected Papers*, Chicago, University of Chicago Press, 1986, p. 161-177.

toujours évoluer vers des configurations génomiques de mieux en mieux adaptées, mais elle doit parer à une dérive qui peut éventuellement agir contre elle et conduire à des configurations inadaptées. Ce schéma n'est pas contraire au darwinisme, il en est une extension. Le réseau d'interaction des gènes, responsable du paysage adaptatif tortueux, intervient comme une contrainte nouvelle au processus d'adaptation par mutations et sélections.

Faisons fonctionner maintenant notre imagination de montagnard pour suivre les courageux participants d'un concours d'escalade <sup>7</sup> ! Et, de nouveau, plongeons nos équipes dans le brouillard ! Dépourvus de cartes, les alpinistes sont censés, en montant toujours en altitude (un altimètre faisant foi !), trouver et gravir un sommet, puis s'y arrêter : c'est là la règle du jeu. L'équipe qui atteint le sommet de la plus haute montagne remporte la compétition, les autres ont un prix de consolation proportionnel à l'altitude atteinte. On peut imaginer différentes issues à ce concours alpin :

- a.. une première équipe gravit un sommet et c'est le plus haut ! Bravo, ils ont gagné;
- b. une deuxième équipe, au bout d'un long chemin, dans l'atmosphère ouateuse d'un frais brouillard, croit trouver la base d'un haut pic; après une courte escalade, le sommet se dévoile: déception, il s'agit d'un sommet d'altitude tout à fait moyenne ;
- c. une autre équipe a encore moins de chance. Surprise par une avalanche, la cordée est entraînée très bas dans une vallée et, tous les membres étant blessés, elle y reste bloqué ;
- d. une dernière équipe, qui montait sans le savoir vers un tout petit pic, est prise dans la même avalanche. Heureusement, elle arrive au fond d'une autre vallée sans blessés. Les organisateurs lui permettent alors de reprendre l'ascension (tout est prévu dans le règlement). Cependant, troublés par la chute et leurrés par le brouillard qui s'épaissit, ils commencent à gravir le flanc d'une autre montagne. La chance est avec eux. c'est un des plus hauts sommets !

La petite fable alpine éclaire très simplement la richesse de la théorie de Wright. La sélection naturelle correspond à l'injonction de ne jamais perdre de l'altitude. Partant d'un certain degré d'adaptation, elle ne peut que grandir, mais une population, tout comme les alpinistes du cas b, peut être piégée dans un état non maximal d'adaptabilité. Autrement dit, la sélection naturelle ne peut être vue comme une explication suffisante de la convergence vers une vie optimalernent adaptée. Les avalanches symbolisent la dérive génétique qui peut diviser les populations et les conduire vers des états moins bien adaptés. L'image des alpinistes blessés dans le fond d'une vallée (cas c) représente alors cet état où la sélection naturelle ne peut plus s'opposer aux effets non adaptatifs de la dérive. Le dernier cas (d) est très intéressant. Il symbolise les cas où une population qui évoluait vers un état moyennement adapté à son environnement peut, du fait d'une dérive génétique, passer par des états momentanément moins bien adaptés, pour atteindre en fin de compte le maximum adaptatif.

La fable suggère d'autres situations intéressantes. Nous allons en retenir encore une. On pourrait imaginer qu'un groupe d'alpinistes qui se reposent sur un glacier coincé entre deux pentes rocheuses soit subitement divisé par une crevasse infranchissable. Chaque groupe décide alors de gravir la montagne qui lui est la plus proche et atteint des sommets d'altitudes identiques ou différentes. C'est ce genre de situations qui permettrait de comprendre pourquoi le rhinocéros d'Afrique possède deux cornes longues alors que celui d'Inde n'en possède qu'une relativement trapue <sup>8</sup>. Une même population de rhinocéros aurait été divisée en deux par un événement accidentel, ces deux populations génétiquement différentes évoluant alors vers le sommet adaptatif le plus proche sous la poussée de la sélection naturelle.

---

<sup>7</sup> Le lecteur trouvera une autre fable plus «botanique» dans le beau livre du mathématicien de l'université de Warwick. Ian Stewart, *Life's Other Secret. The New Mathematics of the Living World*, New York. John Wiley, 1998. p. 110-111.

<sup>8</sup> Nous renvoyons ici à la référence incontournable de A.J.F. Griffiths, W.M. Gelbart, J.H. Miller, R.C. Lewontin, *Analyse génétique moderne*, trad. fr. C. Sanlaviîle, revue par D. Charmot et D. Aragnol, Bruxelles, De Boeck Université, 2001, p. 560-569.

L'intérêt de la théorie de Wright est de nous amener à une conception raffinée de l'évolution suivant laquelle on explique aisément pourquoi la sélection naturelle, à elle seule, ne peut expliquer la «montée» vers des états d'adaptation maximale et pourquoi les différences environnementales n'expliquent pas nécessairement celles qui apparaissent dans deux populations animales séparées issues d'une même population initiale.

Le fondement de l'explication de Wright est le relief tourmenté qui agrémente son «paysage adaptatif». C'est bien parce qu'il y a une multiplicité des sommets adaptatifs qu'il y a une multitude de chemins ne conduisant pas nécessairement vers le plus haut sommet ou que deux sous-groupes d'une population vont vers deux sommets différents. À son tour, le caractère tourmenté du paysage provient de l'interaction non linéaire entre les gènes. Le fait que les gènes soient considérés comme les éléments interconnectés d'un réseau et non pas comme des entités indépendantes donne une géographie extrêmement riche au paysage adaptatif. La sélection naturelle tend à augmenter l'adaptabilité. Une fois parvenue à un sommet adaptatif, qui n'est pas nécessairement le meilleur, la population y reste confinée comme dans un état localement stationnaire. Nous allons retrouver ce genre de situations très souvent dans la description des systèmes vivants à plusieurs de leurs échelles caractéristiques. En effet, dès que nous considérons, dans un tel système, des interactions, et plus spécialement des rétroactions entre les éléments d'un réseau complexe, sa description nécessite la prise en compte d'un «paysage» au relief tourmenté. La dynamique du système est alors décrite comme une promenade dans ce genre de paysage. .. La vie serait-elle une promenade ?

Remarquons, au passage, que l'utilisation de cette notion de paysage pour la description et la compréhension de la dynamique d'un système complexe n'était pas, dans les années 1930, une originalité des biologistes. S'inspirant des travaux de Poincaré et Störmer, Georges Lemaître et Manuel Sandoval Vallarta se servirent aussi, à partir de 1935, d'un «paysage» pour classer les familles d'orbites des particules chargées piégées par le champ magnétique de la Terre, dont les effets les plus spectaculaires sont les aurores boréales. Dans ce contexte, l'arrivée de ces «rayons cosmiques » au voisinage de la Terre est visualisée comme l'escalade réussie d'un col menant à une vallée circulaire, à partir d'une plaine représentant l'espace à grande distance.

### **Le paysage épigénétique de Waddington**

Un pas décisif est franchi dans l'approfondissement de la métaphore du paysage en biologie, quand Conrad Hal Waddington introduit, dans les années 1950, son concept de «paysage épigénétique<sup>9</sup>». Dès 1940, dans son ouvrage *Organizers and Genes*<sup>10</sup>, il avait insisté sur l'importance du développement d'une topologie biologique censée rendre compte des changements de formes rencontrés dans le vivant. Influencé très certainement par les idées «non réductionnistes<sup>11</sup>» de son Theoretical Biology Club, fondé à Cambridge par le philosophe J.H. Woodger dans les années 1930, Waddington entreprend de comprendre le processus du développement embryonnaire sur des bases non simplement génétiques. Pour rendre compte de cette situation, il imagine que le développement d'un embryon est comparable à la trajectoire d'une bille qui roule dans les multiples vallées d'un paysage incliné. Celui-ci doit être vu comme une sorte de toile dont la forme est maintenue par des fils reliés à des piquets, les premiers représentant les signaux biochimiques contrôlés par les gènes symbolisés par les seconds. Soumise à des perturbations locales venant de l'environnement - on secoue la surface par exemple -, la bille peut s'engager dans telle vallée plutôt

<sup>9</sup> *Principle of Embryology*, New York, MacMillan, 1956 ; *The Strategy of the Genes*, Londres, S. Allen, 1957.

<sup>10</sup> Cambridge University Press, 1940.

<sup>11</sup> Le Club avait adopté les idées de la philosophie de la nature de Whitehead et était influencé par le livre de D'Arcy Thompson dont nous avons parlé ci-dessus.



que dans telle autre. Prise au piège d'une vallée profonde, la bille peut quitter de temps à autre le fond de celle-ci, mais elle y revient tout naturellement. Ce phénomène rend bien compte de ce que Waddington appelle l'«homéorhésie»: dès que l'embryon est écarté de sa trajectoire morphogénétique, il est ramené, canalisé invariablement dans le flux du développement, dans sa «chréode». pour peu que les fluctuations perturbatrices ne soient pas trop importantes. Ce terme d'homéorhésie s'inspire directement de celui d'homéostasie qui avait été forgé par Claude Bernard pour désigner la tendance à l'autoconservation d'un organisme vivant bien déterminé.

Il ne s'agit ici que d'une image et le texte de Waddington ne laisse aucun doute là-dessus<sup>12</sup>. Cependant, à une époque où la connaissance du substrat génétique et épigénétique du développement embryonnaire est moins avancée qu'aujourd'hui, Waddington considère que son «image» possède néanmoins une valeur heuristique. En effet, une description fine de la différenciation cellulaire interne à l'embryon en développement doit selon lui redonner, à un certain niveau, des trajectoires plus ou moins canalisées et aboutissant à des états cellulaires bien différenciés, correspondant à des «états stationnaires» du système.

L'image tridimensionnelle est purement pédagogique, car le biologiste estime que la surface sur laquelle évoluent les chemins de la morphogenèse devrait être dessinée dans un espace multidimensionnel semblable à l'espace de phase des physiciens. Pour les biologistes des années 1950, cette notion est loin d'être intégrée<sup>13</sup>.

Nous retrouvons ici l'idée qui sous-tendait les travaux fondateurs de Turing, Prigogine et ceux de la cinétique enzymatique, qui mettaient en évidence le rôle des états stationnaires multiples dans la compréhension des évolutions de systèmes biologiques variés. Ici les états, qui sont au terme du processus de développement morphogénétique, sont vus comme des minima locaux d'une surface qui rappelle celle de Wright, à la différence près qu'elle est «à l'envers», car chez le généticien, la population peut évoluer vers des maxima adaptatifs locaux.

### **Paysages et catastrophes : René Thom**

C'est chez René Thom, inventeur de la célèbre théorie des catastrophes, que l'on retrouvera une influence directe de Waddington. Dès l'introduction de son livre *Stabilité structurelle et morphogenèse*<sup>14</sup>, dont les premières éditions française et anglaise sont préfacées par Waddington, le mathématicien français avoue le rôle «germinal» des concepts de «paysage épigénétique» et de «chréode» dans l'élaboration de sa théorie.

Thom ajoute aux idées de Waddington celle de «stabilité structurelle» du paysage. Autrement dit, il considère des classes de paysages dont les caractéristiques qualitatives essentielles (nombre de vallées, de pics...) ne varient pas sous l'effet de légères perturbations. Cette idée proprement topologique<sup>15</sup> représente un pas important vers la compréhension théorique du vivant. En effet, les systèmes biologiques sont tellement complexes que l'on pourrait se demander si l'on parviendra un jour à en identifier exhaustivement tous les composants élémentaires et toutes leurs interactions. La stabilité structurelle montre qu'il existe une véritable robustesse de certains modèles théoriques par rapport aux erreurs observationnelles ou à l'omission de certains composants qui sont inévitables dès que l'on aborde un système un tant soit peu complexe. On peut donc se rassurer : il n'est pas nécessaire

<sup>12</sup> On trouvera une belle présentation du travail de Waddington dans R. Rosen, *Dynamical System Theory in Biology. Vol. I: Stability Theory and its Applications*, New York, John Wiley, 1970, p. 195-202.

<sup>13</sup> Quelle est-elle ? L'idée, qui vient de la mécanique de Hamilton, consiste à décrire l'évolution d'un système matériel de N particules, par un seul point dans un espace à 6N dimensions (chaque point est décrit par les 3 coordonnées spatiales et les 3 composantes de son vecteur vitesse). Dans le cas où l'énergie se conserve, par exemple, le point représentatif du système évoluera alors sur une «surface» particulière, sur un «paysage» fixé, au sein de cet espace à 6N dimensions.

<sup>14</sup> Cf. R. Thom, *Structural Stability and Morphogenesis*, New York, Benjamin, 1972; *Stabilité structurelle et morphogenèse. Essai d'une théorie générale des modèles*, Paris, InterÉditions, 1977 (d'après la 2<sup>e</sup> édition revue, corrigée et augmentée).

<sup>15</sup> Rappelons ici que la topologie est l'étude des propriétés des surfaces ou de leurs généralisations (variétés) qui restent invariantes sous l'effet de déformations continues (homéomorphismes).

de connaître tous les détails fins d'un système complexe pour en maîtriser le fonctionnement global. La deuxième idée centrale de l'œuvre de Thom est la notion de «catastrophe». Cette fois-ci, on s'intéresse aux modifications qualitativement importantes des paysages : celles qui changent le nombre des vallées, des cols et des montagnes. Si le paysage était un « vrai » paysage, on pourrait parler ici des effets de l'érosion. Mais si l'on reprend les idées de Wright, les modifications des paysages correspondent à des variations dans le nombre et la hauteur des sommets adaptatifs d'une population. Ces modifications peuvent avoir pour causes l'arrivée d'un prédateur sur un territoire ou une modification importante de l'environnement à laquelle les organismes ne sont pas bien adaptés.

Reprenons l'idée de Waddington; la description théorique du développement embryonnaire est vue comme la trajectoire d'une bille qui roule dans un paysage montagneux et aboutit au bas de l'une des vallées. En termes plus techniques : le système rejoint progressivement un des minima (états stables) de la surface que dessine le paysage.

Les diverses destinées des populations cellulaires au cours du développement de l'embryon sont donc commandées par une multitude de minima possibles - nous retrouvons encore une fois notre thème de la multistationnarité. La modification du paysage peut entraîner la disparition ou l'apparition de certaines vallées et des minima leur correspondant: ce sont les «catastrophes» au sens de Thom. On peut aussi traduire ceci en termes de bifurcation. En effet, dans le langage de la thermodynamique non linéaire ou de la théorie des équations différentielles, une bifurcation est un point où le système voit ses propriétés de stabilité changer ; par exemple, le système initialement stable devient instable ou un système qui possédait un seul état stable peut évoluer vers deux états stables<sup>16</sup>... Comme le dit très bien Thom : « La bifurcation engendre la catastrophe<sup>17</sup> » Ce qui est étonnant, et c'est là un aspect des plus attrayants du travail de Thom, c'est que, sous certaines hypothèses assez simples, on peut classer toutes les «catastrophes» possibles de systèmes contrôlés par un certain nombre de paramètres. Si on ne connaît presque rien d'un système biologique complexe, si ce n'est qu'il est décrit par telle variable et qu'il est contrôlé par tels paramètres (température, concentration...), la théorie des catastrophes peut alors nous apprendre les types de changements brusques qui peuvent s'y produire.

Nous ne voulons pas nous aventurer ici dans une analyse de la théorie des catastrophes sur laquelle on a beaucoup écrit<sup>18</sup>. Pour notre propos, il suffit de signaler que le travail du mathématicien français est un maillon essentiel dans l'unification conceptuelle des notions de multistationnarité, issue de la thermodynamique, de la cinétique biochimique ou des premières descriptions du processus de régulation génique, et des paysages adaptatifs et épigénétiques. Nous verrons dans la suite que c'est justement la prise en compte d'évolutions dans des paysages dont les vallées correspondent aux états stationnaires qui permet d'arriver à l'une des caractérisations formelles possibles de la plasticité.

La théorie des catastrophes de Thom, tout comme celle de Waddington d'ailleurs, ne constitue pas vraiment une théorie quantitative: il s'agit plutôt, selon les propres termes de Thom, d'une «herméneutique», d'un langage qui permet de donner un sens à une série d'observations globales pour lesquelles on ne dispose pas encore de modèle explicatif et prédictif profond : «Toute la "philosophie" de la théorie des catastrophes, son schéma général, tient justement à ceci: il s'agit d'une théorie herméneutique qui s'efforce, face à n'importe quelle donnée expérimentale, de construire l'objet mathématique le plus simple qui puisse l'engendrer<sup>19</sup>.» Il est clair qu'une telle herméneutique ne

---

<sup>16</sup> Exemple d'une telle bifurcation, *que* nous avons cité plus haut, celui des cellules multipotentes qui peuvent «tomber» dans divers états stables de différenciation.

<sup>17</sup> R. Thom, *Paraboles et Catastrophes. Entretiens sur les mathématiques, la science et la philosophie* (avec G. Giorello et S. Morini), Paris, Flammarion, 1983, p. 73. Ce livre constitue à lui seul une merveilleuse introduction élémentaire à la classification des catastrophes.

<sup>18</sup> Le lecteur trouvera une excellente introduction pédagogique dans le livre d'Ivar Ekeland, *Le Calcul et l'Imprévu, Les figures du temps de Kepler à Thom*, Paris, Seuil, 1984 ; une introduction technique élémentaire peut être trouvée dans P.T. Saunders, *An Introduction to Catastrophe Theory*, Cambridge University Press, 1980.

<sup>19</sup> R. Thom, *Paraboles et Catastrophes, op. cit.*, p. 66.

pouvait pas satisfaire entièrement les biologistes. En effet, ces derniers n'adoptent en général une explication mathématique qu'à la condition qu'elle se connecte étroitement à une explication biologique. Et cette dernière consiste à rejoinde une description qui montre comment un phénomène global (le développement de l'embryon par exemple) peut être relié à des chaînes causales d'événements faisant intervenir des composants élémentaires (des cascades de réactions transmettant des signaux chimiques, des boucles de rétroaction régulant l'expression des gènes...).

### **Paysages et modèles NK de Kauffman**

La théorie des paysages a trouvé une impulsion déterminante, au cours des années 1960, dans les travaux de Stuart Kauffman, qui se rapprochent, beaucoup plus que ceux de Thom, des exigences d'une véritable explication biologique. Celui-ci a étudié de manière systématique le comportement de réseaux de «machines biologiques» (gènes, protéines, cellules...) mises en interaction. Au départ, Kauffman voulait simuler des réseaux de régulation de gènes d'un organisme pour fournir un calcul menant à une estimation du nombre de types différents de cellules avec lesquelles cet organisme est construit. En prenant comme modèles des gènes des «automates booléens» (des fonctions logiques élémentaires !), il obtint des résultats tout à fait passionnants. Nous ne développerons pas cela ici. Le lecteur intéressé trouvera en annexe une petite introduction à ce genre de réseau d'automates booléens<sup>20</sup>.

Nous allons décrire ici le modèle NK de Kauffman qui occupe une place centrale dans sa réflexion théorique sur le vivant<sup>21</sup>. L'idée de base est de considérer un réseau de N «machines», disons N gènes caractérisant un organisme déterminé<sup>22</sup>. On considère que chacun de ces N gènes peut être dans deux états différents, deux allèles comme disent les généticiens. Puisqu'il y a N gènes et que chacun peut prendre 2 états différents, l'ensemble total des configurations du réseau de gènes (du génome) comporte  $2^N$  éléments. En général, les gènes d'un génome ne sont pas indépendants. Un gène, nous l'avons vu, est souvent régulé par d'autres gènes. Pour fixer les idées» admettons avec Kauffman que chaque gène interagit avec K autres gènes<sup>23</sup>. Ce nombre K est appelé la connectivité du réseau en question. Nous avons presque tous les ingrédients du modèle NK de Kauffman. Il nous manque justement ce qui va faire le lien avec la théorie des paysages: la fonction d'adaptabilité. Kauffman définit celle-ci en associant un nombre (le niveau d'adaptabilité) à chacun des  $2^N$  génomes possibles de la manière suivante<sup>24</sup>. Pour chaque allèle, on calcule, à l'aide d'une règle précise, une valeur adaptative qui dépend de cet allèle en question, mais aussi des K (la connectivité) autres allèles du génome. On fait ensuite la moyenne de ces N valeurs, ce qui donne la valeur adaptative du génome tout entier. Cette fonction adaptative fixe la hauteur du paysage tracé «au-dessus» de l'espace de configuration, c'est-à-dire ici de l'espace de tous les génomes possédant N gènes, ceux-ci se présentant sous deux allèles différents.

Tout se passe ici comme si nous pouvions fabriquer nous-mêmes différents organismes en bricolant divers génomes. Nous choisissons par exemple tel allèle pour ce gène-ci et tel autre pour ce gène-là. Et, pour chaque choix, on nous donne un résultat chiffré, la valeur de la fonction d'adaptabilité, qui nous indique le niveau d'adaptation de notre organisme dans un environnement donné.

Kauffman peut alors définir une loi d'évolution des points dans l'espace des  $2^N$  configurations, une

<sup>20</sup> Nous renvoyons le lecteur à l'annexe 5, p. 353, où nous proposons une petite introduction aux réseaux d'automates booléens étudiés par Kauffman.

<sup>21</sup> *The Origins of Order, Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993, p. 40-67.

<sup>22</sup> Mais il pourrait s'agir de N acides aminés dans une protéine ou de N espèces dans un écosystème

<sup>23</sup> Les biologistes qualifient de telles interactions d'«épistasiques».

<sup>24</sup> Pour une définition précise du paysage associé au réseau NK nous renvoyons ici à l'article de revue de Peter F. Stadler, «Towards a Theory of Landscapes», in R. Lopez-Pena, R. Capovilla, R. Garcia-Pelayo, H. Waelbroeck, F. Zertuche (éd.), *Complex Systems and Binary Networks. Guanajuato Lectures. Mexico 1995*, Berlin, Springer, 1995, Lecture Notes in Physics 461.

loi d'évolution des génomes, en posant qu'un génome, subissant de temps à autre des mutations (changeant ça et là tel allèle en un autre), va décrire une trajectoire qui tend à maximiser sa fonction d'adaptabilité. Cela rend compte tout simplement de l'effet de sélection naturelle qui conserve les organismes les plus adaptés à un environnement donné. L'évolution d'un génome à un autre devient maintenant une «promenade» sur un paysage dont l'altitude est donnée par la fonction d'adaptabilité. Ce qui est tout à fait important, c'est que les propriétés de ce paysage, et donc l'évolution possible des points dans l'espace de configuration, changent de manière significative avec le degré de connectivité  $K$ <sup>25</sup>.

Si  $K=0$  c'est-à-dire si tous les gènes sont indépendants les uns des autres, le paysage présente un pic global d'adaptabilité que Kauffman nomme avec humour le « Fujiyama »<sup>26</sup>. En fait, on retrouve ici la théorie de Fisher. En effet, dans le cas où les gènes étaient indépendants, l'évolution conduisait vers un seul état d'adaptabilité maximale.

Pour  $K=N$ , ou au moins pour une connectivité très élevée, tous les gènes réagissent les uns sur les autres. Par conséquent, le paysage présente toute une série de pics adaptatifs d'altitude jamais trop éloignée d'une altitude moyenne<sup>27</sup>. Dans ce cas, l'action conjuguée des mutations et de la sélection ne peut conduire à des états de très haute adaptabilité. En reprenant notre métaphore alpine, on pourrait dire que le fait que le paysage soit chaotique, sans régularité apparente, ne permet pas aux alpinistes de trouver une voie vers des pics plus élevés que les autres.

Pour une valeur de  $K$  intermédiaire mais faible - typiquement chez Kauffman,  $K=2$  -, on a également toute une série de pics, mais organisés autour de ce que Kauffman appelle un «massif central» de grande altitude, ce qui permet aux mutations et à la sélection d'évoluer vers des états de haute adaptation. Toujours selon notre fable, les alpinistes peuvent découvrir progressivement qu'il existe une régularité dans le paysage, un massif dominant les autres, et se diriger vers les sommets de plus en plus haut. L'idée du «massif central» doit donc être vue comme l'existence d'un ordre global, d'une cohérence à grande échelle du paysage, qui permet de guider les déformations progressives du système. Sans cet ordre global (chez Waddington, l'ordre global est celui d'une pente qui oriente toutes les vallées dans une même direction), le système risquerait de se perdre purement et simplement dans la «forêt» de pics ou dans le dédale des vallées.

### Les systèmes critiques auto-organisés et la loi en $1/f$

Ce genre de situation décrite par Kauffman, qui représente une frontière entre l'ordre rigide ( $K=0$ ) et le chaos complet ( $K=N$ ), avait été étudié également à la fin des années 1980 par Per Bak<sup>28</sup> à Brookhaven. Ce dernier avait montré qu'il existe des systèmes ayant la particularité d'évoluer spontanément vers la frontière de l'ordre et du chaos: les systèmes critiques auto-organisés. À cette frontière, la plupart des petites fluctuations n'entraînent pas une déstabilisation du système. Néanmoins, de manière moins fréquente, une petite fluctuation entraîne une cascade importante d'événements. Le prototype d'un tel système est le tas de sable. Lorsqu'on déverse du sable sur le sol, le tas grandit jusqu'à atteindre une pente critique. Les grains de sable qui se déversent continuent à se placer sur la pente en glissant sur de petites distances. Mais il arrive un moment où un seul grain est

<sup>25</sup> Nous renvoyons ici aux illustrations données à l'annexe 4, p. 349.

<sup>26</sup> Si l'adaptabilité de chaque élément de la suite ne dépend que de sa seule valeur 0 ou 1, il n'existe qu'une seule suite qui maximise l'adaptabilité : il suffit de choisir la valeur correspondant chaque fois au maximum d'adaptabilité de l'élément.

<sup>27</sup> Si l'adaptabilité de chaque élément de la suite dépend de  $K$  autres, on comprend que le choix d'une valeur qui maximiserait l'adaptabilité d'un élément pourrait empêcher la maximisation de l'adaptabilité des autres éléments. Il y a frustration et tous les éléments ne peuvent simultanément maximiser leur adaptabilité. Il n'existe donc pas une unique suite qui serait le pic d'adaptabilité.

<sup>28</sup> Cf. P. Bak, K. Chen, «Les systèmes critiques auto-organisés», *Pour la science*, n° 161, mars 1991. Cf. M. Laguës, A. Lesne, «Phénomènes critiques autoorganisés», *Invariances d'échelle. Des changements d'états à la turbulence*, Paris, Belin, 2003, p. 312-327.

susceptible de provoquer une grande avalanche et des avalanches de toutes dimensions qui font s'affaïsser le tas, lui redonnant une pente sous-critique. La croissance du tas peut alors reprendre pour se repositionner aux alentours de la pente critique. Le système évolue donc de telle manière qu'il auto-organise une pente critique. Comme l'a montré Per Bak, la fréquence des avalanches suit une loi qui est caractéristique de tous ces systèmes. La fréquence  $f$  des avalanches, la fréquence des cascades importantes d'événements est inversement proportionnelle à la taille de ces avalanches. Autrement dit, les grandes avalanches sont relativement rares. Le système est dit suivre une *loi en 1/f*. Cette loi apparaît dans de multiples phénomènes, de la variation de débit d'une rivière au «bruit» (scintillations) dans des détecteurs électroniques, en passant par l'activité solaire<sup>29</sup>. Pendant quelque temps, on a pensé que cette loi pourrait expliquer la distribution temporelle des petits et grands tremblements de terre, mais il semble que cela ne soit pas le cas<sup>30</sup>. La loi en  $1/f$  est donc la signature de ces phénomènes complexes qui ne sont ni purement chaotiques (dans ce cas, on n'a plus la régularité d'une loi en  $1/f$ ), ni purement ordonnés. La forme de la loi vient en partie du fait que le comportement des systèmes en question dépend fortement de l'histoire passée du système, c'est-à-dire de l'accumulation de petits événements qui vont finir par rendre le système « surcritique » et le forcer à déclencher des cascades d'événements de toutes les dimensions. Si nous reprenons l'analogie du tas de sable ou d'une pente enneigée des Alpes, quand on arrive à l'état critique, on peut avoir des avalanches à toutes les échelles : depuis les petits glissements de quelques mètres jusqu'aux énormes déferlements qui ravagent arbres et chalets sur de grandes distances. Cette propriété est caractéristique des systèmes «fractals». En effet, ces derniers correspondent à des phénomènes qui sont «auto-similaires»; un agrandissement d'une petite avalanche ressemble à une grande et inversement. Le bruit en  $1/f$ , le bruit de scintillation a donc un rapport avec les fractales, et c'est ce que Benoît Mandelbrot n'avait pas manqué de mettre en évidence... dans le contexte de l'étude des cours de la Bourse! Ceux-ci montrent en effet une succession très fréquente de variations relatives de faible amplitude, entrecoupées par des fluctuations de grande amplitude, plus rares. Un zoom sur la variation effective des cours pendant un temps assez court montre un comportement similaire à celui qui se produit sur un intervalle de temps plus long, ce qui atteste du caractère fractal de l'évolution boursière<sup>31</sup>.

### **Paysages et populations: les modèles NK.C**

En 1991, Kauffman et S. J. Johnsen<sup>32</sup> ont proposé une théorie de l'évolution fondée sur une généralisation du modèle NK. Ils considèrent une population dont le génome est formé de  $N$  gènes affectant chacun  $K$  autres gènes. Chaque population peut à son tour influencer  $C$  autres populations. On espérait que ce nouveau modèle NKC évolue de lui-même vers un état critique auto-organisé. Au voisinage de cet état, on peut penser, d'après ce qui vient d'être dit, que d'importantes cascades d'événements puissent se produire -par exemple de grandes réorganisations évolutives comme celles qui ont été magistralement décrites par Stephen Jay Gould<sup>33</sup> dans sa théorie des équilibres ponctués.

<sup>29</sup> P. Bak, M. Creutz, «Fractals and Self-Organized Criticality», in A. Bunde, S. Havlin (éd.), *Fractals in Science*, Berlin, Springer, 1994, p. 27-47.

<sup>30</sup> G. King, «Pourquoi les failles ne sont pas des tas de sable». *La Recherche*, hors-série, n° 9, novembre 2002, p. 94-95.

<sup>31</sup> B. Mandelbrot, «Randonnées multifractales à travers Wall Street», *Pour la science*, dossier hors-série, juillet 1999, p. 126-129 ; *Fractales, hasard et finance*, Paris, Flammarion, 1997 ; *Multifractals and 1/f Noise : Wild Self-Affinity in Physics*, Berlin, Springer, 1999.

<sup>32</sup> «Coevolution to the Edge of Chaos ; Coupled Fitness Landscapes, Poised States, and Coevolutionary Avalanches», *Journal of Theoretical Biology*, 149 (1991),467-505.

<sup>33</sup> *The Structure of Evolutionary Theory*, Cambridge, Harvard University Press, 2002

L'idée est la suivante<sup>34</sup>. Chaque organisme d'une population est assimilé à son génome qui est décrit par un modèle NK. À partir d'un tel modèle, on peut calculer un paysage par la méthode initiée par Kauffman. Chaque population prise individuellement est constituée d'un ensemble de configurations du génome en question et donc du modèle NK. Dans le paysage, il s'agit de points qui se regroupent dans la même région. Si cette population est seule dans son environnement, ou si elle n'interagit avec aucune autre ( $C = 0$ ), l'évolution la conduit inévitablement vers son sommet adaptatif. La présence d'autres populations rivales va, en revanche, modifier son paysage adaptatif<sup>35</sup>. Ce qui était l'état optimal d'adaptation devient peut-être maintenant un état tout à fait vulnérable. Le pic adaptatif s'est érodé et un ou plusieurs autres sont apparus, correspondant à autant de stratégies plus ou moins réussies de survie. La population doit donc maintenant gravir à nouveau un autre pic sous la poussée de la sélection naturelle. On peut imaginer une situation où la population est aux prises avec un si grand nombre d'autres populations rivales qu'elle ne peut jamais trouver un état d'adaptation vraiment optimal ( $C$  est très grand) : son paysage adaptatif est devenu trop chaotique, sans ordre global. Chaque petite mutation du génome (chaque changement d'un état du modèle NK) conduit près d'un nouveau pic d'adaptation moyenne ou faible. C'est la situation que Kauffman appelle parfois la «catastrophe de complexité». On pourrait imaginer un nombre optimal d'interactions  $C$ , tel que la population, même si elle est perturbée par des mutations, ne s'éloigne pas dans une «forêt de pics adaptatifs peu élevés», mais, au contraire, revienne auprès de son pic adaptatif optimal, après des cascades importantes de configurations génomiques. Autrement dit, on pourrait espérer trouver un nombre d'interactions entre les populations correspondant à un état auto-organisé critique de l'écosystème. Cependant, Bak et d'autres ont montré que ce n'est pas le cas. L'auto-organisation des systèmes génétiques en interaction ne peut expliquer seule les grands sauts évolutifs, les «big-bangs» biologiques où les plans du vivant se refaçonnent de manière étonnante.

### Portée et limites des modèles de Kauffman

Au-delà des critiques que Ton peut adresser au modèle NK de Kauffman, il nous semble qu'il met en évidence un élément important. Chaque fois que nous tentons de mettre sur pied une théorie qui appréhende les propriétés les plus universelles, les plus génériques du vivant, nous retrouvons l'idée de plasticité : l'idée d'une conjonction optimale entre une robustesse, une stabilité et une capacité d'adaptabilité, une souplesse. C'est ce que révèle le fait que les systèmes caractéristiques du vivant ressemblent fortement à des modèles NK avec une faible connectivité, typiquement pour Kauffman,  $K = 2$ . Dans de tels modèles précisément, les systèmes trouvent un compromis entre la rigidité qui leur donne une cohérence et un « chaos faible » qui leur permet de se déformer pour s'adapter.

Il ne faut pas attribuer une valeur absolue aux résultats de Kauffman. Ces «modèles joujous», comme les appelle très joliment Isabelle Stengers<sup>36</sup>, sont des «expériences de pensée» qui servent à dégager des comportements typiques. Cette manière de penser est habituelle aux physiciens ou à tous les scientifiques qui travaillent sur des systèmes complexes. Plutôt que d'attendre que soient mis à jour tous les composants et toutes les interactions entre les constituants d'un système d'une extrême complexité, on tente de rejoindre des comportements génériques qui ne dépendent pas des détails des sous-constituants. Mieux, on pourrait dire à la suite de Robert C. Richardson qu'il s'agit là d'une sorte de «mécanique statistique des systèmes

<sup>34</sup> Nous renvoyons ici à l'article très intéressant de Per Bak et Maya Paczusi, « Mass Extinctions vs. Uniformitarianism in Biological Evolution », *Physics of Biological Systems, op. cit.*, p. 341-356.

<sup>35</sup> Prenons l'exemple d'une espèce de papillons dont les individus peuvent être de couleur foncée ou vive. La sélection naturelle a conduit cette population à un optimum d'adaptation vis-à-vis de l'environnement (la couleur ne jouant ici aucun rôle adaptatif). Dès qu'une population de prédateurs arrive, des oiseaux par exemple, l'état optimal d'adaptation de la population change, car la couleur vive devient un obstacle à la survie. Un sommet adaptatif apparaît centré autour des papillons possédant l'allèle qui code pour la couleur foncée. Remarquons, en retour, que le paysage adaptatif du prédateur va changer également. En effet, comme les papillons foncés se dissimulent mieux, ses stratégies adaptatives devront changer s'il veut continuer à pouvoir trouver sa nourriture.

<sup>36</sup> *Cosmopolitiques. 6. La vie et l'artifice : visages de l'émergence, op. cit.*, p. 96.

organisés<sup>37</sup>» qui vise à dégager des comportements collectifs d'un système biologique dont l'analyse détaillée de tous les composants peut s'avérer très longue, très difficile, voire impossible. Nous découvrirons néanmoins dans la suite qu'une telle mécanique statistique, «à la physicienne», doit certainement être modifiée et étendue pour rencontrer les exigences propres au vivant. En particulier, on doit tenir compte en biologie de l'existence d'une hiérarchisation des systèmes et de leurs composants qui interdit, par exemple, de se représenter un système biologique comme un réseau de «machines» semblables, considérées à un seul niveau de fonctionnement. On sait aujourd'hui, en établissant des cartes détaillées des réseaux de régulation des gènes ou des réseaux d'unités fonctionnelles engagées dans le métabolisme, que ces derniers sont organisés en modules<sup>38</sup> suivant des structures hiérarchiques propres<sup>39</sup>.

### **Paysages, multistationnarité et plasticité**

Nous avons vu, dans plusieurs chapitres, que la biologie avait mis en évidence, en tant que concept explicatif central, la multistationnarité, c'est-à-dire l'existence d'une multitude d'états stables caractéristiques des processus de la vie. Ici, nous avons complété cette image. Pour comprendre la dynamique propre au vivant, il faut découvrir la manière dont on peut passer d'un état stationnaire à un autre. Or c'est justement cela qu'offre la métaphore du paysage. Dès lors, il n'est pas étonnant, même si les deux notions n'émergent pas au même moment et dans les mêmes secteurs de la biologie, que la multistationnarité et la théorie des paysages se retrouvent au cœur d'un essai de constitution d'une biologie théorique.

Mais il y a plus. En effet, lorsqu'un système peut être décrit par un paysage avec de multiples états stationnaires, c'est-à-dire qu'il peut se transformer en adoptant de nombreuses configurations différentes. Néanmoins, cette transformation est contrainte par les contours du paysage qui donne à l'évolution du système son unité, sa cohérence. L'évolution dans un paysage traduit donc tout à fait cette idée d'un lien constitutif entre déformabilité et cohérence, lien qui définit précisément la plasticité. Si l'une des caractéristiques cruciales des organismes vivants ou de leurs constituants est la plasticité, la notion de paysage devrait s'imposer comme un concept incontournable de la description du vivant à ses différentes échelles phénoménales.

---

<sup>37</sup> «Explication et causalité dans les systèmes auto-organisés», *Auto-organisation et émergence dans les sciences de la vie*, *op. cit.*, p. 464.

<sup>38</sup> On appelle «module» l'ensemble des acteurs moléculaires et leurs interactions impliqués dans un processus biologique spécifique. Nous en reparlerons au chapitre XIV.

<sup>39</sup> Nous renvoyons ici à E. Ravasz, A.L. Somera, D. A. Mongru, Z.N. Oltvai, A.-L. Barabasi, « Hierarchical organization of modularity in metabolic networks », *Science*, 297 (2002), 1551-1555 ; P. Brazhnik, A. de la Fuente, P. Mendes, «Gène Networks: How To Put the Function in Genouillés», *Trends in Biotechnology*, vol. 20, n°11, novembre 2002, p. 467-472; M. Vidai, «A Biological Atlas of Functional Maps», *Celî* 104 (2001), 333-339.

## La théorie des systèmes. Par Alain STAHL

Un *système* se compose d'un ensemble d'éléments reliés de façon dynamique par un ensemble de relations.

La *théorie des systèmes* repose sur la constatation que la méthode analytique du réductionnisme ne suffit pas pour étudier des ensembles ("des systèmes") très complexes, en particulier ceux où des *émergences* peuvent survenir. Elle les décompose en sous-systèmes. Elle insiste sur l'importance de modèles. Elle se réfère à des concepts féconds des mathématiques ou de la physique - par exemple, les « small worlds » de la théorie des graphes ; les changements de phase au voisinage d'un « point critique » ; la si difficile « morphogénèse » ... Elle emprunte aux méthodes modernes de contrôle des systèmes dynamiques. Elle utilise les notions de complexité et "d'information", de stabilité et d'évolution, d'organisation et d'auto-organisation. Elle s'intéresse aux *automates cellulaires*.<sup>40</sup> Elle recourt aussi à la notion – délicate – de *boite noire*<sup>41</sup> et à celle – plus féconde – de *système ago-antagoniste*.<sup>42</sup> Elle se veut d'application très générale, allant jusqu'aux sciences sociales et à celles du management ; mais c'est en biologie qu'elle est le plus utilisée.

Ses débuts sont déjà anciens : L. von Bertalanffy a commencé à publier en 1926 ; ses autres protagonistes sont R. Ashby et N. Wiener, juste après 1945. Il lui est, encore aujourd'hui, difficile de dépasser le stade des généralités. Beaucoup de ces beaux concepts que nous venons de décrire ne sont présentement que des habillages de notre ignorance. Dans le cas de la *biologie*, la complexité, toujours rapidement croissant, des interactions que l'on y met à jour risque – même en tenant compte des progrès prévisibles des ordinateurs – de défier toute tentative de mathématisation.

1. Un *automate cellulaire* est défini par un programme discret, généralement déterministe. A chaque pas correspond une nouvelle forme. Certains programmes ont cette particularité de reproduire indéfiniment à l'identique certaines formes. Du coup, le plus célèbre - dû à J. Conway – est baptisé « jeu de la vie ». Ces automates ont fait l'objet de beaucoup de recherches intéressantes, y compris sur le plan conceptuel. Mais peuvent-elles féconder la biologie ?

2. Une *boite noire* comporte des entrées et des sorties, les unes et les autres mesurables ; mais des facteurs autres, inconnus (aléatoires?), viennent compliquer son fonctionnement. L'ambition de certains est, par de simples corrélations, d'en comprendre le mécanisme et, dans le meilleur des cas, d'arriver à une modélisation algébrique. Cela peut se justifier si le système a une régularité suffisante, si l'on sait un minimum de choses sur sa morphologie, si les facteurs perturbateurs ne sont pas tout à fait inconnus. Mais, trop souvent, le recours à la *boite noire* n'est qu'une façon de masquer notre ignorance!

3. La notion de *système ago-antagoniste* a été développée par E. Bernard-Weil. Un exemple simple en est un échafaudage volant (de laveurs de vitres dans un gratte-ciel), qui doit satisfaire deux buts : permettre d'accéder aux vitres de tous les étages, rester horizontal pour la sécurité des ouvriers. La régulation en est obtenue par deux actions différentes, l'une où la gauche et la droite sont relevées simultanément, l'autre où elles s'opposent. De même, bien souvent en biologie, un équilibre dynamique complexe s'obtient entre l'action positive d'un *agoniste* (par exemple, la cortisone diurétique) et l'action négative d'un *antagoniste* (dans cet exemple, la vasopressine anti-diurétique). Cette notion peut aussi s'appliquer hors biologie.

---

<sup>40</sup> Un *automate cellulaire* est défini par un programme discret, généralement déterministe. A chaque pas correspond une nouvelle forme. Certains programmes ont cette particularité de reproduire indéfiniment à l'identique certaines formes. Du coup, le plus célèbre - dû à J. Conway – est baptisé « jeu de la vie ». Ces automates ont fait l'objet de beaucoup de recherches intéressantes, y compris sur le plan conceptuel. Mais peuvent-elles féconder la biologie ?

<sup>41</sup> Une *boite noire* comporte des entrées et des sorties, les unes et les autres mesurables ; mais des facteurs autres, inconnus (aléatoires?), viennent compliquer son fonctionnement. L'ambition de certains est, par de simples corrélations, d'en comprendre le mécanisme et, dans le meilleur des cas, d'arriver à une modélisation algébrique. Cela peut se justifier si le système a une régularité suffisante, si l'on sait un minimum de choses sur sa morphologie, si les facteurs perturbateurs ne sont pas tout à fait inconnus. Mais, trop souvent, le recours à la *boite noire* n'est qu'une façon de masquer notre ignorance!

<sup>42</sup> La notion de *système ago-antagoniste* a été développée par E. Bernard-Weil. Un exemple simple en est un échafaudage volant (de laveurs de vitres dans un gratte-ciel), qui doit satisfaire deux buts : permettre d'accéder aux vitres de tous les étages, rester horizontal pour la sécurité des ouvriers. La régulation en est obtenue par deux actions différentes, l'une où la gauche et la droite sont relevées simultanément, l'autre où elles s'opposent. De même, bien souvent en biologie, un équilibre dynamique complexe s'obtient entre l'action positive d'un *agoniste* (par exemple, la cortisone diurétique) et l'action négative d'un *antagoniste* (dans cet exemple, la vasopressine anti-diurétique). Cette notion peut aussi s'appliquer hors biologie.



Mécanique quantique:

## **Et si Einstein et de Broglie avaient raison ?**

*Michel Gondran (EDF R et D) et Alexandre Gondran (Association FERMAT)*

**Résumé** : Les fondements de la mécanique quantique ont été au coeur du plus grand débat scientifique du 20<sup>ème</sup> siècle. Le point de vue de Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac s'est finalement imposé à toute la science contemporaine: il faut renoncer à l'existence d'une réalité objective et au déterminisme, « Dieu joue aux dés ». Il faut même renoncer à vouloir tout comprendre. Les conséquences philosophiques et épistémologiques en sont immenses!

Mais deux irréductibles, Albert Einstein et Louis de Broglie, ont résisté seuls contre tous. Jusqu'à la fin de leur vie ils ont défendu le déterminisme et la réalité physique.

Cet article propose de remonter aux sources de ce combat: l'interprétation de la fonction d'onde, et de rappeler en particulier les apports des deux pères de la dualité onde-particule.

Et notre espoir est que le lecteur puisse, à la lecture de cet article, se poser la question: " Et si Einstein et de Broglie avaient raison ?".

En conclusion de cette publication, nous vous proposons d'approfondir et –qui sait- d'essayer de résoudre, par un échange avec les lecteurs et dans de prochains articles, la grande énigme de la mécanique quantique.

Les fondements de la mécanique quantique, et plus particulièrement l'interprétation de la fonction d'onde, ont été au coeur du plus grand débat scientifique du 20<sup>ème</sup> siècle. Alors que le déterminisme était jusque-là le moteur de la Science, le voici remis en question. Avec lui s'effondre l'existence d'une réalité objective et la possibilité d'une compréhension intuitive du monde.

Nous reprenons ici l'historique de ce débat en insistant sur les arguments des deux irréductibles défenseurs du déterminisme que sont Albert Einstein et Louis de Broglie. Nous tâcherons de répondre à quelques questions sur la fonction d'onde et son interprétation:

- Quelle révolution de la physique proposaient Einstein et de Broglie en introduisant la dualité onde-particule de la lumière comme de la matière?
- En quoi diffèrent les deux principales interprétations, l'interprétation statistique de Copenhague<sup>43\*</sup> et l'interprétation déterministe de Broglie-Bohm?
- Quelles positions Einstein et de Broglie défendaient-ils sur le déterminisme et la réalité physique?
- Comment la non localité s'introduit-elle dans la physique à travers l'expérience d'Einstein, Podolsky et Rosen?
- Et finalement, si Einstein et de Broglie avaient raison ?

## Les pères de la dualité onde-particule

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, la physique est solidement établie sur deux piliers. D'un côté il y a les particules, des corpuscules de matière, dont le mouvement est décrit par la mécanique newtonienne. De l'autre il y a les ondes, parmi lesquelles la lumière, qui ont des propriétés typiques: elles diffractent et interfèrent.

C'est en 1900 que Planck, pour comprendre le rayonnement des corps chauffés, émit l'hypothèse que les échanges d'énergie entre la matière et la lumière devaient se faire par quanta discrets, et non de façon continue. Einstein reprit cette notion de quantum d'énergie dans le premier de ses cinq articles de 1905:« *Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* », le seul qu'il considère comme « très révolutionnaire ». « *De fait, il me semble que les observations portant sur le « rayonnement noir », la photoluminescence, la production de rayons cathodiques par la lumière ultraviolette, et d'autres classes de phénomènes concernant la production et la transformation de la lumière, apparaissent comme plus compréhensibles si l'on admet que l'énergie de la lumière est distribuée de façon discontinue dans l'espace. Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayon lumineux émis par une source ponctuelle, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue sur des espaces de plus en plus grands, mais est constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que d'un bloc* »[1].

Pendant les vingt années suivantes, le développement de la théorie quantique fut riche non seulement d'hypothèses hardies, d'intuitions géniales, mais aussi d'âpres controverses. Après les modèles ad hoc de l'atome d'hydrogène de Niels Bohr (1913), c'est à Louis de Broglie (1923) que revint le mérite « **de lever un coin du grand voile** », en faisant l'hypothèse qu'à toute particule de matière de masse  $m$ , on pouvait faire correspondre une onde de longueur d'onde  $\lambda = h / m v$ ,  $v$  étant la vitesse et  $h$  la constante de Planck.

Les hypothèses révolutionnaires proposées par de Broglie ont incité son directeur de thèse Paul Langevin à prendre l'avis d'Einstein, qui se déclare grandement impressionné comme il le lui écrit le 16 décembre 1924:

<sup>43</sup> L'école dite de Copenhague se réunissait à Copenhague autour de Bohr. Elle comprenait Heisenberg, Born, Pauli, Jordan, Dirac...

« *Le travail de Louis de Broglie m'a fait grande impression. Il a levé un coin du grand voile. Dans un nouveau travail, je parviens à des résultats qui semblent confirmer les siens. Si vous le voyez, dites-lui, je vous prie, toute l'estime et la sympathie que j'ai pour lui. J'ai l'intention d'exposer ses idées dans notre Colloquium.* »

Le même jour, Einstein envoie une lettre comparable à Lorentz: « *Un jeune frère du de Broglie que nous connaissons a fait une très intéressante tentative d'interprétation de la règle des quanta de Bohr-Sommerfeld (thèse soutenue à Paris, 1924). Je crois que c'est la première et faible lueur qui éclaire l'une de nos pires énigmes en physique. J'ai moi aussi trouvé deux ou trois choses qui parlent en faveur de sa construction* ».

Puis les équations de la théorie furent inventées d'une manière indépendante par Heisenberg (1925) et Schrödinger (1926) pour le cas non relativiste, et Dirac (1928) pour le cas de la particule relativiste de spin  $\frac{1}{2}$ . Entre-temps, Stern et Gerlach (1922) avaient montré l'existence d'un moment intrinsèque (le spin) lié à une particule. Pauli, Jordan, Born, puis Feynman et beaucoup d'autres vont en faire la belle théorie conceptuelle que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de « modèle standard ».

Les équations de la mécanique quantique ont permis d'expliquer et de prévoir les mesures effectuées sur le monde physique qui nous entoure, depuis la structure de l'atome jusqu'à la conduction électronique des solides. Cette théorie quantique est aujourd'hui un cadre essentiel à notre prévisibilité de la Nature, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

Mais c'est *l'interprétation* de ces équations qui, bouleversant les cadres conceptuels classiques dans lesquels s'exerçait la pensée scientifique, prétait et prête toujours à débat. Bien que ce débat sur les fondements de la mécanique quantique n'ait jamais cessé, il s'est particulièrement intensifié à deux époques: lors de l'élaboration de la nouvelle théorie, d'abord (Congrès Solvay 1927) ; au cours des années 80, ensuite (inégalités de Bell et expériences d'Aspect).

En 1954, dans son discours de réception Nobel, Max Born rappelait la profondeur du fossé qui séparait déjà les théoriciens les plus éminents : «... *quand je dis que les physiciens ont accepté le mode de pensée que nous avons développé à cette époque, ce n'est pas exact. En fait, il y a quelques exceptions notables parmi les chercheurs qui ont contribué à l'édification de la mécanique quantique. Planck lui-même fit partie des sceptiques jusqu'à sa mort. Einstein, de Broglie et Schrödinger n'ont jamais cessé de mettre en relief les aspects non satisfaisants de la mécanique quantique...* »

On sait aujourd'hui que le modèle standard, malgré ses succès indiscutables, doit être amendé pour être compatible avec la relativité générale.

Encore aujourd'hui, c'est l'interprétation de la fonction d'onde qui est au centre du débat sur la mécanique quantique. L'interprétation statistique n'a été reconnue par le jury Nobel qu'en 1954, soit presque 30 ans après sa proposition par Born. La fonction d'onde représente-t-elle complètement la particule comme l'assume l'interprétation statistique de Copenhague? Ou faut-il au contraire lui ajouter la position initiale de la particule, comme le veut l'interprétation déterministe de Broglie-Bohm-Bell?

Pour aller plus loin, il nous faut rappeler ces deux interprétations : l'interprétation classique, dite de Copenhague ; l'interprétation de Broglie-Bohm, proposée par de Broglie [2] en 1927 et retrouvée par Bohm [3] en 1952.

## Les deux principales interprétations de la fonction d'onde

Dans l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, la fonction d'onde d'une particule représente *toute* l'information sur la particule. Cette fonction d'onde est un vecteur d'un espace de Hilbert représentant un état quantique. La linéarité de l'espace de Hilbert correspond *au principe de superposition* selon lequel les états quantiques peuvent se combiner, se superposer, comme le font, en physique classique, des ondes et des champs. Lorsque la fonction d'onde est la superposition de plusieurs termes, les propriétés de cette particule ne sont pas bien définies; en particulier la position et la vitesse d'une particule ne sont plus définies individuellement. Seule une mesure faite sur la particule peut les préciser par le biais d'une réduction du paquet d'ondes. Tant qu'aucune mesure n'est effectuée, les propriétés de la particule ne sont connues que par la probabilité qu'une éventuelle mesure donne telle ou telle valeur.

Ainsi dans l'expérience des fentes de Young, la particule n'a pas de position avant l'impact et la position de l'impact sur l'écran de détection ne peut se déduire du carré du module de la fonction d'onde que statistiquement, sans aucune explication

possible : *« Dieu joue aux dés »*. Wolfgang Pauli, toujours très direct, résume cette thèse ainsi : *« Dans un état donné d'un système (objet), on peut, en général, faire seulement des prédictions statistiques (probabilités primordiales) sur les résultats de futures observations. Le résultat d'une seule observation, en revanche, n'est déterminé par aucune loi et par conséquent il est sans cause. »*

Devant les conséquences philosophiques et épistémologiques d'une telle affirmation, il semble raisonnable de chercher si ses fondements sont indiscutables !

Dans l'interprétation de Broglie-Bohm, la fonction d'onde ne représente pas toute l'information sur la particule ; il faut lui ajouter une position initiale pour la décrire complètement; c'est cette position qui est appelée improprement "variable cachée" car comme le dit Bell c'est la principale variable directement mesurée. Dans ce cas, on déduit de la fonction d'onde la trajectoire de la particule en prenant comme vitesse (à un facteur près) le gradient de la phase de la fonction d'onde. C'est ainsi que l'on peut dire avec de Broglie que l'onde "pilote" la particule. Il n'est pas indifférent de remarquer que nous avons un résultat similaire en mécanique classique: la vitesse d'une particule  $y$  est en effet égal au gradient de l'action divisé par la masse de la particule; on peut donc dire qu'en mécanique classique aussi l'action "pilote" la particule.

Une conséquence importante du choix de cette « vitesse » est qu'elle donne les mêmes résultats statistiques que l'interprétation de Copenhague, mais aussi et surtout qu'elle explique les impacts individuels des particules, ce que l'interprétation de Copenhague ne fait pas.

Dans l'expérience des fentes de Young, l'impact sur l'écran de détection correspond alors à la position classique de la particule et « Dieu ne joue plus aux dés ». Cependant, cette position déterministe dépend de la position initiale de la particule. Comme cette dernière est inconnue, la position finale ne peut en pratique être connue que statistiquement, comme le dit l'interprétation de Copenhague.

Le débat fait rage depuis le congrès Solvay de 1927 avec Planck, Lorentz, Einstein et de Broglie dans le camp du déterminisme et Bohr, Born, Heisenberg, Pauli et Dirac dans l'autre, chaque groupe ayant de bonnes raisons de défendre sa position : l'électron dans l'état fondamental semble bien être représenté par sa seule fonction d'onde et donne ainsi raison à l'interprétation de Copenhague ; les impacts des particules dans l'expérience des fentes de Young peuvent faire pencher, au contraire, pour l'interprétation de Broglie-Bohm.

## Les défenseurs du déterminisme et de la réalité physique

Le déterminisme et la réalité physique, qu'Einstein et de Broglie ont défendus jusqu'à la fin de leur vie, les ont fait considérer comme "dépassés" par le milieu scientifique.

Ils en étaient tous deux bien conscients. Dans une lettre à Born (lettre n° 81 [4]) de 1944, Einstein résume ainsi sa position:

*« Nos espérances scientifiques nous ont conduits chacun aux antipodes de l'autre. Tu crois au Dieu qui joue aux dés, et moi à la seule valeur des lois dans un univers où quelque chose existe objectivement, que je cherche à saisir d'une manière sauvagement spéculative. Je crois fermement, mais j'espère que quelqu'un trouvera une manière plus réaliste ou une base plus concrète que celles qui me sont données. Le grand succès de la théorie des quanta dès son début ne peut pas m'amener à croire à ce jeu de dés fondamental, bien que je sache **que mes confrères plus jeunes voient là un effet de la fossilisation**. On découvrira un jour laquelle de ces deux attitudes instinctives était la bonne ».*

Quelques années plus tard, en 1961, Louis de Broglie [5] aura dans une interrogation pathétique la même lucidité sur sa direction de recherche et le regard de l'Histoire:

*« L'avenir, un avenir que je ne verrai sans doute pas, tranchera peut-être la question: il dira **si mon point de vue actuel est l'erreur d'un homme déjà assez âgé qui reste attaché aux idées de sa jeunesse** ou, au contraire, s'il traduit la clairvoyance d'un chercheur qui a réfléchi pendant toute sa vie sur le problème le plus fondamental de la physique contemporaine ».*

Malgré l'échec de leur quête pour "compléter" la mécanique quantique, la prise de position de ces deux grands scientifiques nous a encouragé à oser chercher dans cette voie.

Pourquoi ces deux grands savants au point de vue si proche n'ont-ils pas travaillé ensemble ? Il faut d'abord remarquer qu'Einstein a été le seul à défendre de Broglie et sa proposition de trajectoires au congrès Solvay de 1927: *« A mon avis, on ne peut lever cette objection que de cette façon que l'on ne décrive pas seulement le processus par l'onde Psi de Schrödinger, mais qu'en même temps on localise la particule pendant la propagation. Je crois que M. de Broglie a raison de chercher dans cette direction ».*

Mais à partir de 1928 et jusqu'en 1951, Louis de Broglie abandonne son onde pilote et enseigne l'interprétation de Copenhague. Et ce n'est qu'à partir de 1952 qu'il revient à ses anciennes conceptions en terme de trajectoires déterministes. La mort d'Einstein en 1955 n'a pas laissé assez de temps à de Broglie pour le convaincre complètement.

En effet, en mai 1953 Einstein est très réservé sur l'interprétation en terme de trajectoires de Broglie-Bohm, comme il l'écrit à Born : *« As-tu vu que Bohm croit (comme de Broglie il y a 25 ans) pouvoir interpréter la théorie quantique dans un sens déterministe? Ce procédé me semble un peu trop facile; mais tu es évidemment mieux placé pour en juger ».*

En fait la théorie de la double solution de Broglie est plus complexe que l'approche de Bohm. « *J'introduisais, sous le nom de « théorie de la double solution » l'idée qu'il fallait distinguer deux solutions distinctes, mais intimement reliées à l'équation des ondes, l'une que j'appelais l'onde  $u$  étant une onde physique réelle et non normable comportant un accident local définissant la particule et représenté par une singularité, l'autre, l'onde  $\Psi$  de Schrödinger, normable et dépourvue de singularité, qui ne serait qu'une représentation de probabilités* » [6].

Nos recherches actuelles sont basées sur cette intuition de Louis de Broglie de l'existence d'une onde statistique  $\Psi$  et d'une onde soliton<sup>44\*</sup>  $u$  ; cependant il ne s'agira pas d'une double solution, mais d'une double interprétation de la fonction d'onde suivant les conditions initiales.

Pour autant, la dernière lettre d'Einstein à Louis de Broglie du 15 février 1954 montre un changement de position in extremis et suggère qu'une forte connivence s'est établie entre les deux grands savants malgré l'obstacle de la langue:

« *Cher de Broglie,*

*Hier j'ai lu, traduit en allemand, votre article, qui m'était déjà connu, concernant la question "quanta et déterminisme" et vos pensées si claires m'ont fait grand plaisir. C'est étonnant combien tout apparaît plus plastique et vif quand c'est exprimé dans la langue qui vous a toujours été familière. Si je vous écris aujourd'hui, la raison en est étrange. Car je voudrais vous dire comment j'ai été poussé vers ma méthodologie qui, vue de l'extérieur, semble assez bizarre. En effet, je dois ressembler à l'oiseau du désert, l'autruche, qui, sans cesse, se cache la tête dans le sable relativiste pour éviter d'avoir affaire aux méchants quanta. En vérité, je suis, exactement comme vous, convaincu qu'il faut chercher une substructure, une nécessité que la théorie quantique actuelle cache habilement par l'application de la forme statistique ».*

Et dans sa réponse à Einstein de Mars 1954, qui sera leur dernière relation, de Broglie le remercie de ces encouragements à persévérer dans cette direction:

« *Cher monsieur Einstein,*

*Votre lettre a été pour moi très intéressante à lire et à méditer. Elle m'a apporté un grand encouragement pour continuer à reprendre, en les approfondissant, les idées que j'avais entrevues en 1927. Comme vous le savez, je travaille maintenant avec quelques jeunes collaborateurs à préciser et à étendre ces conceptions et j'ai obtenu dans cette voie quelques résultats qui me semblent encourageants. Mais il reste, comme vous le pensez bien, des difficultés considérables qui sont bien loin d'être résolues. Néanmoins je suis de nouveau porté à croire que l'interprétation statistique actuellement admise est "incomplète" et qu'il faut rechercher des images spatio-temporelles précises/ du dualisme onde-particule/ permettant de justifier le succès des lois statistiques de la mécanique quantique ».*

## **La non localité et l'expérience EPR**

---

<sup>44</sup> Un soliton est une onde qui se déplace sans changer de forme. Les solitons sont à la base des travaux de Ray Glauber, prix Nobel de physique 2005.

Cinquante ans après cette dernière lettre, Einstein et de Broglie reviennent aujourd'hui au premier plan de la physique quantique pour avoir prédit les trois phénomènes physiques vraiment nouveaux de cette fin du siècle: les ondes de matière avec des atomes froids, les nouveaux états de la matière avec les condensats de Bose-Einstein et la supraconductivité, et la manifestation de l'intrication et de la non-localité quantique dans le paradoxe EPR.

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) [8] introduisent la notion d'état intriqué, dans lequel deux particules présentent des corrélations fortes même si elles sont très éloignées. Sur cette expérience de pensée, ils démontrent que les trois propositions suivantes sont contradictoires:

- a) Les prédictions de la physique quantique sont justes,
- b) Aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière (principe de localité d'Einstein),
- c) Le formalisme quantique est complet.

Ils en concluent que la solution la plus naturelle est que le formalisme quantique est incomplet, ce que Niels Bohr contesta aussitôt.

Il faudra attendre presque trente ans pour que John Bell [9] démontre que la seule conclusion possible de l'analyse d'Einstein, Podolsky et Rosen est que le monde est non local et qu'il faut relaxer l'hypothèse (b). Les expériences des années 80, en particulier celles d'Aspect [10], ont confirmé expérimentalement cette non localité intrinsèque de la mécanique quantique, qui ne peut donc pas être expliquée par des théories n'utilisant que des variables cachées locales.

Bien que l'histoire est tranché contre l'hypothèse la plus raisonnable, celle d'Einstein, et ainsi donné raison à Bohr, c'est Einstein qui a posé la bonne question sur la non-localité. Et comme le note Aspect [11] « *L'observation expérimentale de la violation des inégalités de Bell a ainsi mis en relief les propriétés extraordinaires de l'intrication, découvertes par Einstein, et que l'on cherche aujourd'hui à utiliser en information quantique, pour des méthodes radicalement nouvelles de transmission et de traitement de l'information. Cette révolution conceptuelle conduira-t-elle à une révolution technologique que symboliserait la construction d'un ordinateur quantique ?* »[12]

Rappelons que la théorie de Broglie-Bohm est non locale et n'est donc pas invalidée, comme on le croit souvent, par les résultats de Bell et d'Aspect. La position de la particule qu'elle introduit peut en effet la faire considérer comme locale, mais la vitesse de la particule, qui dépend de la fonction d'onde, l'a rend non locale.

## La fonction d'onde restera-t-elle une énigme?

Bien que l'interprétation de Broglie-Bohm conduise aux mêmes vérifications expérimentales que l'interprétation de Copenhague, bien qu'elle soit déterministe et qu'elle corresponde à un certain réalisme physique qui manque à sa rivale, elle est restée ignorée de la communauté internationale, lorsqu'elle n'est pas purement et simplement rejetée pour son aspect "métaphysique".

« **Je vis l'impossible réalisé** » : c'est en ces termes [13] que John Bell décrit l'intense surprise qui fut sienne quand, en 1952, il lut les articles de Bohm, qui venaient juste d'être publiés. L'impossibilité venait d'un théorème de Von Neumann [14] publié en 1932 dans son livre « Les fondements mathématiques de la mécanique quantique », qui semblait montrer l'impossibilité de compléter la mécanique quantique par des variables cachées.

Vu l'immense prestige du mathématicien Von Neumann, ce résultat et son interprétation physique étaient presque devenus un postulat de la mécanique quantique. Ainsi, comme le rapporte d'Espagnat [15] : « à l'université, Bell avait, comme nous tous, recueilli de ses professeurs un message que Feynman, plus tard encore, devait avec brio énoncer comme suit » : « *personne ne peut expliquer plus que nous n'avons ici expliqué [...]. Nous n'avons pas la moindre idée d'un mécanisme plus fondamental duquel les résultats qui précèdent (les franges d'interférences) pourraient découler!* ».

Aussi John Bell s'interroge-t-il sur les silences de ces professeurs quant à l'onde pilote de Broglie-Bohm: « *Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette "onde pilote"? Ne serait-ce que pour signaler ce qui n'allait pas avec elle? Pourquoi Von Neumann ne l'a pas envisagée? Plus extraordinaire encore, pourquoi des gens ont-ils continué à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978? Alors que même Pauli, Rosenfeld, et Heisenberg, ne pouvaient guère produire de critique plus dévastatrice de la théorie de Bohm que de la dénoncer comme étant "métaphysique" et "idéologique"? Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les cours? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique solution, mais comme un antidote à l'auto-satisfaction dominante? Pour montrer que le flou, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposés de force par les faits expérimentaux, mais proviennent d'un choix théorique délibéré?* »

Entre la thèse de Copenhague et celle de Broglie-Bohm, la synthèse est-elle possible?

Nous vous proposons dans des articles à venir de lever un peu plus le voile sur cette question en revisitant les principales expériences de la mécanique quantique : les interférences dans les fentes de Young [16], la "mesure" du spin dans l'expérience de Stern et Gerlach, l'oscillateur harmonique et l'électron dans l'atome d'hydrogène.

Le fil d'Ariane qui nous guidera est l'application des deux premiers préceptes du "Discours de la Méthode" à la remarque suivante : la fonction d'onde suffit pour décrire complètement une particule « discernable » et ne suffit pas pour décrire complètement une particule « indiscernable ».

Toute contribution des lecteurs à ce difficile problème sera la bienvenue..

## Bibliographie

[1] A. Einstein, "Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière", *Annalen der Physik*, **17** p.132-148 (1905)

[2] L.de Broglie, 1927, *J. de Phys.*, **8**, p. 225-241.

[3] D. Bohm, "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables", *Physical Review*, **85**, 166-193 (1952).

[4] A. Einstein, M. Born, *Correspondance 1916-1955*, Edition du Seuil, 1972.



- [5] L. de Broglie, "Mon anxiété devant le problème des quanta" dans: *Certitudes et Incertitudes de la science*, Albin Michel, Paris, 1966.
- [6] L. de Broglie, "Recherches sur la théorie des quanta", Thèse de doctorat soutenue à Paris le 25 novembre 1924; *J. de Phys.*, **8**, p. 225-241, 1925. Reproduit dans: L. de Broglie, *Recherches sur les quanta* (Fondation Louis de Broglie, Paris, 1992).
- [7] A. Einstein, *Oeuvres choisies 1 Quanta*, par F. Balibar, O. Darrignol et B. Jech, Editions du Seuil, Paris (1989).
- [8] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, "Can quantum mechanical description of reality be considered complete?", *Phys. Rev.* **47** (1935) 777-780.
- [9] J. S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics* **1**, 195 (1964).
- [10] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49** 1804 (1982).
- [11] A. Aspect et P. Grangier, "Des intuitions d'Einstein à l'information quantique : les stupéfiantes propriétés de l'intrication", *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, n° 875, juin 2005, Hors série.
- [12] Y. Mukharsky, « Les Qbits et le calcul quantique : le silicium d'après demain », *REE* n°10, nov. 2004.
- [13] J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1987).
- [14] J. Von Neumann, *Les fondements mathématiques de la Mécanique Quantique*, Editions Gabay (1988)
- [15] B. d'Espagnat, *A la recherche du réel*, Gauthiers-Villars, 1979.
- [16] M. Gondran, and A. Gondran, "Numerical simulation of the double-slit interference with ultracold atoms", *Am. J. Phys.* **73** (5), 2005.
- [17] M. Gondran, A. Gondran, *La Mécanique quantique: et si Einstein et de Broglie avaient raison ?*, à paraître, 2005.