

**BULLETIN N° 129**  
**ACADÉMIE EUROPÉENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**Séance du mardi 18 novembre 2008 :**  
**Assemblée générale annuelle de l'A.E.I.S.**

**Prochaine séance le mardi 9 décembre 2008 :**  
**Discussion et choix de la thématique du prochain Congrès**

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Michel GONDRAN  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Bruno BLONDEL

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

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :**  
**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr François BEGON

**PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE** : Doyen René DARS  
**PRESIDENT DE LA SECTION DE NANCY** : Pierre NA BET

novembre 2008

# N°129

## TABLE DES MATIERES

- P. 4 Compte-rendu de la séance du mardi 18 novembre 2008 (AG 2007-2008)
- P.11 Compte-rendu de la section de Nice-Côte d'Azur du 16 octobre 2008
- P. 12 Annonces des Congrès PIF et AEIS sur l'Emergence
- P. 20 Documents

Prochaine séance: Mardi 9 décembre 2008  
MSH, salle 215-18heures  
Discussion et choix de la thématique du prochain Congrès

# **APPEL A COTISATION**

La cotisation pour la nouvelle année 2008-2009 a été maintenue à 60€. Son montant doit être adressé par chèque à notre collègue Trésorier, Bruno BLONDEL à l'adresse ci-dessous :

**Bruno BLONDEL**  
**Les Jardins de Bures**  
**Pavillon 65**  
**91440 Bures s/Yvette**

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

*Séance du*  
*Mardi 18 novembre 2008*

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

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues, Gilbert BELAUBRE, Bruno BLONDEL, Françoise DUTHEIL, Jean - Pierre FRANCOISE, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY , Pierre MARCHAIS, Victor MASTRANGELO.

Etaient excusés :François BEGON, Alain CARDON, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Marie-Louise LABAT, Saadi LAHLOU, Gérard LEVY, Alain STAHL

Etait présent en tant que visiteur , Claude ELBAZ.

1°) En préambule de la séance sont données quelques informations relatives au congrès « Emergences ; de la fascination à la compréhension ».

Parmi les conférenciers potentiels l'un d'entre eux, Christophe MALATERRE retenu aux USA pendant la période du Congrès et qui devait nous présenter « Origines de la vie : émergence ou explication réductive ? » regrette beaucoup de ne pas pouvoir présenter sa conférence. Il se peut cependant qu'un de ses collègues donne lecture de son travail.

L'Ordre du jour appelle ensuite la tenue de l'Assemblée générale de l'AEIS.

## ASSEMBLEE GENERALE 2008

L'Assemblée générale 2008 est ouverte par notre Président Michel GONDRAN, avec le concours du Trésorier général Bruno BLONDEL et de la Secrétaire générale Irène HERPE-LITWIN. Notre Collègue René DARS, Président de la section Nice-Côte d'Azur, empêché, a délégué Mme Sonia CHAKHOFF Secrétaire de la Section Nice-Côte d'Azur pour nous présenter son rapport moral.

Tous les membres présents ou ayant envoyé un pouvoir sont à jour de leurs cotisations et peuvent donc prendre part au vote.

10 pouvoirs ont été reçus :

5 à Sonia CHAKHOFF

2 à Gilbert BELAUBRE

2 à Irène HERPE-LITWIN

1 à Pierre MARCHAIS

Après nous avoir transmis les amitiés de son Président René DARS, notre Collègue Sonia CHAKHOFF nous donne lecture du rapport de la Section Nice –Côte d'Azur :

### RAPPORT D'ACTIVITE DE LA SECTION NICE CÔTE D'AZUR

Au cours de la période 2007-2008, la section Nice-Côte d'Azur a tenu une réunion tous les mois, sauf en août, tous les troisièmes jeudis.

#### Colloques :

- En 2007, nous avons publié les comptes-rendus du colloque tenu en 2007 au CUM : « Entreprise et mondialisation » qui a attiré un public nombreux. La table ronde qui a permis à des entrepreneurs français travaillant à l'étranger de dialoguer avec le public a fait l'objet d'un DVD inclus dans le volume 7 des actes.
- En 2008, nous avons publié les comptes-rendus du colloque « Les climats de la Terre au cours des temps » tenu fin 2007 au CUM. Ce colloque a comporté les interventions suivantes :
  - ▲ Dernières nouvelles du réchauffement de la planète par René Dars, Michel Frenkiel, Andrée Dagonne,
  - ▲ Y a-t-il une relation entre le champ magnétique et le climat ? par Vincent Courtillot,
  - ▲ Le climat dénaturé, par Nicole Petit-Maire,
  - ▲ Scénarios climatiques futurs : l'apport des modèles et leurs limites, par Hervé Le Treut,
  - ▲ Le réchauffement climatique : prédictions millénaristes ou réalités climatiques, par Claude Allègre,
  - ▲ En guise de conclusion par Jean Aubouin.

Le réchauffement climatique a commencé à la fin de la période glaciaire il y a 8000 ans et se poursuit depuis avec des variations et, semble-t-il, une accélération actuellement qui serait due, en très grande partie, aux activités humaines. Des données récentes semblent montrer que l'activité du Soleil se modifie notablement.

Quoi qu'il en soit, il est clair que laisser le CO<sub>2</sub> continuer à croître dans l'atmosphère ne peut avoir que des conséquences funestes sur le climat et sur l'acidité des océans.

Tiré à 400 exemplaires, ce volume sorti en juin 2008 est pratiquement épuisé.

- En 2008, à l'initiative de Pierre Couillet, nous pensions pouvoir organiser une série de conférences sur « La Méditerranée, berceau de la connaissance » au CUM, avec l'aide de l'Université (Institut Robert Hooke) et nous avons même proposé des sujets d'exposés à tenir tous les troisièmes lundis du mois : « Les lundis de la connaissance ».

Les élections municipales à Nice ont bouleversé les responsabilités au sein des équipes dirigeantes et il semble que le CUM ait pris une orientation nouvelle en liaison avec l'Union pour la Méditerranée souhaitée par le Président de la République.

Pierre Couillet, devenu vice-président de l'Université, nous a convaincus d'organiser nos séances à la Maison des Sciences de l'Homme à St Jean d'Angely.

Les premières séances devraient avoir lieu à partir de novembre 2008.

### **Nouveau membre :**

Nous avons été très heureux d'accueillir le frère Richard Beaud, Dominicain, théologien, philosophe et égyptologue.

Son interrogation fondamentale est : « Qu'est-ce que la conscience humaine a voulu dire quand elle a inventé la religion ? »

### **Honorariat :**

Nous avons proposé l'honorariat à notre confrère le docteur Emile Girard dont l'état de santé ne lui permettait plus d'assister à nos réunions.

### **Finances :**

La nouvelle municipalité de Nice dirigée par le député Christian Estrosi continue de nous aider puisque nous avons reçu une subvention de 3000 € au titre de 2008. Nous avons renouvelé notre demande pour 2009 et déposé également une demande au Conseil Général.

## RAPPORT MORAL DE L'ACADEMIE

Au siège, à Paris, 10 séances mensuelles ont été tenues, avec une participation moyenne de dix personnes. Comme l'année dernière, les travaux ont principalement porté sur la préparation de notre prochain congrès sur l'émergence.

Les conférences suivantes ont été présentées :

- mardi 11 décembre 2007 : par Stéphane Tirard « L'émergence de la vie sur Terre : entre déterminisme et contingence »
- mardi 8 janvier 2008: par Hervé Zwirn « Les systèmes complexes »
- mardi 6 février 2008: par Christophe Malaterre « Origines de la vie : émergence ou explication réductive ? »
- mardi 12 février 2008: par Hugues Bersini « Qu'est-ce que l'émergence ? » ;
- mardi 11 mars 2008 : par Alain Stahl « A propos du livre de M. Kirschner et J. Gerhardt : « The plausibility of life » »
- mardi 8 avril 2008 : par Gilbert Belaubre « Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »
- mardi 13 mai 2008 : par Anouk Barberousse « Emergence et réduction : le cas de la mécanique statistique revisité »
- mardi 10 juin 2008 : « Discussion sur divers aspects de l'émergence » avec Denise Pumain
- mardi 16 septembre 2008: Débats et décisions concernant le Congrès sur l'émergence et conférence par Michel Gondran « »
- mardi 14 octobre : par Alain Cardon et Pierre Marchais « système psychique humain - système psychique artificiel »

Le congrès « Emergence : de la fascination à la compréhension » aura lieu les 15 et 16 décembre 2008 dans l'amphi Buffon de l'Université Paris 7 Diderot.

Le congrès peut être gratuit grâce au prêt de l'amphi Buffon et de ses commodités par l'Université Paris Diderot, prêt obtenue par Gilles Cohen-Tannoudji, d'une subvention du CEA (2000 euros), d'EDF R et D (3000 euros) et de la Région Ile de France (30% des dépenses). Les différentes interventions seront enregistrées en vidéo et les actes seront édités en anglais et en français.

Le programme des deux journées est le suivant :

**Hervé Zwirn** : *Le concept d'émergence.*

**Jean-Paul Delahaye**: *Emergence et complexité de Kolmogorov.*

**Roger Balian** : *Emergence et réduction en Physique statistique.*

**Pierre Coulet** : *Les modèles non linéaires de l'émergence*

**Philippe Hunemann**: *Approches usuelles et computationnelles de l'émergence – au regard du problème de la robustesse ontologique de l'émergent.*

**Denise Pumain**: *Modélisation des processus émergents dans les sciences humaines et sociales.*

**Jean-Jacques Kupiec** : *L'origine des individus.*

**Bernard Walliser**: *Processus émergents en économie.*

**Arnaud Banos** : *Simulation de processus émergents dans l'espace géographique.*

**Christophe Domain:** *Simulation de l'émergence de défauts dans les cuves de réacteurs.*

**Hugues Bersini :** *Ce que la vie Artificielle nous enseigne sur l'émergence.*

**Stéphane Tirard:** *Les origines de la vie sur terre : entre déterminisme et contingence.*

**Christophe Malaterre:** *Origines de la vie : émergence ou explication réductive ?*

**Michel Cabanac:** *L'émergence de la conscience dans la phylogenèse.*

**Gilles Cohen-Tannoudji:** *Le fondamental, l'universel, l'effectif et l'émergent.*

- La section de Nice est toujours très dynamique comme le montre son rapport. Citons en particulier la publication « Les Climats de la Terre au cours du Temps » au PUF et Le Prix Ampère de l'Académie des Sciences attribué à notre collègue Gérard Ioos.
- Bonne nouvelle de la section de Nancy qui vient d'obtenir une salle dans la mairie de Nancy pour tenir ses réunions.

Enfin le site de l'Académie commence à être opérationnel.

# ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## Situation financière au 18 Novembre 2008

SOLDE au 13 Novembre 2007 était de 6482,56 euros

**SOLDE au 18 Novembre 2008 est de 9245,06 euros**

### Crédits 2008 :

15 Cotisations AEIS (Nancy)	450, 00
20 Cotisations AEIS (Nice)	600, 00
20 Cotisations AEIS (Paris) (19 pour 08 et une pour 07)	1200, 00
EDF	3000,00
<b>Total Crédits 2008 :</b>	<b>5250,00 euros</b>

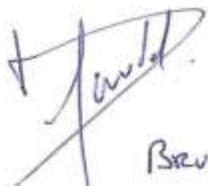
### Dépenses 2008 :

Impression bulletin et postage	2264,50
Remboursement frais de transport	138,00
Remboursement frais d'hôtel	85,00
<b>Total Dépenses 2008 :</b>	<b>2487,50 euros</b>

**SOLDE au 18 Novembre 2008**

**9245,06 euros**

Le Trésorier



BRUNO BLONDEL

de Secrétaire générale



Soumis au vote d'approbation, le Rapport Moral ainsi que le Rapport financier, sont acceptés à l'unanimité des présents et des représentés.

## **ELECTION DU NOUVEAU BUREAU**

L'ancien bureau de l'A.E.I.S. se représente.

Après un vote à bulletin secret, Michel GONDRAN est élu à l'unanimité des votants.

### **Autres Membres du Bureau**

Se présentent en tant que:

- Vice Président : Victor MASTRANGELO
- Secrétaire général : Irène HERPE-LITWIN
- Trésorier : Bruno BLONDEL
- Conseillers Scientifiques pour les sciences de la matière : Gilles COHEN-TANNOUDJI
- Conseiller Scientifique pour les sciences de la vie : François BEGON.

Le Bureau est élu à main levée à l'unanimité des votants.

Après quoi la séance est levée à 20heures.

Bien amicalement à vous,

*Irène HERPE-LITWIN*

# Compte-rendu de la section Nice-Côte d'Azur

*Etudier sans réfléchir est vain.  
Réfléchir sans étudier est dangereux  
Confucius*

## Compte-rendu de la séance du 16 octobre 2008 (119<sup>ème</sup> séance)

### Présents :

Jean Aubouin, Pierre Couillet, Patrice Crossa-Raynaud, François Cuzin, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Yves Ignazi, Michel Lazdunski, Maurice Papo.

### Excusés :

Alain Bernard, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Jean-Paul Goux, Jacques Lebraty, Jean-François Mattéi, Jacques Wolgensinger.

### 1- Approbation du compte-rendu de la 118<sup>ème</sup> séance.

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

### 2- Les lundis de la connaissance.

Pierre Couillet nous a convaincus d'organiser nos séances à la Maison des Sciences de l'Homme à St Jean d'Angély.

Guy Darcourt a accepté de préparer un programme de conférences (bimensuelles avec 1 ou 2 conférenciers par séance ?) dont la première aurait lieu le 17 novembre prochain, animée par Pierre Couillet.

Le problème est évidemment d'attirer un public et de le fidéliser. La contribution de l'Université est indispensable mais nous devons conserver notre spécificité et notamment éditer des actes

### 3- Débat « Autour de la sélection naturelle ».

La durée de la discussion au sujet des « Lundis de la connaissance » n'a pas permis de tenir le débat prévu mais seulement de susciter des interrogations de la part de plusieurs de nos confrères qui pourront les présenter lors de notre prochaine séance du 20 novembre où le sujet sera abordé en priorité.

Le sujet abordé tombe bien puisque l'an prochain sera l'année Darwin. Il pourra être subdivisé en trois parties :

- Les origines : comment se sont créés les gènes sur lesquels s'est ensuite exercée la sélection naturelle.
- La domestication : l'homme a exercé sur la nature une sélection identique dans sa modalité pour mettre les espèces sauvages à son profit.



## *Annonces*

### D) CONGRES PHYSIQUE ET INTERROGATIONS FONDAMENTALES

**Date : Mercredi 10 décembre 2008, de 9h à 18h**

**Lieu : Bibliothèque nationale de France Site François-Mitterrand -**

**Grand auditorium hall Est - Métro : Bibliothèque ou Quai de la Gare**

#### *Les modèles, possibilités et limites ; jusqu'où va le réel ?*

11ème rencontre « **Physique et interrogations fondamentales** » organisée par la **Société française de physique** et la **Bibliothèque nationale de France**

Les modèles jouent un rôle grandissant dans toutes les branches des sciences modernes. Modélisation et simulation sont utilisées pour l'interprétation d'un cadre théorique, sa validation ou sa réfutation, ou bien pour la formalisation d'un programme d'expériences, d'observations ou de prévisions, et pour l'anticipation puis l'exploitation de ses résultats. Ces utilisations diffèrent suivant les disciplines, et c'est cette richesse que se propose d'explorer la 11e rencontre « Physique et Interrogations fondamentales » En écoutant des spécialistes de diverses disciplines (l'astrophysique, la physique subatomique, la climatologie, les mathématiques, l'architecture et la biologie) ainsi qu'un philosophe des sciences, nous essaierons de percevoir les multiples usages que les scientifiques et philosophes font de ces outils dans leur approche du réel, les énormes possibilités qu'ils leur offrent mais aussi les limites qu'ils comportent et dont il convient d'être conscient. Cette rencontre est organisée en concertation avec l'Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (AEIS) qui organise, les 15 et 16 décembre 2008 dans les locaux de l'université Denis Diderot, un congrès sur l'émergence, une approche scientifique du réel dans laquelle la pratique cognitive de la modélisation joue un rôle crucial.

Puisse donc la onzième rencontre « Physique et Interrogations Fondamentales » faire progresser la réflexion interdisciplinaire des biologistes, des physiciens, des mathématiciens, des scientifiques des sciences humaines et sociales et des philosophes sur ces riches concepts.

*L'entrée est libre et gratuite, sur inscription préalable. L'inscription à l'accueil le jour même ne sera possible que dans la limite des places disponibles.*

POUR S'INSCRIRE : <http://sfp.in2p3.fr/CP/pifn/pif/inscpif11.php>

## ***Programme :***

### **Introduction**

Épistémologie des modèles et des simulations

Franck VARENNE

Particules élémentaires : quand un modèle devient standard

Michel SPIRO

Évolution du climat, modélisation, incertitudes

Valérie MASSON-DELMOTTE & Pascale BRACONNOT

Au-delà du réel: modélisation et prédiction

François SAUVAGEOT

Dialogue entre maquettes et modèles en architecture

Daniel ESTEVEZ

Simuler la formation des grandes structures de l'Univers

Romain TEYSSIER

Des algorithmes darwiniens ? Modéliser discontinuités et émergence dans l'évolution

Philippe HUNEMAN

### ***Comité d'organisation:***

**SFP** : Bernard Andrieu, Alain de Bellefon, Gilles Cohen-Tannoudji, Isabelle Cossin, Jean Fontanieu, Étienne Klein, Jean-Pierre J. Lafon, Valérie Lefèvre-Séguin, Jean-Michel Lévy, Marios Petropoulos, Sophie Rémy, Yves Sacquin, Gérard Tronel.

**BnF** : Aline Annabi, Yvonne Gardas, François Nida, Jean-Noël Orengo, Philippe Raccach, Florence Usclat.

Cette rencontre sera diffusée en direct sur Internet par le centre de calcul de l'IN2P3

à l'adresse <http://webcast.in2p3.fr/PIF11>.

>

> [Créez votre adresse électronique prenom.nom@laposte.net](#)

> 1 Go d'espace de stockage, anti-spam et anti-virus intégrés.

>

[Créez votre adresse électronique prenom.nom@laposte.net](#)

1 Go d'espace de stockage, anti-spam et anti-virus intégrés.



II) **CONGRES AEIS SUR L'EMERGENCE**  
 ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES  
 Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris  
**Colloque international et interdisciplinaire**

***Emergences : de la fascination à la  
 compréhension***

Paris, Amphi Buffon, Université Paris Diderot  
 15 et 16 Décembre 2008

« Peut-on expliquer cette totalité qui émerge des parties par les seules propriétés des parties ? » C'est l'une des questions fondamentales de la méthodologie des sciences qui est, depuis un peu plus de cent ans, au cœur des recherches scientifiques et des interprétations philosophiques sur l'analyse des transitions entre milieux complexes.

L'objectif de ce congrès est de mettre de l'ordre dans toutes ces réflexions et prises de positions souvent contradictoires sur l'émergence en allant jusqu'aux frontières de notre compréhension actuelle.

La notion d'émergence correspond-elle aux prémisses d'une révolution conceptuelle de la science, ou n'est-elle qu'un aveu d'impuissance momentanée à l'égard de tout ce qui résiste à notre compréhension ?

Les domaines concernés sont toujours des systèmes complexes dans leurs interactions : systèmes dynamiques non linéaires, chaos, fractales, morphogenèse, auto organisation, transitions de phases, progression des épidémies, structurations des groupes sociaux, apparition énigmatique de la vie, surgissement mystérieux de la conscience.

Après des décennies d'affrontements philosophiques et métaphysiques, les nouveaux outils des mathématiques et de l'informatique ont permis d'aborder l'étude des phénomènes complexes et de leur émergence. De très grands esprits y ont apporté de l'ordre et de la compréhension. Ce sont eux que nous convions à notre congrès, avec l'ambition de faire le point à un moment nouveau dans l'évolution des idées.

La première session du congrès sera consacrée à la position du problème et à la clarification des concepts.

En deuxième session, les nouveaux outils des mathématiques, propres à modéliser les processus émergents, seront présentés avec leurs diverses applications.

Enfin, un tour d'horizon des avancées récentes permettra de donner la parole aux savants les plus éminents dans les domaines concernés.

La conclusion portera sur les débats scientifiques et philosophiques qui animent ces domaines où la rigueur scientifique rencontre le poids des cultures et les orientations métaphysiques.



# *Emergence : de la fascination à la compréhension*

Paris, Amphi Buffon, Université Paris Diderot  
15 et 16 Décembre 2008  
rue Hélène Brion, Paris 13<sup>ième</sup>  
métro et RER Bibliothèque François Mitterrand (sortie Grands Moulins)

## **LUNDI 15 DECEMBRE Accueil à partir de 8.30**

- 9.0 Richard Laganier, Président du Conseil scientifique de l'Université Paris Diderot:  
*Allocution d'accueil.*
- 9.10 Michel Gondran, Président de l'AEIS: *Présentation du congrès.*
- 9.20 Jules Hoffmann, Président de l'Académie des Sciences : *Adresse au congrès* ( à confirmer)

## **PREMIERE SESSION : Bien poser le problème**

- 9.30 Hervé Zwirn, Directeur de Recherche Associé au CNRS (ENS Cachan et IHPST):  
*Le concept d'émergence.*
- 10.10 Jean-Paul Delahaye, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille: *Emergence et complexité de Kolmogorov.*
- 10.50 Pause.
- 11.00 Roger Balian , Académie des Sciences : *Emergence et réduction en Physique statistique.*
- 11.40 Pierre Couillet, Professeur à l'Université de Nice, Directeur de l'Institut Non Linéaire : *Les modèles non linéaires de l'émergence.*

Pause repas.

## **DEUXIEME SESSION: Modélisation des phénomènes émergents**

- 14.00  
Philippe Hunemann, Chargé de Recherche à l'Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques : *approches usuelles et computationnelles de l'émergence – au regard du problème de la robustesse ontologique de l'émergent*
- 15.20 Pause
- 15.40 Denise Pumain, Professeur à l'Université Paris 1, Directrice du laboratoire Géographie-cités : *Modélisation des processus émergents dans les sciences humaines et sociales..*

16.20 Jean-Jacques Kupiec , Directeur de Recherches à l'Ecole Normale Supérieure:  
*L'origine des individus*

## POSTERS

18.00 Fin de session

## MARDI 16 DECEMBRE

### TROISIEME SESSION : L'émergence cas par cas

9.00 Bernard Walliser, Ecole d'Economie de Paris (ENPC, EHSS) : *Processus émergents en économie.*

9.40 Arnaud Banos , Chargé de Recherche au CNRS: *Simulation de processus émergents dans l'espace géographique*

10.20 Pause.

10.40 Christophe Domain, EDF RetD, Département Matériaux et Mécanique des structures : *Simulation de l'émergence de défauts dans les cuves de réacteurs*

11.20 Hugues Bersini , professeur à l'Université libre de Bruxelles : *Ce que la vie Artificielle nous enseigne sur l'émergence*

12.0 Pause déjeuner

14.0 Stéphane Tirard, Maître de conférences à l'Université de Nantes : *Les origines de la vie sur terre : entre déterminisme et contingence.*

14.40 Christophe Malaterre, Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques : *Origines de la vie : émergence ou explication réductive ?*

15.20 Michel Cabanac, Professeur à l'Université de Laval : *L'émergence de la conscience dans la phylogénèse.*

16.00 Pause.

**SESSION DE CLOTURE.**

16.20 . Gilles Cohen-Tannoudji, CEA : *Le fondamental, l'effectif et l'émergent*

**17.00 TABLE RONDE Emergence, ontologies , épistémologie.**

17.50 Michel Gondran Remerciements et conclusion

FIN DU CONGRES

**Formulaire d'inscription à envoyer à l'adresse courriel suivante : [herpei@noos.fr](mailto:herpei@noos.fr)**

Nom ;	Prénom :
Adresse :	CP Ville :
Téléphone(s)	Courriel(s)
Institution	Fonction

## *Documents*

En vue de l'examen d'une thématique possible de congrès sur « les darwinismes » nous vous proposons le chapitre premier du livre de Jean-Jacques KUPIEC, intitulé « de l'origine des individus » qui fait intervenir un darwinisme moléculaire pour l'embryogenèse en opposition avec la notion de programme génétique entre autres...

P. 21 Chapitre premier du livre cité ci-dessus de Jean Jacques KUPIEC

Toujours dans le cadre de la problématique de l'émergence en Biologie :

p. 30 Un article de Jacques RICARD : Complexité , émergence information et causalité dans les systèmes biologiques



## Cinq thèses pour une nouvelle théorie de l'individuation biologique

Chapitre premier du livre de Jean-Jacques KUPIEC : « *de l'origine des individus* »

Editions Fayard « *le temps des sciences* »

Depuis l'Antiquité, les théories biologiques cherchent à appréhender l'espèce et l'individu. Mais on a généralement considéré leurs genèses respectives comme des phénomènes distincts. De ce fait, l'évolution des espèces et le développement des organismes sont expliqués par deux théories différentes, la sélection naturelle et le programme génétique. Cette séparation pose un problème récurrent. Dans la réalité les deux processus sont imbriqués l'un dans l'autre. Concrètement, l'évolution des espèces passe par la reproduction des individus qui se succèdent. Il faut donc nécessairement qu'il y ait un point de jonction entre la théorie de l'évolution et la théorie du développement embryonnaire. Au XX<sup>e</sup> siècle, cette union a été réalisée par ce qu'on a appelé la synthèse évolutive. On considère que l'évolution des espèces provient de la transformation par mutations des programmes génétiques codés dans l'ADN. Si cette théorie permet logiquement de rattacher les deux processus l'un à l'autre, son coût est élevé. Elle induit de nouveaux problèmes liés au déterminisme génétique très fort auquel elle aboutit, et où l'ADN devient omnipotent : par ses mutations il gouverne l'évolution et par l'information génétique qu'il contient il dirige la genèse des organismes. Depuis le séquençage des génomes, on a la confirmation qu'une telle conception est difficilement tenable. D'une part, il y a beaucoup moins de différences entre les génomes des organismes, y compris ceux qui sont phylogénétiquement éloignés, que ce qui était prédit. Il est donc difficile d'expliquer l'évolution par l'addition des mutations ponctuelles de l'ADN. D'autre part, la lecture de ces génomes n'a pas permis de déchiffrer les fameux programmes génétiques qui contrôleraient le développement embryonnaire. Il y a beaucoup moins de gènes que ce qui semble nécessaire pour expliquer l'ensemble des fonctions réalisées par un organisme.

À cause de ces limites du déterminisme génétique, on assiste maintenant à un véritable changement de paradigme, avec l'émergence de la biologie des systèmes. Au lieu d'être centrée sur l'ADN, la compréhension des organismes passe par leur appréhension en tant que systèmes. Dans ce nouveau cadre, on cherche à équilibrer les influences provenant des différents niveaux que sont l'ADN, les réseaux de protéines, les tissus cellulaires, l'organisme et l'environnement. Cette biologie postgénomique fait un appel massif à la bioinformatique pour intégrer les quantités énormes de données recueillies par l'analyse à grande échelle des transcriptomes et des protéomes. Ces programmes visent à identifier la totalité des ARN et des protéines présents dans une cellule pour dresser la carte des interactions qu'ils entretiennent ensemble sous forme de réseaux. De cette manière, on espère arriver à une description exhaustive du fonctionnement cellulaire.

Cependant, le progrès scientifique ne découle pas uniquement de l'accumulation de données. Les observations que l'on fait dépendent autant des théories qui orientent la recherche que l'inverse. Il n'est pas évident que la biologie des systèmes réussisse à dépasser les contradictions de la théorie synthétique de l'évolution si elle ne résout pas aussi sur le fond le problème originel, qui est la séparation de l'évolution et de l'embryogenèse. Pour cela, il est nécessaire de développer un nouveau cadre conceptuel.

L'ontophylogénèse (ou darwinisme cellulaire) résout ce problème et apporte un cadre conceptuel permettant d'échapper à l'omnipotence de l'ADN. Elle rompt avec les théories traditionnelles en considérant le développement embryonnaire et l'évolution comme un processus unique. Elle consiste à appliquer le darwinisme à l'intérieur des organismes, non plus au niveau de l'ADN uniquement mais également au niveau du fonctionnement de la cellule. Elle conduit ainsi à une conception générale permettant d'aborder la question de l'individuation biologique sous un angle nouveau. Cette théorie constitue le sujet du présent ouvrage, au cours duquel elle sera progressivement exposée dans ses différentes extensions.

La notion de probabilité sera d'abord analysée afin que l'on comprenne la différence entre déterminisme et probabilisme. Cette clarification préalable est nécessaire pour saisir en quoi consiste le

caractère intrinsèquement probabiliste du darwinisme et pour le différencier de la théorie de l'auto-organisation. Celle-ci utilise le concept de bruit, ou de fluctuation, mais reste fondamentalement une théorie déterministe (chapitre 2). Les principes du déterminisme génétique seront aussi étudiés en détail. Nous verrons qu'ils sont incompatibles avec les données expérimentales récentes, parce que l'ordre moléculaire qu'ils supposent pour expliquer l'organisation biologique n'existe pas (chapitres 3 et 4). Nous nous pencherons alors sur les variantes du holisme. Ces théories affirment que l'origine de l'ordre, au lieu de se situer au niveau moléculaire *comme* dans le déterminisme génétique, se situe aux niveaux d'organisation supérieurs. L'analyse montrera qu'elles ne sont pas des alternatives valables. Elles s'appuient sur l'idée d'une nature créatrice et sur un retour à l'animisme qui sont une négation pure et simple de la rationalité scientifique (chapitre 5). L'ontophylogenèse sera alors développée. Elle se différencie du réductionnisme et du holisme parce qu'elle ne postule pas d'origine à l'organisation biologique, qu'elle soit cachée au niveau moléculaire ou aux niveaux d'organisation supérieurs. De ce fait, elle peut réellement considérer l'ontogenèse comme un processus et non comme l'expression d'un ordre statique. Les données expérimentales qui la soutiennent s'accumulent depuis plus de quarante ans. Elles démontrent que l'expression des gènes est un phénomène probabiliste et qu'il existe des mécanismes sélectifs s'exerçant sur la différenciation des cellules. De plus, les simulations numériques montrent qu'un modèle ontophylogénétique de différenciation cellulaire est à même de générer des structures tissulaires reproductibles et que le hasard peut jouer un rôle positif dans ce processus. Pour finir, cette théorie sera située dans une perspective historique et philosophique plus large, qui la distinguera aussi bien des conceptions aristotéliennes (hylémorphiques) - plaçant l'origine de l'organisation dans la forme - que des conceptions hippocratiques - qui la placent directement dans le corps matériel, pris dans sa totalité. Cette analyse montrera à nouveau en quoi l'ontophylogenèse se différencie de la génétique et de l'auto-organisation qui, elles, restent dans la continuité de ces cadres de pensée traditionnels (chapitre 7).

Tous ces développements permettront d'étayer progressivement cinq thèses principales qui définissent un cadre pour une nouvelle théorie de l'individuation biologique. Nous allons d'abord les énoncer brutalement et synthétiquement.

## 1.1 L'ONTOPHYLOGENESE

Un organisme multicellulaire adulte comportant de nombreuses parties différenciées résulte du développement d'un embryon, lui-même provenant de la multiplication d'une cellule germinale. Pendant ce processus, les cellules non différenciées au départ se spécialisent et s'organisent en tissus assurant les fonctions nécessaires à la vie. Un organisme doté des caractéristiques d'une espèce biologique est alors produit. À leur tour, de nouvelles cellules germinales sont générées dans cet organisme et l'embryogenèse peut se reproduire cycliquement. Comment expliquer ce phénomène? Il s'agit d'une question à laquelle il est très difficile de répondre.

Jusqu'à présent, le fonctionnement des êtres vivants a toujours été interprété selon des théories déterministes. Pour la génétique et la biologie moléculaire, l'organisme est écrit à l'avance dans le génome sous forme d'un code contenant le programme génétique. Les cellules se différencient selon les instructions de ce programme : des gènes s'activent séquentiellement au cours du développement et synthétisent des protéines spécifiques qui servent de signaux échangés par les cellules. Sous l'influence de ces signaux, celles-ci se différencient spécifiquement. Il s'agit d'un phénomène totalement déterministe qui exclut le hasard. Cette théorie est maintenant contredite par de nombreux faits expérimentaux et pose de sérieux problèmes conceptuels.

L'ontophylogenèse abandonne cette tradition déterministe de l'embryologie et de la génétique. Les cellules changent d'état et se différencient parce que leur fonctionnement est intrinsèquement probabiliste. L'aléa se niche au plus profond d'elles-mêmes, dans le fonctionnement des gènes, là où elles sont censées être gouvernées par le programme génétique. Selon qu'un ensemble ou un autre de ces gènes s'exprime au hasard parmi tous ceux qui composent le génome, la cellule acquiert certaines caractéristiques correspondant à un état différencié. Les interactions entre cellules jouent un rôle important, mais il ne s'agit pas de signaux qui induisent des changements d'état, comme le suppose la théorie du programme génétique. Les interactions cellulaires stabilisent l'expression génétique lorsqu'une combinaison viable de cellules différenciées a été produite par le fonctionnement aléatoire des gènes (Kupiec, 1983). L'expression génétique est alors figée, les cellules ne peuvent plus changer d'état. Si une cellule ne s'adapte pas à son microenvironnement par ce processus aléatoire, elle cesse de se multiplier, elle meurt ou devient pathologique. La structure conceptuelle de l'ontophylogenèse est donc faite d'un mélange de hasard et de sélection analogue à la théorie de la sélection naturelle, mais transposé au niveau du comportement cellulaire.

Cependant, l'analogie avec la théorie de Charles Darwin (1809-1882) va plus loin. Selon l'ontophylogenèse, l'embryogenèse est une véritable extension de la sélection naturelle à l'intérieur des organismes. Les organismes se développent et évoluent en même temps. Tel Janus, le dieu aux deux visages indissociables, l'ontogenèse et la phylogenèse sont les deux faces entremêlées d'une seule réalité, produite par un processus unique (Kupiec, 1986, 1997). Pour cette raison, les définitions habituelles du génome et de l'environnement ne sont pas pertinentes. Non seulement le génome n'est pas porteur d'un programme génétique fait d'instructions rigides dans lequel l'organisme adulte est écrit à l'avance, puisque son fonctionnement est aléatoire, mais la conception que nous avons de l'environnement est également erronée. Celui-ci n'est pas seulement ce qui est extérieur et dont l'organisme est séparé par une frontière hermétique; il se prolonge à l'intérieur de l'organisme en constituant le micro-environnement sélectif de la cellule, auquel elle doit s'adapter. Cette conception du micro-environnement cellulaire est en accord avec celle du milieu intérieur de Claude Bernard (1813-1878). Pour lui, les organes et les cellules mènent une vie autonome dans ce milieu intérieur (Bernard, 1878). L'ontophylogenèse emprunte donc aux théories de Darwin et de Bernard. Elle consiste à appliquer la sélection naturelle aux cellules qui vivent dans le milieu intérieur. Une théorie d'inspiration similaire avait été proposée par Wilhelm Roux (1850-1924) au XIX<sup>e</sup> siècle, mais elle avait été éclipsée par l'essor des conceptions génétiques (Roux, 1881).

## 1.2 L'HOMME-ALEATOIRE

Le mot darwinisme ne désigne plus, de nos jours, la théorie originelle formulée par Darwin mais la synthèse évolutive. Dans ce cadre, les espèces évoluent grâce aux mutations aléatoires de l'ADN. Celles-ci procurent des avantages dans l'utilisation de l'environnement à certains individus, lesquels sont ainsi sélectionnés du fait de leur multiplication plus rapide. Il s'agit là d'une simplification qui élimine les aspects essentiels de la pensée de Darwin. Son livre *L'Origine des espèces* (1859) propose une théorie expliquant les transformations des espèces, mais c'est aussi une interrogation sur ce qu'est une espèce. Le mot «origine» doit être pris dans le sens d'un mécanisme, générateur de l'espèce et non pas d'une origine chronologique à l'intérieur d'une histoire des formes vivantes, ce qui n'est pas le propos de l'auteur : Darwin s'interroge d'abord sur la définition et la signification du mot « espèce ». Ce qu'il en dit est très surprenant<sup>1</sup> et va à l'encontre du sens commun. Il commence par défendre une vision nominaliste en affirmant que l'espèce n'existe pas réellement dans la nature, qu'il s'agit d'une entité abstraite créée par le classificateur au moyen d'un regroupement de formes vivantes qui est arbitraire et dépend de sa subjectivité. Cette position nominaliste de Darwin est aujourd'hui totalement refoulée ou considérée comme une erreur de jeunesse rectifiée par les tenants de la synthèse évolutive (May, 1993). Comme nous le verrons, il s'agit de l'aspect le plus révolutionnaire et fécond de sa pensée, qui porte en germe une théorie générale du vivant. Au contraire, la génétique n'est pas nominaliste mais fondée sur le réalisme de l'espèce. De ce fait, la synthèse évolutive est une synthèse forcée entre des éléments profondément contradictoires, qui conduit à une contradiction théorique et expérimentale (Kupiec, 1999).

Bernard et Darwin ont chacun fait entrer leur discipline dans la modernité scientifique. Il est cependant inhabituel de les rapprocher, leurs domaines de recherche semblant très éloignés : le premier s'occupe du fonctionnement interne de l'organisme et défend un déterminisme absolu, alors que le second s'occupe des rapports de l'organisme avec son environnement externe et défend une théorie probabiliste<sup>1</sup>. La thèse précédente a déjà pointé la similitude entre l'environnement darwinien et le milieu intérieur bernardin. Mais leur convergence concerne également leurs conceptions épistémologiques. De la même manière que Darwin doute de la réalité objective des espèces, pour Bernard les modèles théoriques de la physiologie sont des créations de l'esprit dont la réalité doit être considérée comme subjective. Il va jusqu'à mettre en doute la réalité des fonctions physiologiques. Ainsi, bien que de nos jours cela semble tout à fait surprenant pour un biologiste qui ne connaît pas l'histoire de sa discipline, le père de la théorie moderne de l'évolution ne croyait pas à la réalité de l'espèce et le père de la physiologie moderne ne croyait pas à la réalité des fonctions physiologiques! Ce nominalisme partagé a une signification profonde qu'il est nécessaire d'analyser. Il est la marque d'un anti-essentialisme radical qui permet de comprendre le vivant en renonçant à tout finalisme. L'ontophylogenèse radicalise cet anti-essentialisme bernardo-darwinien.

En effet, pour rompre avec la biologie essentialiste d'Aristote, Descartes avait introduit la conception de l'Animal-Machine en prenant l'horloge comme métaphore de l'organisme. La Mettrie l'a ensuite étendue à l'Homme-Machine<sup>2</sup>. La réduction du vivant à la machine signifie que les processus biologiques suivent les lois physico-chimiques ordinaires comme le reste de la nature. Comme la matière inanimée, la matière vivante est inerte par elle-même. Ce sont les forces qu'exercent les unes sur les autres les parties d'un corps vivant<sup>3</sup> qui mettent un organisme en mouvement et le dotent de propriétés vitales. Cependant, le mécanisme ne réussit pas à éliminer

<sup>1</sup> En fait, Darwin n'emploie pas la terminologie de la théorie des probabilités. Comme nous l'exposons au chapitre 7, § 7.3, son explication de l'origine des variations héréditaires était ambiguë.. Cependant, elle recouvrait ce que nous nommons aujourd'hui une variation aléatoire.

<sup>2</sup> Descartes considérait l'homme comme fait de deux substances: l'âme immatérielle et le corps. La métaphore de la machine ne s'appliquait qu'au corps. La Mettrie a radicalisé cette position. Pour lui il n'y a qu'une substance matérielle. Ce qu'on appelle l'âme ne provient que du fonctionnement des organes de la pensée, d'où l'Homme- Machine.

<sup>3</sup> Ou les réactions chimiques entre molécules.

totale ment le finalisme car l'horloge suppose un horloger. Une machine est construite par son concepteur selon un plan donné à l'avance, avec le but de réaliser une fonction. Toutes ses parties sont ajustées les unes par rapport aux autres en vue de cette fonction globale. La nécessité règne sans partage. L'ontophylogenèse considère aussi la vie comme un phénomène exclusivement physico-chimique. De ce point de vue, elle est mécaniste. Mais, au contraire du mécanicisme traditionnel, foncièrement déterministe, elle repose sur des lois probabilistes. Pour elle, l'Homme-Machine est un Homme-Aléatoire. Elle échappe ainsi totalement au finalisme et à l'essentialisme.

L'ontophylogenèse est aussi différente des théories de l'auto-organisation, qui postulent que la matière n'est pas inerte mais au contraire dotée de propriétés créatrices produisant la vie. Pour elles, l'homme ne peut donc pas provenir du hasard.

### 1.3. LES LOIS DE LA BIOLOGIE ET DE LA PHYSIQUE SONT DE MÊME NATURE

Pour la physique, l'ordre est subjectif parce qu'il est relatif au niveau d'observation auquel se place l'expérimentateur et au degré de précision qu'il s'impose. L'ordre macroscopique à notre niveau d'existence provient du désordre microscopique. Le comportement des molécules et des atomes pris individuellement est intrinsèquement aléatoire mais ce désordre moléculaire est insignifiant au niveau macroscopique. Du fait du nombre immense de particules composant les systèmes, la variabilité individuelle de chaque molécule est négligeable par rapport au comportement moyen de l'ensemble. Erwin Schrödinger (1887-1961) parle à ce sujet du « principe d'ordre à partir du désordre » qui régit la physique. Au contraire, pour la biologie moléculaire et la génétique, la biologie serait soumise à un « principe d'ordre à partir de l'ordre ». L'ordre serait réel, intrinsèque au vivant et indépendant de la subjectivité de l'observateur. L'organisation macroscopique des êtres vivants serait produite par l'ordre microscopique inscrit dans les chromosomes sous forme d'information génétique. D'après cette théorie, les molécules biologiques ne s'assemblent pas selon les lois probabilistes de la physique, mais elles s'emboîtent selon les instructions correspondant à cette information. Il y aurait donc une différence de nature entre la physique et la biologie. En physique, l'ordre serait épistémologique<sup>4</sup>, alors qu'il serait ontologique<sup>5</sup> en biologie. Cette analyse faite par Schrödinger (1944) est à la base de la théorie du programme génétique. Elle domine la biologie moléculaire depuis ses débuts, mais ses racines historiques et philosophiques sont beaucoup plus anciennes. L'information génétique est équivalente à la cause formelle ou à l'âme dans la philosophie d'Aristote. Il s'agit d'un principe d'ordre qui détermine une organisation invariante des êtres vivants correspondant à l'espèce. Cette analogie entre la génétique et le système d'Aristote a déjà été pointée par les fondateurs de la biologie moléculaire et de la théorie synthétique de l'évolution (Delbrück, 1971; Mauron, 2002; Mayr, 1982; Vinci et Robert, 2005), sans qu'ils la considèrent comme un problème. L'utilisation de concepts aristotéliens par la biologie ne ferait que démontrer la pertinence du système d'Aristote. En réalité, cette structure théorique induit des contradictions qui minent le développement de son programme de recherche.

En effet, cette conception aristotélienne de la biologie moléculaire est aujourd'hui infirmée par les observations les plus récentes. Contrairement à ce qu'elle prédit, il existe un très fort désordre moléculaire dans les systèmes biologiques. L'expression des gènes et les interactions entre protéines ne sont pas rigidement déterminées. Au contraire, elles ont un caractère foncièrement probabiliste. L'ontophylogenèse permet de dépasser cette contradiction parce qu'elle intègre pleinement les lois physico-chimiques probabilistes. Pour elle, le comportement des protéines est soumis au hasard brownien et aux lois de la diffusion. Elle n'introduit donc pas, comme le fait la génétique, une différence de nature entre physique et biologie. De ce point de vue, elle est encore différente des théories de l'auto-organisation, qui, tout comme la biologie moléculaire, considèrent que l'ordre est réel.

---

<sup>4</sup>. C'est-à-dire dans le sujet connaissant.

<sup>5</sup> C'est-à-dire constitutif du réel, inhérent au monde, indépendamment du sujet connaissant.

## 1.4 LE PRINCIPE PREMIER DE LA BIOLOGIE

L'opinion selon laquelle la philosophie n'a plus grand-chose à apporter à la science est très répandue. La science serait seule capable de nous donner accès à une connaissance réelle et sûre de sa vérité grâce à la méthode expérimentale, et la philosophie ne serait que spéculation métaphysique, sans utilité aucune pour la recherche scientifique. Elle ne pourrait, au mieux, que servir à étudier la méthode et le développement de la science.

Cette manière de voir est erronée. Dans toutes les sciences il existe des entités ou des principes premiers qui servent de point de départ. Ces principes ne sont pas démontrés. Ils sont donnés *a priori* comme constitutifs du réel. Or ces principes ne sont pas intangibles. Par exemple, la physique de Newton repose sur un espace à trois dimensions et un temps absolu. Mais cette structure première de l'univers a été abandonnée par Einstein, ce qui l'a conduit à élaborer la physique relativiste. Les principes premiers relèvent de l'ontologie, qui est un domaine à la limite entre science et philosophie. Le choix des principes premiers est très important parce qu'ils déterminent la nature des théories scientifiques qui sont construites à partir d'eux.

En biologie, la question des principes premiers ne semble pas poser de problème. Elle peut se formuler ainsi: quelles sont les entités du monde vivant qui sont primordiales? La réponse semble aller de soi : lorsque nous regardons le monde vivant, nous repérons immédiatement des êtres individuels se suffisant à eux-mêmes, et, si nous les comparons les uns avec les autres, nous remarquons parmi ceux-ci des sous-ensembles d'êtres identiques entre eux. Nous identifions ainsi une entité première, l'organisme individuel, et l'espèce qui lui est coextensive<sup>6</sup>. Nous ne doutons pas un instant que ces deux entités existent réellement dans la nature indépendamment d'un découpage subjectif que nous effectuons pour les repérer et de l'élaboration théorique que nous opérons. Une lignée généalogique est alors conçue comme une succession d'ontogenèses identiques mais ayant chacune sa réalité individuelle indépendante. Elle semble simple et naturelle et elle a toujours eu tendance à dominer la biologie.

Il existe cependant une autre conception. Il s'agit de celle qu'ont tendu à adopter certains classificateurs et quelques évolutionnistes. Elle consiste à élargir son regard au-delà de l'individu pour voir comme entité première non plus l'organisme, mais la lignée généalogique. Il est possible, en effet, de s'intéresser d'abord aux relations entre les êtres qui se ressemblent. La notion qui apparaît alors est celle du lien de parenté qui les unit. Celui-ci s'appuie sur la continuité matérielle des êtres vivants par la transmission d'une cellule germinale et de son matériel héréditaire. Nous avons rappelé précédemment le nominalisme de Darwin. Il n'en est pas resté à cette position négative. Par ce nominalisme, il a rejeté la définition essentialiste de l'espèce mais pour y substituer une définition évolutionniste. Selon lui, une espèce est une lignée généalogique correspondant à un groupe d'organismes ayant un même ancêtre commun. Dans une telle conception, le lien généalogique devient le principe premier et l'organisme une entité seconde produite par le processus créant ce lien, c'est-à-dire le processus évolutif lui-même. L'organisme est une entité qui n'a d'existence qu'en tant que moment dans le processus continu de reproduction des organismes. Cette conception généalogique du vivant est implicite chez Darwin et Bernard l'a exposée explicitement (Bernard, 1878).

Cependant, aujourd'hui, elle a disparu de la physiologie contemporaine et la biologie doit faire face à une autre contradiction. Depuis l'avènement de la génétique, elle est dominée par le point de vue qui fait de l'organisme individuel un principe premier, alors que les êtres vivants sont des productions historiques dont l'explication nécessite une conception généalogique. La théorie synthétique de l'évolution a essayé de résoudre ce problème, mais elle n'y est pas parvenue car elle continue de considérer l'ontogenèse et la phylogenèse comme relevant de deux processus distincts. Au contraire, l'ontophylogenèse lève cette contradiction car elle permet une synthèse effective des deux points de vue en unifiant l'embryogenèse et l'évolution en un processus unique.

<sup>6</sup>. Puisqu'une espèce est un ensemble d'individus identiques.

## 1.5. L' HOMME PERDU DANS LA FORÊT AMAZONIENNE

Une autre opinion fort répandue consiste à croire que les difficultés rencontrées en biologie proviendraient de la complexité du vivant. Cette complexité serait liée à son organisation hiérarchique faite de niveaux superposés : molécules, cellules, tissus, organes, organismes, écosystèmes. A cette hiérarchie de structure correspondrait une hiérarchie de contrôles conduisant à des réseaux très compliqués d'interactions multiples entre composants, qui ne peuvent être décrits par des lois simples. Cette organisation hiérarchique semble évidente, mais elle soulève la même question que celle concernant les espèces: s'agit-il d'un principe premier? Est-elle ontologiquement réelle? Pour la génétique et pour les théories de l'auto-organisation, la réponse est positive: il s'agirait d'une structure constitutive du vivant. Chaque niveau serait doté de propriétés déterminant le fonctionnement des organismes. Du fait de cette similitude ontologique, la génétique et l'auto-organisation sont confrontées aux mêmes écueils. L' auto-organisation, qui se pose en alternative, n'est pas plus pertinente que la génétique. Elle conduit aux mêmes contradictions.

À l'inverse, pour l'ontophylogénèse l'organisation hiérarchique n'est pas un principe premier. Nous avons du mal à accepter cette idée parce qu'il y a un obstacle épistémologique particulier à la biologie. Il ne réside pas dans une complexité intrinsèque du vivant, mais dans la difficulté extrême que nous avons à dépasser l'essentialisme dans notre rapport avec lui. Nous voulons toujours le doter de propriétés qui le différencient du reste de la nature. Ce sont des propriétés d'ordre intrinsèque, soit les propriétés codées dans l'information génétique, soit les propriétés émergentes et créatrices postulées par l'auto-organisation.

Pour comprendre cette difficulté, on peut utiliser une analogie. Tout le monde connaît l'allégorie de la caverne de Platon. Ici, la situation est différente. L'homme n'est pas prisonnier dans une caverne, il est perdu dans la forêt amazonienne. Il n'a aucune idée du contexte géoclimatique dans lequel il se trouve et il ne peut jamais voir l'Amazone, dont il ne connaît pas l'existence. Sous ses yeux, il a cet incroyable amoncellement de végétation fait de plantes de toutes sortes, grandes ou petites, qui s'entrelacent en tous sens. Cette forêt aux détails innombrables lui paraît d'une extraordinaire complexité et il pense que son explication doit être tout aussi complexe : il cherche un sens et une cause pour chaque détail. Par exemple, pourquoi cette plante particulière se trouve-t-elle exactement à cet endroit précis, et pourquoi ses branches s'entremêlent-elles avec celles de cette autre plante?

Dans cette quête de sens, il réussit à classer plusieurs types de plantes en fonction de leur taille et, ainsi, il reconnaît plusieurs niveaux peuplés d'êtres entretenant des relations spécifiques qui sous-tendraient cette complexité: les phénomènes liés aux petites plantes qui surviennent près du sol, ceux qui ont lieu plus haut vers la cime des grands arbres et ceux qui se situent à une hauteur intermédiaire. Cette structure lui paraît inhérente à la forêt et à même d'en rendre compte. En effet, chacun de ces niveaux semble avoir ses propriétés propres en termes de luminosité, de température, d'humidité ou de sensibilité au vent. Pourtant, s'il voyait l'Amazone, probablement comprendrait-il que cette prétendue complexité et cette prétendue organisation hiérarchique possèdent une explication simple liée à l'abondance de l'eau dans cette région, qui permet la croissance d'une végétation luxuriante. Et il comprendrait également que la multitude de petits détails qui composent la forêt est le résultat d'aléas se produisant pendant cette croissance et n'ayant ni explication ni sens particulier. Quant aux niveaux d'organisation, il ne s'agit pas d'une structure constitutive inhérente à la forêt, mais du résultat de la croissance végétale dans les conditions où elle se produit. Si ces conditions changeaient (moins d'eau, température différente, etc.), la structure de la forêt changerait également, parce qu'elle n'est pas constitutive mais résulte d'un processus conditionné par la composition de l'environnement.

Lorsque nous analysons le vivant, nous sommes dans une situation analogue à celle de cet homme perdu dans la forêt. De la même manière qu'il est incapable de voir l'Amazone, nous avons notre point aveugle. L'idée d'une hiérarchie naturelle est intimement liée à l'essentialisme, qui suppose une hiérarchie des formes ou essences structurant le monde. Cette hiérarchie aboutit à l'homme, dont l'existence se voit doter d'un sens émanant spontanément de sa nature. Elle en fait le centre et le projet

ultime de la création. Nous sommes donc incapables d'y renoncer parce que cela reviendrait à abandonner notre position privilégiée et à reconnaître en nous l'Homme-Aléatoire, avec la perte de sens que cela implique . Cet horizon agit comme une menace pour notre intégrité et nous cherchons à l'éviter à tout prix.

# 1 - Complexité, émergence, information et causalité dans les systèmes biologiques

par Jacques Ricard

*(L'article qui suit est une version très légèrement modifiée d'un texte publié par ailleurs)*

La science classique, c'est-à-dire l'ensemble des activités scientifiques qui se sont développées depuis Descartes et ont vu leur apogée au XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup> siècles, repose, me semble-t-il, sur trois principes fondamentaux:

- la recherche de la simplicité derrière une réalité apparemment complexe;
- une approche réductionniste des phénomènes de la nature;
- la conviction que la compréhension du réel, dans la mesure où il nous est accessible, repose sur une chaîne linéaire de causes et d'effets.

Je voudrais d'abord, pour illustrer ces points, citer un passage du "Discours de la Méthode" où Descartes [1] propose quelques préceptes qu'il estime nécessaires à la conduite de la pensée rationnelle. "Le second de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre. Le troisième, de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu, comme par degrés, jusques à la connaissance des plus composés. Ces longues chaînes de raisons, toutes simples et faciles, dont les géomètres ont coutume de se servir, pour parvenir à leurs plus difficiles démonstrations, m'avaient donné occasion de m'imaginer que toutes les choses, qui peuvent tomber sous la connaissance des hommes, s'entre-suivent en même façon et que, pourvu seulement qu'on s'abstienne d'en recevoir aucune pour vraie qu'il ne le soit, et qu'on garde toujours l'ordre qu'il faut pour les déduire les unes des autres, il n'y en peut avoir de si éloignées auxquelles enfin on ne parvienne, ni de si cachées qu'on ne découvre". Cette longue

citation illustre parfaitement les trois idées qui me semblent fonder la Science classique.

Toutefois, au cours des quinze ou vingt dernières années, quelques chercheurs sont arrivés à l'idée que le complexe n'est pas réductible au simple, que les "longues chaînes de raisons", dont parle Descartes, ne sont pas aussi évidentes qu'on aurait pu le penser, qu'il existe sans doute des lois générales de la complexité et des caractéristiques communes à tous les systèmes complexes [2-7].

Dans cet exposé, je voudrais évoquer, plus spécifiquement, quatre questions:

- la question de la définition de la complexité et de l'émergence;
- les principales caractéristiques de systèmes dynamiques complexes;
- la nature et les caractéristiques de l'information des systèmes dynamiques complexes;
- l'apport des études actuelles sur la complexité à quelques questions très générales d'intérêt philosophique.

## 1 Réduction, intégration et complexité

Considérons un système XY, constitué par l'association de deux sous-systèmes X et Y. Supposons qu'il soit possible de définir des fonctions,  $H(X, Y)$ ,  $H(X)$  et  $H(Y)$  qui expriment le nombre de degrés de liberté, ou la richesse potentielle, du système et de ses composants. Si

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (1)$$

alors, les propriétés du système XY peuvent être réduites à celles de ses composants X et Y. XY n'est donc pas véritablement un système, mais simplement un ensemble résultant de l'union de deux sous-ensembles. L'équation (1) définit donc un processus de *réduction*. Si par contre

$$H(X,Y) < H(X) + H(Y) \quad (2)$$

le système XY possède une richesse potentielle (ou un nombre de degrés de liberté) plus faible que celle de ses deux composants X et Y. XY est un véritable système présentant un phénomène *d'intégration* dont l'importance est exprimée par la différence entre les deux membres de l'inégalité(2). Il n'est donc pas possible de réduire les propriétés du système à celle de ses composants. Si enfin

$$H(X,Y) > H(X) + H(Y) \quad (3)$$

alors XY possède plus de richesse potentielle (ou de degrés de liberté) que l'ensemble de ses deux composants X et Y. C'est donc un vrai système, mais qui possède des propriétés *émergentes* par rapport à celles de ses composants. Ce système est défini comme *complexe*. Les notions de complexité et d'émergence sont des notions anciennes, dans l'histoire de la philosophie, mais ce n'est que récemment qu'il est devenu possible de leur donner un contenu physique.

## 2 Principales caractéristiques des systèmes dynamiques complexes

Les systèmes complexes, et particulièrement les systèmes biologiques, possèdent, en général, plusieurs caractéristiques importantes.

- Les systèmes dynamiques complexes renferment une certaine information et sont capables de moduler cette information en fonction de signaux émanant du milieu extérieur.
- Le comportement dynamique du système peut être décrit par ses propriétés dynamiques locales, qui expriment le comportement dynamique de ses éléments, et par ses propriétés collectives, caractéristiques du système pris dans sa globalité.
- Le système possède, en général, une organisation floue. Il n'est ni strictement organisé, ni totalement désorganisé.
- D'un point de vue thermodynamique, un système complexe est, en général, un système ouvert. Il échange de la matière et de l'énergie avec le milieu environnant et n'est donc pas à l'état d'équilibre
- Un système complexe possède une histoire. Son état actuel dépend de ses états antérieurs. Ainsi qu'on le verra ultérieurement, une telle situation réintroduit en Biologie la notion de flèche du temps.
- Un système complexe présente, en général, des effets non- linéaires. Ces effets non- linéaires doivent se traduire par des phénomènes d'émergence et de seuil.

Il est maintenant classique d'aborder l'étude de ces problèmes sur des systèmes biologiques très compliqués, comme le cerveau. Je crois qu'il est plus utile, au contraire, de s'intéresser à des systèmes beaucoup plus simples en apparence, mais qui présentent, toutefois, les caractéristiques essentielles de la complexité. Les réseaux biologiques, et en particulier les réseaux métaboliques, possèdent en général cette propriété. De plus, la notion de réseau transgresse les barrières, établies par la biologie classique, entre ses sous-disciplines. C'est ainsi que les réseaux métaboliques expriment la dynamique des réactions chimiques au sein de la cellule, les réseaux neuronaux décrivent les connexions et la transmission de signaux entre neurones, et les réseaux de type prédateur-proie règlent la dynamique des populations animales. Pourtant, il est tentant de penser que la dynamique de ces réseaux, de nature très différente, répond à des lois communes. Dans ce qui suit, je limiterai mon intérêt à l'étude des réseaux métaboliques, en insistant particulièrement sur l'information de ces

systèmes, qui est probablement la caractéristique la plus importante des phénomènes complexes. De plus, cette notion d'information renouvelle la vision classique qu'ont les biologistes moléculaires de l'idée même d'information biologique.

### 3 Réseaux métaboliques, complexité et information

#### 3.1 La notion de réseau

Un réseau est un graphe constitué par un certain nombre de noeuds connectés les uns aux autres selon certaines règles. De manière très schématique, il existe trois classes de réseaux: les réseaux aléatoires, où les noeuds sont évidemment connectés de manière aléatoire; les réseaux réguliers, où les noeuds sont liés selon certaines règles topologiques strictes; enfin des réseaux ont une organisation située à mi-chemin entre celles décrites dans ces situations extrêmes, et possèdent donc une organisation floue [8-14]. Selon le mode de représentation adoptée, les noeuds de ces réseaux peuvent correspondre à des métabolites, ou à des réactions enzymatiques.

Dans le cas de réseaux aléatoires, chaque noeud est connecté à un certain nombre d'autres noeuds. Si l'on appelle  $p(k)$  la probabilité de choisir au hasard un noeud connecté à  $k$  autres noeuds, cette probabilité varie en fonction de  $k$  selon une loi de Poisson. Le degré de connexion d'un réseau, et particulièrement d'un réseau aléatoire, est caractérisé par un paramètre que l'on appelle le *diamètre* du réseau. Le trajet le plus court séparant deux noeuds, peut comporter un petit, ou un grand, nombre d'étapes. On appelle diamètre du réseau le nombre moyen d'étapes de ces trajets les plus courts, pour toutes les paires possibles de noeuds. Il est évident que si l'on augmente le nombre de noeuds d'un réseau aléatoire, on augmente aussi son diamètre.

L'analyse des séquences de génomes d'organismes variés permet, grâce à la consultation de banques de données, de savoir quels sont les enzymes présents chez ces organismes. Connaissant la fonction de chacun de ces enzymes, on peut ainsi reconstituer les réseaux métaboliques qui se déroulent effectivement chez ces systèmes vivants. On a pu ainsi établir que les réseaux métaboliques ne sont pas aléatoires. En effet, on peut observer que le diamètre de ces réseaux est remarquablement constant le long de l'arbre phylogénétique, quel que soit le degré d'évolution de l'organisme considéré. Il n'y a qu'un seul moyen d'expliquer ce résultat. C'est d'admettre que le degré de connexion des noeuds augmente en parallèle avec le nombre de ces noeuds. Au cours de l'évolution, les voies métaboliques sont de plus en plus nombreuses et comportent un nombre de plus en plus élevé de réactions chimiques. Le degré de connexion de ces voies augmente ainsi parallèlement au nombre d'étapes des réseaux. De plus, la densité des connexions varie au sein même de chaque réseau. Certains noeuds sont fortement connectés alors que d'autres le sont très peu. Chez les organismes les plus primitifs, le réseau métabolique est assez proche d'un graphe aléatoire. Ce réseau se complexifie et acquiert une organisation floue chez des organismes plus évolués [11].

#### 3.2 L'information des réseaux métaboliques

Pour un grand nombre de biologistes moléculaires, l'information d'une cellule se trouve toute entière codée dans une séquence spatiale de signaux chimiques présents chez certaines macromolécules biologiques: acides désoxyribonucléiques (ADN), acides ribonucléiques (ARN) et protéines. La vision optimiste, et erronée, associée à cette idée est que la connaissance complète d'un génome et de ses produits d'expression, ARN et protéines, devrait être suffisante pour reconstituer l'ensemble des propriétés de l'organisme correspondant. C'est cette idée, largement répandue dans les revues scientifiques et les médias, qui est à la base du projet de recherche ambitieux de déchiffrement complet de la séquence du génome d'organismes variés, et notamment de l'homme. Il est clair que cette vision de l'information biologique n'est que métaphorique. La théorie de l'information, telle qu'elle a été formulée par Shannon [15-18], permet de définir quantitativement cette notion

d'information biologique dans un contexte particulier, celui de la transmission d'un message. Il est toutefois possible de formuler ce même concept d'information dans un contexte différent, celui d'organisation. Considérons deux variables discrètes. La première, X, possède un certain nombre de valeurs finies,  $x_i$ . La deuxième, Y, a, elle aussi, des valeurs discontinues différentes,  $y_j$ . Si l'on associe X à Y, c'est-à-dire les valeurs  $x_i$  à  $y_j$ , il est possible de calculer la probabilité d'occurrence des états  $x_i y_j$  à partir des probabilités d'occurrence  $p(x_i)$  et  $p(y_j)$ .

Si ces évènements sont indépendants, on a alors

$$p(x_i, y_j) = p(x_i) p(y_j), \quad (4)$$

mais si ces évènements sont statistiquement corrélés

$$p(x_i, y_j) = p(x_i) p(y_j/x_i) = p(y_j) p(x_i/y_j) \quad (5)$$

Cette dernière relation est due à Bayes et exprime une probabilité composée, ou jointe, à partir de l'une des probabilités conditionnelles,  $p(x_i/y_j)$  ou  $p(y_j/x_i)$ .

L'idée de base de la théorie de Shannon consiste à associer la notion d'information à celle d'incertitude. Un message renferme d'autant plus d'information qu'il présente de risques d'erreur. Il est donc nécessaire de définir une fonction permettant de quantifier ce risque d'erreur, ou ce degré d'incertitude, si l'on veut formuler une expression quantitative de la notion d'information. Une telle fonction doit satisfaire à deux axiomes: un axiome de monotonie et un axiome d'additivité. Par monotonie, on exprime l'idée que l'incertitude (et donc l'information) est d'autant plus grande que le nombre d'états,  $x_i$  et  $y_j$ , pris par les variables X et Y, est plus grand. Par additivité, on entend que l'incertitude des paires XY doit être égale à la somme des incertitudes de X et de Y, si ces variables discrètes sont indépendantes. La fonction d'une probabilité  $p_i$  qui satisfait à ces deux conditions est

$$f_i = -\log(1/p_i) \quad (6)$$

La fonction d'incertitude moyenne correspondante, H, est donc

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

On peut ainsi définir les fonctions d'incertitude individuelles moyennes de X et de Y

$$H(X) = - \sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (8)$$

$$H(Y) = - \sum_j p(y_j) \log_2 p(y_j)$$

appelées aussi entropies de Shannon. Pour des raisons de commodité, que je n'ai pas le temps de discuter, on convient d'utiliser des logarithmes de base deux. On peut aussi définir une incertitude moyenne jointe, ou entropie jointe

$$H(X,Y) = - \sum_i \sum_j p(x_i, y_j) \log_2 p(x_i, y_j) \quad (9)$$

On voit que si la relation (4) est satisfaite

$$H(X,Y) = H(X) + H(Y) \quad (10)$$

Grâce à la théorie de Shannon, les fonctions  $H(X,Y)$ ,  $H(X)$  et  $H(Y)$  des relations (1)-(3) prennent un sens mathématique précis, celui de fonctions d'incertitude moyenne [17].

Si les variables discrètes sont corrélées et si

$$\sum_i p(x_i) = \sum_j p(y_j) = \sum_i \sum_j p(x_i, y_j) = 1 \quad (11)$$

alors on peut démontrer que

$$H(X,Y) \leq H(X) + H(Y) \quad (12)$$

Cette relation exprime le principe de sub-additivité qui est au centre de la théorie de la communication, telle qu'elle a été formulée par Shannon. La différence entre les deux membres de l'expression (12) définit l'information,  $I(X:Y)$ , du système

$$I(X:Y) = H(X) + H(Y) - H(X,Y) \quad (13)$$

et le principe de sub-additivité implique que cette grandeur ne peut être que positive ou nulle. Au sens de Shannon, la notion d'information est donc liée à la notion de corrélation, ou plutôt de

covariance, entre des variables discrètes. Ceci implique qu'il n'y a d'information, dans un segment d'ADN, que si celui-ci est exprimé. De même, la séquence d'acides aminés d'une protéine ne renferme pas, contrairement à ce que l'on voit souvent dans la littérature, d'information. Le principe de sub-additivité n'est fondé que lorsque les relations (11) sont satisfaites, ce qui est bien le cas pour un processus de communication, comme l'implique la théorie de Shannon. Ainsi que cela a été précisé plus haut, la notion d'information peut aussi être formulée dans un contexte différent, celui d'organisation. C'est précisément ce qu'expriment les relations (1) - (3). Dans ce nouveau contexte, toutefois, le principe de sub-additivité peut ne pas s'appliquer, car la relation (11) peut ne pas être satisfaite. C'est précisément ce qui se passe pour des réseaux enzymatiques.

En effet, si des nœuds ne sont associés ni à la variable X, ni à la variable Y, alors les expressions (11) sont toutes inférieures à l'unité et l'on peut trouver des conditions pour lesquelles

$$H(X,Y) > H(X) + H(Y) \quad (14)$$

Le réseau se comporte alors comme un système complexe, c'est-à-dire présentant des phénomènes d'émergence. Je reviendrai ultérieurement sur ce point. L'information, définie à partir de l'expression (13), prend alors le signe moins. On peut ainsi considérer l'information comme la part d'entropie qu'il faut ajouter à l'entropie jointe, ou déduire de celle-ci, pour obtenir la somme des entropies individuelles. D'une manière générale, on peut alors définir l'information comme la capacité qu'ont certains systèmes d'associer de manière spécifique des propriétés particulières, des symboles, des molécules, ou des groupes de molécules et d'engendrer ainsi des fonctions de nature diverse comme la communication de messages, l'émission de signaux, la catalyse etc.

On peut obtenir des réseaux complexes, c'est-à-dire présentant des phénomènes d'émergence, à partir de systèmes enzymatiques apparemment très peu compliqués. De plus, si l'on accepte l'idée que le principe de sub-additivité puisse ne pas s'appliquer, on peut généraliser les principes généraux de la théorie de Shannon à des grandeurs qui ne sont pas en corrélation statistique, mais qui expriment une interaction physique entre deux phénomènes.

Considérons, pour illustrer cette idée, le réseau métabolique le plus simple que l'on puisse imaginer, une réaction enzymatique isolée. Un enzyme E fixe deux substrats AX et B au niveau d'une région particulière de sa surface, le centre actif. Il catalyse la réaction chimique correspondant au transfert de X de AX vers B (Figure 1).

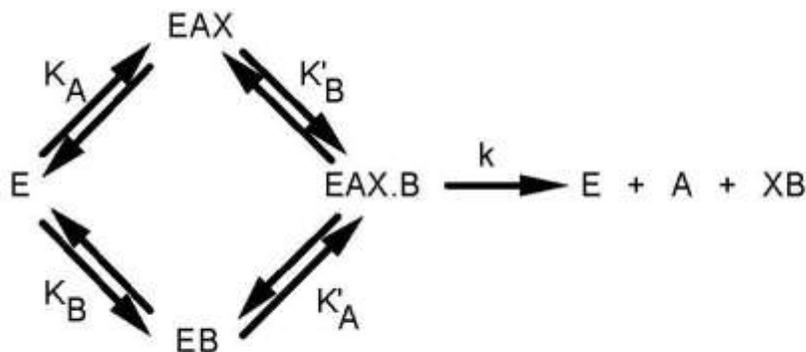


Figure 1 Une réaction enzymatique simple à deux substrats

Si la constante de vitesse catalytique  $k$  est très faible, on peut considérer que le système est à l'état de pseudo-équilibre. Dans ce schéma, on peut calculer la probabilité pour l'enzyme de fixer soit AX, soit B, soit AX et B. Ici, il n'y a pas de corrélation entre deux grandeurs qui, à l'état de pseudoéquilibre, possèdent chacune une valeur fixe. Par contre, la fixation de AX sur l'enzyme peut

interagir avec la fixation de B, et réciproquement. On peut donc définir et calculer les incertitudes individuelles, ainsi que l'incertitude jointe

$$H(A_X) = -\log_2 p(A_X)$$

$$H(B) = -\log_2 p(B) \quad (15)$$

$$H(A_X, B) = -\log_2 p(A_X, B)$$

On peut ainsi montrer que si

$$p(A_X/B) = p(A_X) \quad (16)$$

le réseau ne renferme aucune information. Si

$$p(A_X/B) > p(A_X) \quad (17)$$

l'information du système est positive. Par contre, si

$$p(A_X/B) < p(A_X) \quad (18)$$

le réseau a une information négative. En fait, ce sont les valeurs des constantes d'équilibre  $K_{A_X}$  et  $K_{A_X'}$ ,  $K_B$  et  $K_{B'}$  qui définissent les situations décrites par les expressions (16), (17) et (18). Si  $K_{A_X} = K_{A_X'}$  et  $K_B = K_{B'}$ , la relation (16) est satisfaite et le réseau ne possède pas d'information. Si  $K_{A_X'} > K_{A_X}$  et  $K_{B'} > K_B$ , on se trouve dans le cas décrit par la relation (17), le principe de subadditivité s'applique et l'information du système est positive. Si, à l'inverse,  $K_{A_X} > K_{A_X'}$  et  $K_B > K_{B'}$ , on est dans le cas correspondant à la relation (18). Le réseau possède une information négative et est déjà, bien que fort peu compliqué, un système complexe. L'extension de la notion d'entropie à deux événements en interaction physique conduit à se demander si cette nouvelle définition de l'entropie permet bien d'exprimer quantitativement la notion intuitive d'information. Il est évident que lorsque l'occupation d'un sous-site de l'enzyme par un substrat rend plus facile, ou plus difficile, l'occupation de l'autre sous-site par un autre substrat, cela revient à dire qu'une information est bien transférée d'un sous-site de l'enzyme à l'autre. Les notions d'entropie définies par les relations (15) permettent donc bien d'exprimer, par le truchement de l'équation (13), cette notion intuitive d'information qui se propage au sein de la molécule d'enzyme.

Dans la situation que j'ai décrite jusque là, on considérait que la réaction enzymatique se déroulait au voisinage de l'état d'équilibre. Si maintenant on éloigne de plus en plus le système de son état d'équilibre, en augmentant la valeur de la constante catalytique  $k$ , les valeurs de  $p(A_X)$ ,  $p(B)$  et  $p(A_X, B)$  varient d'une manière telle que l'information du système devient négative et prend des valeurs de plus en plus faibles (c'est-à-dire des valeurs dont le module est de plus en plus grand). Ceci se produit même lorsque le système, à l'état d'équilibre, ne possède aucune information. Le réseau acquiert donc des propriétés émergentes qui sont entièrement dues au déroulement de la réaction en dehors de l'équilibre thermodynamique. C'est le flux de matière traversant le réseau qui est à l'origine de son information négative. Ce qui est vrai pour une réaction enzymatique isolée, est évidemment vrai pour l'ensemble des réactions enzymatiques de la cellule, connectées les une aux autres en un réseau métabolique.

Une autre propriété intéressante des réseaux, que je voudrais brièvement évoquer, est qu'ils peuvent posséder une histoire. Leur comportement dynamique peut, en effet, dépendre, non pas uniquement de la valeur prise par une variable, mais de son sens de variation. Ceci implique que le système, pour une même valeur de cette variable, aura des comportements différents selon que cette

valeur aura été atteinte au terme d'une augmentation, ou d'une diminution. Le réseau présente un phénomène d'hystérésis, et est ainsi capable de "percevoir", non plus uniquement l'intensité d'un signal, mais le sens de variation de cette intensité. Le système fonctionne ainsi comme une sorte d'organe des sens élémentaire. Un tel comportement requiert que le réseau soit hors de l'état d'équilibre et que les équations qui décrivent son comportement soient non-linéaires.

#### **4 Retour sur la définition de la notion de complexité**

Il existe dans la littérature scientifique de nombreuses définitions différentes de la notion de complexité [19]. Chacune de ces définitions possède évidemment sa cohérence interne mais n'a, le plus souvent, pas de relation claire avec ce que le sens commun englobe sous le terme de complexité. Or, pour être satisfaisante, une définition du concept de complexité doit satisfaire à deux exigences: posséder une cohérence interne dans un cadre formel rigoureusement défini; être compatible avec la signification du terme même de complexité, tel qu'il est utilisé dans le langage courant. L'exemple, évoqué plus haut, d'une réaction enzymatique fournit précisément un contexte permettant une telle réflexion.

Si l'on considère que les divers états macroscopiques, par lesquels passe un enzyme au cours de la réaction qu'il catalyse, sont distribués d'une manière telle que les états les plus improbables, et donc les plus riches en information, renferment le plus d'énergie potentielle, l'émergence d'information dans un système complexe est équivalente à une émergence d'énergie.

Ainsi, dans l'exemple de la réaction enzymatique considérée plus haut, si  $K_A > K_A'$  et  $K_B > K_B'$ , le complexe EAXB se situera à un niveau énergétique plus élevé que si  $K_A < K_A'$  et  $K_B < K_B'$ . La thermodynamique permet de montrer que plus le niveau énergétique de EAXB est élevé et plus la constante catalytique,  $k$ , de la réaction sera grande. En d'autres termes, plus le système enzymatique de la Figure 1 sera complexe, et plus l'enzyme sera un catalyseur efficace. L'accroissement de la valeur de la constante catalytique (lorsque  $K_A > K_A'$  et  $K_B > K_B'$ ) peut donc être considéré comme une propriété émergente du système.

D'une manière plus générale, si l'on considère un réseau multimoléculaire correspondant à un processus de fixation-désorption de deux ligands  $x$  et  $y$  sur les  $n$  sites d'une protéine, un enzyme par exemple, le réseau correspondant possèdera quatre types de noeuds. Un (ou des) noeud(s) pour lequel(lesquels) la protéine n'aura fixé ni  $x$ , ni  $y$ , des noeuds, appelés primaires, pour lesquels la protéine n'aura fixé que des molécules de ligand  $x$  ou de ligand  $y$ , et enfin des noeuds secondaires pour lesquels la protéine aura fixé des molécules de  $x$  et de  $y$ . Un tel système multimoléculaire sera défini comme complexe si l'ensemble des niveaux énergétiques des noeuds secondaires, comparé à celui des noeuds primaires, sera suffisamment élevé pour que le sens de l'inégalité définissant la relation de sub-additivité soit inversé. Un tel système possèdera des propriétés émergentes par rapport à celles des sous-systèmes qui le constituent.

#### **5 Implications philosophiques**

Je voudrais maintenant évoquer brièvement quelques problèmes généraux dont l'étude est renouvelée par les recherches actuelles portant sur les systèmes complexes: la nature de l'information biologique, la distinction qui doit être faite entre complexité et complication, la possibilité d'appréhender le réel par le déchiffrement de "longues chaînes linéaires de raisons", le problème de la flèche du temps.

Il est clair qu'il n'est pas satisfaisant d'identifier l'information d'une cellule vivante à son information génétique. L'ensemble de l'information du réseau métabolique se superpose, en effet, à

l'information potentiellement contenue dans l'ADN, de telle sorte que l'information globale d'une cellule est certainement beaucoup plus grande que sa seule information génétique. Dans cette nouvelle perspective, la notion même d'information est changée. Elle n'apparaît plus comme simplement liée à des phénomènes de communication, mais est aussi en relation avec l'organisation aléatoire, stricte, ou floue d'un système, par exemple d'un réseau métabolique. Elle ne peut plus être identifiée uniquement à une séquence spatiale de motifs chimiques dans une macromolécule.

L'émergence et la complexité, définies par la non-application du principe de sub-additivité, se distinguent radicalement de la notion intuitive de complication. Un système apparemment non compliqué peut être très complexe et, inversement, un système compliqué, constitué d'un grand nombre d'éléments, peut ne pas l'être. De plus, les notions d'intégration et d'émergence sont directement liées à la notion d'information et à son signe.

La réduction de la réalité à des séquences linéaires de causes et d'effets (les "chaînes de raisons" de Descartes) apparaît comme hautement simplificatrice. La notion de système, définie par la relation (2) ou (3), et dont le degré d'intégration ou d'émergence correspond à la quantité d'information, ne peut être comprise par la seule analyse de "chaînes de raison".

Un autre problème, dont l'étude est renouvelée par les recherches sur la complexité, est celui de la flèche du temps. De nombreux physiciens considèrent que la notion de flèche du temps, telle qu'elle a été longuement discutée par Bergson par exemple, n'est qu'une sorte d'illusion statistique. Une image permet de comprendre cette idée. Si l'on considère une goutte d'encre introduite en un point précis d'un milieu aqueux, les molécules d'encre vont diffuser jusqu'à occuper la totalité du volume disponible. Si l'on filme ce processus et que l'on projette le film à l'envers, on observe le regroupement des molécules d'encre en un point précis de l'espace, ce qui est évidemment contraire au sens commun. Mais si l'on avait la possibilité de filmer *une* molécule d'encre et que l'on puisse projeter, à nouveau, le film à l'envers, on ne serait choqué en rien. La notion de flèche du temps n'aurait donc de sens qu'au niveau statistique, au niveau de très nombreuses populations de molécules. Ce que suggèrent les études sur la dynamique des réseaux complexes est que cette conclusion n'est, peut-être, pas vraie. On peut, en effet, faire une expérience de pensée où un tel réseau est constitué par un petit nombre de noeuds et de molécules et présente, tout de même, une histoire, c'est-à-dire les phénomènes d'hystérésis évoqués plus haut. Un tel système idéal, regroupant un petit nombre de molécules, serait tout de même capable de percevoir le sens de variation d'un signal, donc la flèche du temps.

**REFERENCES**

- 1) DESCARTES R. (1992) *Discours de la Méthode*. Flammarion, Paris.
- 2) GALLAGHER R. and APPENZELLER T. (1999) Beyond Reductionism. *Science* 284, 79.
- 3) GOLDENFELD N. and KADANOFF L.P. (1999) Simple lessons from complexity. *Science* 284, 87-89.
- 4) WHITESIDES G. M. and ISMAGILOV R.F. (1999) Complexity in Chemistry. *Science* 284, 89-92.
- 5) HATWELL L.H. , HOPFIELD J.J., LEIBLER S. and MURRAY A.W. (1999) From molecular to modular cell biology. *Nature* 402 (sup.), C47-C52.
- 6) SETHNA J.P., DAHMEN K.A. and MYERS C. R. (2001) Crackling noise. *Nature* 410, 241-250.
- 7) RICARD J. (1999) *Biological Complexity and the Dynamics of Life Processes*. Elsevier.
- 8) STROGATZ S.H. (2001) Exploring complex networks. *Nature* 410, 268-276.
- 9) WATTS D.J. and STROGATZ S. H. (1998) Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393, 440-442.
- 10) ALBERT R., JEONG H. and BARABASI A.L. (2000) Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406, 378-381.
- 11) JEONG H., TOMBOR B., ALBERT R., OLTAVI Z.N. and BARABASI A.L. (2000) The large scale organization of metabolic networks. *Nature* 407, 651-654.
- 12) FELL D.E. and WAGNER A. (2000) The small-world of metabolism. *Nature Biotechnology* 18, 1121-1122.
- 13) ALBERT R. and BARABASI A.L. (2002) Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.* 74, 47-97.
- 14) BARABASI A. L., ALBERT R., JEONG H. (1999) Mean- field theory for scale-free random networks. *Physica A* 272, 173-187.
- 15) SHANNON C.E.(1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27, 379-423, 623-656.
- 16) SHANNON C.E. (1949) *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press.
- 17) YOKEY H.P. (1992) *Information Theory and Molecular Biology*. Cambridge University Press.
- 18) ADAMI C. (1998) *Introduction to Artificial Life*. Springer Verlag.
- 19) HORGAN J. (1995) From complexity to perplexity. *Scientific American*, June, 104-109.