

BULLETIN N° 120
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 11 décembre 2007

**Conférence de Stéphane TIRARD Maître de Conférences
en Epistémologie et Histoire des Sciences:
« *L'émergence de la vie sur la Terre :
entre déterminisme et contingence* »**

Prochaine séance : le Mardi 8 janvier 2008

**Conférence de Hervé ZWIRN, Directeur de Recherche Associé au CNRS
(CMLA à l'ENS de Cachan et IHPST):
« *Les Systèmes complexes* »**

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
CONSEILERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI.
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON
PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen René DARS
PRESIDENT DE LA SECTION DE NANCY : Pierre NABET

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

décembre 2007

N°120

TABLE DES MATIERES

- P. 3 Compte-rendu de la séance du 11 décembre 2007
 P.8 Annonce par notre Collègue Antoine FRATINI du Festival de la Psychanalyse de Fidenza du 22 au 25 mai 2008
 P. 9 Annonces par notre Collègue Christian HERVE de 2 conférences d'Ethique médicale
 P.12 Documents

Prochaine séance : Mardi 8 janvier 2008,
 MSH, salle 215-18heures

**Conférence de Hervé ZWIRN, Directeur de Recherche
 Associé au CNRS (CMLA à l'ENS de Cachan et IHPST):**
« Les Systèmes complexes »

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

Séance du
Mardi 11 décembre 2007

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

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Alain CARDON, Jean Pierre FRANÇOISE, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY, Pierre MARCHAIS , Victor MASTRANGELO, Alain STAHL

Etaient excusés : François BEGON, Bruno BLONDEL, Françoise DUTHEIL, Marie-Louise LABAT, Gérard LEVY, Pierre NABET, Lucien SEYNAVE, Pierre SIMON

A) Informations générales

Le Pr. Gabriel LOSA, conférencier du Congrès « Fractales en progrès » nous annonce la tenue du 5^{ème} Symposium international sur « les Fractales en Biologie et en Médecine » qui se tiendra en mars 2008 à Locarno en Suisse . Des informations mises à jour peuvent être trouvées sur le site : <http://www.fractals.issi.cerfim.ch>

Notre Président nous présente le conférencier, Stéphane TIRARD, Maître de Conférence au centre François VIÈTE à l'Université de Nantes où il enseigne l'Histoire des Sciences et des Techniques. Il a publié plusieurs ouvrages, parmi lesquels « Neuroplasticité. Enseigner de nouveaux savoirs ou un nouveau regard ? » chez Vuibert, « Lamarck, Philosophe de la Nature » au PUF, « Epidémiologie. Pour une éducation raisonnée à l'incertitude » chez Vuibert .

Il fait également partie de l'équipe REHSEIS (Recherches Epistémologiques et historiques sur les Sciences Exactes) du CNRS (UMR 7596 – CNRS – Université Paris 7). Dans cette équipe, très interdisciplinaire par nature, Stéphane TIRARD coordonne un séminaire dédiés à **l'Exobiologie**, un vendredi par mois de **10h30 à 12h30**, à l'Université Paris-Diderot CNRS, site CNRS de Tolbiac.

Le programme de ce séminaire est réalisé au sein du PID « Origines des Planètes et de la Vie » du CNRS. Il est mené par REHSEIS (Paris, UMR 7596), l'IHPST (Paris, UMR 8590), le Centre Koyré (Paris, UMR 8560) et le Centre François Viète (Nantes, EA 1161) et mis en œuvre par Jean Gayon, Christophe Malaterre, Michel Morange, Florence Raulin-Cerceau et Stéphane Tirard (Coordinateur 2007-2008). Les dates des prochaines réunions sont citées ci-dessous :

DATES DU SEMINAIRE

25 janvier 2008

François Raulin

Thème prévu : *Conditions dans le système solaire*

Répondant : J. Gayon

1er février 2008

Pierre Glize (à confirmer)

Thème prévu : *Modélisation, Systèmes artificiels*

Répondant : C. Malaterre

7 mars 2008

Pascal Philippot

Thème prévu : *Fossiles*

Répondant : S. Tirard

4 avril 2008

Daniel Prieur

Thème prévu : *Vie dans les milieux extrêmes*

Répondant : M. Morange

16 mai 2008

Danielle Briot

Thème prévu : *Exoplanètes*

Répondant : F. Raulin Cerceau

20 juin 2008

Synthèse

Répondant : Collectif

L'exobiologie se préoccupe des origines terrestres ou même extraterrestres de la vie.

Un autre colloque , intitulé « Définir la Vie » dédié à ce sujet aura lieu les 4 et 5 février prochains au Grand Amphithéâtre du Muséum d'Histoire Naturelle à Paris à partir de 9heures. Pour participer à ce colloque, libre d'accès, il faut cependant s'y inscrire en envoyant un courriel à :

exobio.histphilo@gmail.com

B) Conférence de Stéphane TIRARD : « L'émergence de la vie sur terre : entre déterminisme et contingence »

Après nous avoir déclaré que le terme d'émergence de la vie est d'usage très récent notre conférencier nous propose le plan suivant pour sa conférence :

- I) Etude de la problématique à partir de la fin du XIX^{ème} siècle
- II) Développement des hypothèses entre les années 1920 et 1940
- III) Après la seconde guerre mondiale : cadre expérimental et développement de la chimie prébiotique
- IV) Les origines de la vie sur terre : un problème d'émergence
- V) L'émergence de la vie sur Terre

En page 13 nous vous convions à la lecture d'un article de Stéphane TIRARD relatant de manière détaillée la problématique de l'histoire de la vie sans connaissance exacte du passé. Nous vous convions également à relire l'article de Stéphane TIRARD publié dans notre bulletin n° 119 (novembre 2007).

Après les trois premières parties de l'exposé de notre conférencier surgissent quelques questions de nos collègues :

- Alain STAHL déclare que les microsphères organiques et les micropolymérisations sont très différentes de la vie.
- Jean Pierre FRANÇOISE demande si on pu synthétiser les 20 acides aminés impliqués dans la chimie du vivant.

Stéphane TIRARD répond qu'on a en effet su produire les acides aminés et les bases impliquées dans le fonctionnement cellulaire.

Par ailleurs cette recherche débouche sur l'analyse de systèmes de plus en plus complexes qui posent des difficultés d'innovation impliquant des interactions entre domaines très diversifiés et impliquent précisément l'émergence de nouveaux modèles.

Concernant le problème de l'émergence de la vie, il nous recommande l'ouvrage sur l'Emergence d'Anne FAGOT-LARGEAULT, publié avec D. ANDLER et B. St SERNIN aux Editions Philosophie des Sciences , chez Gallimard en 2002.

Pour ce qui est du problème historique de l'émergence de la vie, il nous renvoie aux travaux de CANGUILHEM (1971). Le vivant est coïncé entre la Science et l'Histoire. Ainsi, se pose les problèmes de savoir si :

- l'explication darwinienne peut s'étendre du biologique au prébiologique
- l'évolution a obéi aux mêmes lois après et avant la constitution du code génétique
- comment passer d'un chaos de réactions chimiques à un métabolisme très ordonné

Principalement nous manquons d'archives pour étudier l'émergence des premières étapes, nous ne disposons pas des conditions initiales et de plus nous en sommes en présence de processus complexes et contingents qui rendent difficile la recherche d'un déterminisme important.

Cette problématique nous renvoie à la lecture des ouvrages de Stéphane JAY-GOULD .

L'émergence de l'ARN et de l'ADN a fait l'objet de nombreuses recherches par Walter GILBERT(The RNA world, Nature 1986) et CAIRNS-SMITH qui fait intervenir le rôle de micas (propriétés de surface).

Après ce très riche exposé, la séance est levée à 20heures,

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN



Association Européenne de Psychanalyse

Du 22 au 25 Mai 2008 aura lieu la 4^e édition du Festival de la Psychanalyse de Fidenza (Italie) ayant comme thème le rapport, de nos jours souvent problématique, entre Nature et Culture.

« L'homme, être culturel par excellence, a fait du symbole sa demeure. Les signes des choses se sont progressivement substitués aux choses mêmes. Ainsi, l'homme s'est aliéné tant du monde naturel que de sa propre nature corporelle, pulsionnelle et imaginaire.

Si les formes et les sensations liées à la Nature ont depuis toujours inspiré les poètes, les mystiques, les philosophes et même les scientifiques, si aujourd'hui on recommence à parler des « lieux de l'âme », si les paysages dans les rêves symbolisent souvent les mouvements et les états d'âme du sujet, c'est parce qu'il existe vraisemblablement un lien originaire inconscient entre le monde naturel et la dimension psychique productrice de culture.

Aujourd'hui, ce lieu de rencontre entre Nature et Culture est gravement compromis, écrasé sous le poids de ciment des « plans économiques ». En privilégiant certaines valeurs comme la domination, l'arrogance, la fonctionnalité, la technique etc, la culture moderne a fini par éloigner l'homme de sa principale et traditionnelle source d'inspiration et a compliqué l'art de se rapporter à soi.

Le rapport avec la Nature, avec ses temps et ses lieux, facilite au contraire les retrouvailles avec *Psyché* par l'influence des formes extérieurs et la synchronisation des rythmes physiologiques du corps avec la pensée. Pourtant, combien de personnes ont la possibilité de recourir quotidiennement à de telles pratiques? Quel genre de rapport l'âme entretient avec le monde naturel? Existe-t-il aujourd'hui encore pour l'homme la possibilité d'instaurer un rapport plus sain et harmonieux avec le monde naturel sans toutefois renoncer à ce que de bon la technique peut offrir? N'est-ce pas en interrogeant ce rapport que pourra émerger une nouvelle conception de « progrès » ?

Voilà quelques unes des questions de fondamentale importance concernant le rapport entre Culture et Nature auxquelles d'éminents intellectuels chercheront tour à tour de répondre à l'occasion de ce Festival ».

Antoine Fratini
 Directeur du Festival de la Psychanalyse de Fidenza

Avec la participation de Michel Cazenave (Prof. de Philosophie Sorbonne, Paris), Gabriele Laporta (Directeur de RAI nuit), Silvano Agosti (metteur en scène), Jean Luc Maxence (psychanalyste, écrivain)...

Conférences organisées par le réseau d'éthique de l'INSERM, le laboratoire d'éthique médicale de l'Université Paris5 et la SFFEM

1°) La première **le Lundi 14 janvier à 18H**, avec la conférence inaugurale du master de recherche en éthique de l'Université Paris-Descartes "**Ethique et recherche biomédicale**" qui sera prononcée par le **Pr Arnold Munnich**, professeur de génétique médicale à l'Hôpital Necker-Enfants Malades..

2°) La seconde **le Jeudi 24 janvier à 18H30**, avec le collectif du même nom: conférence-débat "**Les morts dans la rue-Les morts de la rue**".

Ces deux manifestations ont lieu au même endroit: **12, rue de l'école de médecine, dans le grand amphithéâtre (métro Odéon)**. Bonne année à tous, au plaisir de vous rencontrer bientôt,

Professeur Christian Hervé
Laboratoire d'Ethique Médicale, Médecine Légale,
Droit de la Santé et de Santé Publique
Réseau INSERM "recherche en éthique"
Faculté de Médecine Paris 5
Université Paris - René Descartes
www.ethique.inserm.fr



Edubioethics
Programme Européen
d'Education à la
bioéthique

Le Professeur **Bruno VARET**, Administrateur provisoire de l'Université Paris Descartes
Le Professeur **Patrick BERCHE**, Doyen de la Faculté de Médecine Paris Descartes
Le Professeur **Daniel JORE**, Directeur du Centre Universitaire des Saints-Pères
Le Professeur **Christian HERVÉ**, Directeur du Laboratoire d'Éthique Médicale et de Médecine Légale
et le Docteur **Grégoire MOUTEL**, Secrétaire général de la Société Française et Francophone d'Éthique Médicale

vous invitent, sous la haute présidence du Professeur **Jean-François MATTEI**
Ancien Ministre, Président de la Croix Rouge Française

À la conférence inaugurale du Master de Recherche en Ethique

« Ethique et Recherche Biomédicale »

prononcée par le Professeur Arnold MUNNICH

Professeur de Génétique Médicale, Hôpital Necker-Enfants-Malades

le lundi 14 janvier 2008, à 18 h

Grand Amphithéâtre, Université Paris Descartes
12 rue de l'École de Médecine, 75006 Paris (métro : Odéon)

Renseignements et inscriptions : ☎ 01 42 86 33 35
herve@necker.fr

e-mail :

Mourir dans la rue

Mourir de la rue

Une approche éthique au coeur de la ville

jeudi 24 janvier 2008, 18h30-20h30

• **Présentation du Collectif Les morts de la rue**

Christophe Louis, *Président*

• **Réseau de recherche en éthique médicale INSERM**

Emmanuel Hirsch, *Directeur de l'Espace éthique/AP-HP et du Département de recherche en éthique, Faculté de médecine, université Paris 11*

Christian Hervé, *Directeur du Laboratoire d'éthique médicale et de médecine légale, Faculté de médecine, université Paris 5*

• **Avant la mort**

Edouard Leprovost, Monique Valette, *ATD Quart Monde*

Sandrine Macé, *Aux Captifs, la Libération*

• **Les funérailles des morts de la rue connus des associations**

Pedro Meca, *Compagnons de la nuit, Marcel Olivier, Collectif Les morts de la rue,*

Mireille Zédin, *Unité Sans-abri*

• **Des morts isolés et inconnus**

Daniel Mennechet, *Aux Captifs, la Libération, Claude Wiéner, Collectif Les morts de la rue*

• **Rencontre des proches**

Gilles Courtois, *un voisin, Pierre Abraham, Antigél, Cécile Rocca, Collectif Les morts de la rue*

• **Synthèse**

Bernard Sarrazin, *Collectif Les morts de la rue*

• **Conclusion**

Jean-Claude Ameisen, *Président du Comité d'éthique de l'INSERM, membre du Comité consultatif national d'éthique*

www.espace-ethique.org

** Entrée libre dans la limite des places disponibles*

Renseignements : 01 44 84 17 57 ou 17 81

Grand amphithéâtre de la Faculté de médecine

12, rue de l'Ecole de médecine

75006 Paris - Métro Odéon

PROGRAMME

www.ethique.inserm.fr

Conférence-débat

• **COLLECTIF**

LES MORTS DE LA RUE

Créé il y a cinq ans, le Collectif Les morts de la rue (40 associations accueillant les personnes de la rue, surtout à Paris et en Ile-de-France), honore celles et ceux qui sont morts d'avoir vécu à la rue et interpelle la société sur ces morts prématurées (moyenne d'âge : 51 ans). Depuis, deux ans, il poursuit une réflexion portant sur les enjeux éthiques de cette intervention si particulière au coeur de la cité dans le cadre de l'Espace éthique/AP-HP.

Réseau de recherche en éthique médicale

mail collectif *morts de la rue* : mortsdelarue@free.fr

www.mortsdelarue.org

Documents

Pour étayer la conférence de Stéphane TIRARD nous vous proposons :

P .13 : «*l'histoire de la vie sans trace du passé* » par Stéphane TIRARD

P. 19« *une analyse des théories sur l'origine de la vie* » par Jean ZIN à la suite d'un article publié dans la Recherche sur l'Histoire de la vie par Christian de DUVE en juillet par 2005

En vue de la conférence de Hervé ZWIRN nous vous proposons un article de lui relatif au sujet qu'il traitera le 8 janvier 2008 :

P .35: «*Complexité et émergence* » par Hervé ZWIRN

Genèses

*Voilà 4 milliards d'années, la vie est née dans un jardin
qu'on appelle la Terre.*

© Nasa

L'histoire de la vie sans trace du passé

Par Stéphane TIRARD

Maître de conférences en épistémologie et histoire des sciences

Centre François Viète d'histoire des sciences et des techniques (EA 1161)

Université de Nantes

et Equipe Rehseis (Recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques),

UMR 7596 CNRS.

Pour contacter l'auteur

tirard.s@free.fr

Extrait de Vivant N°5 - Histoire des origines de la vie

28/03/05

Bien que la réflexion sur l'origine de la vie sur Terre remonte aux premiers philosophes grecs, ce n'est que dans les années 1950, avec la célèbre théorie de la « soupe prébiotique » et sa « confirmation » expérimentale par Stanley Miller puis d'autres chercheurs, que cette question s'est imposée aux scientifiques et au grand public. Pourtant, après un règne de trente ans, ce paradigme a été battu en brèche au fur et à mesure qu'il était confronté à d'autres données multidisciplinaires. Il a cédé la place au modèle du « monde ARN », issu d'idées proposées dès les années quarante. Mais celui-ci, prédominant actuellement, durera-t-il ? Malgré des moyens d'analyse inégalés, l'étude de l'origine de la vie se heurte en effet aux obstacles inhérents à l'histoire : la disparition des traces et des témoins ; ne naissent alors que des scénarios plus ou moins probables. La vraie fonction de l'origine de la vie n'est-elle pas alors de nous interroger, avec un regard venu du fond des âges, sur ce qu'est vraiment le Vivant ?

Au milieu des années 1860, les travaux de **Louis Pasteur** (1822-1895) assènent le coup de grâce à la théorie des générations spontanées, qui régnait depuis Aristote. Face aux ballons de Pasteur, qui restent stériles, le savant rouennais **Félix Pouchet** (1800-1872), malgré tous ses efforts, n'a pu convaincre l'Académie des Sciences de l'existence de ces générations.

Un consensus s'établit : les générations spontanées n'existent pas dans la nature actuelle. Dès lors une question s'impose : quels sont les mécanismes qui sont à l'origine de la vie sur la Terre ? Quelles sont les modalités de cette « génération spontanée » primordiale dont les évolutionnistes, **Charles Darwin** en tête, expliquent qu'elle a été à l'origine d'êtres très simples dont provient, par le jeu de l'évolution, l'ensemble du monde vivant ?

En suivant le développement de la réflexion et des travaux sur les origines de la vie au XXe siècle, nous tenterons de révéler comment le caractère historique de cette question engendre des théories qui engagent à une réflexion profonde sur la notion de Vivant.

A l'origine, donc, face au questionnement sur le commencement de la vie, les scientifiques de la deuxième moitié du XIXe siècle vont développer deux hypothèses principales : la panspermie, et le passage du minéral au vivant.

La panspermie : la vie venue d'ailleurs

Selon les tenants de cette théorie, parmi lesquels on trouve des noms aussi illustres que ceux de **Lord Kelvin (William Thomson, 1824 - 1907)** ou **Hermann von Helmholtz (1821-1894)**, la vie est présente dans tout l'univers ; toute planète, dès lors qu'elle s'est suffisamment refroidie, estensemencée par des germes de vie présents dans l'espace.

Si cette théorie ancienne est réactualisée par **Thomson** en 1872, c'est en fait pour lutter contre l'évolutionnisme, car la panspermie permet de contourner la question de la création des êtres vivants. Elle sera cependant assez largement diffusée durant toute la fin du siècle, et le chimiste **Svante Arrhenius (1859-1927)**, durant la première décennie du XXe siècle, lui donnera une forme très raffinée.

Selon lui, des grains microscopiques de matière vivante sont mus en permanence dans l'espace par une « pression de radiation » et sont ainsi conduits à coloniser des planètes nouvelles. C'est là l'apogée de cette théorie. En effet, en 1910 le biologiste français **Paul Becquerel (1879-1955)** montre que les formes de vie les plus résistantes connues dans la nature actuelle, les graines et les spores, ne résistent pas à une exposition au rayonnement ultraviolet. Fort de cette observation, il rejette catégoriquement l'hypothèse panspermiste, et celle-ci connaît dès lors un déclin très marqué.

L'abiogenèse évolutive : une évolution de la matière, du minéral au vivant

Selon la seconde proposition qui se développe au XIXe siècle, les êtres vivants seraient issus d'un processus évolutif à partir de la matière minérale, via l'émergence et la complexification de la matière organique. Cette thèse soutenue activement dans la deuxième moitié du XIXe siècle – par **Charles Darwin** notamment, qui localise le phénomène dans quelque mare chaude – fait rapidement l'objet de développements théoriques marquants, illustrés entre autres par la théorie protoplasmique de **Thomas Huxley (1825-1895)** – selon lequel le protoplasme est la substance fondamentale de la vie, composée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et d'azote – ou celle des monères de **Ernst Haeckel (1834-1919)** – les monères étaient censés être les organismes primitifs ayant fait le lien entre la matière inorganique et le Vivant.

Au début du XXe siècle, le cadre de la biochimie naissante favorise la formulation de suggestions de plus en plus élaborées, décrivant des étapes de l'évolution chimique.

Mais, ce sont les années 1920 qui restent particulièrement marquées par le développement des hypothèses et notamment par celles d'**Oparin** et de **Haldane**.

La formulation des scénarios

En 1924, un jeune soviétique, **Alexander I. Oparin (1894-1981)**, dans un texte dédié aux origines de la vie, pose les bases de la réflexion pluridisciplinaire sur les origines. Le propos du jeune scientifique soviétique embrasse en effet tous les aspects d'une évolution qui comprend tant la formation de la planète que les réactions conduisant de la matière minérale à la matière organique. Au terme de cette évolution, des gouttes de gel préfigurent les cellules primitives. Cinq ans plus tard, indépendamment d'**Oparin**, le britannique **John B.S. Haldane (1892-1964)** publie un texte portant le même titre. À son tour il propose un scénario de l'apparition de la vie sur la Terre. Il décrit les conditions primitives et propose un cheminement jusqu'aux « molécules semi vivantes ».

Ce texte n'est, pour le savant britannique, que le fruit d'une réflexion parmi d'autres, et **Haldane** ne reviendra qu'occasionnellement sur ce thème. Il en va autrement d'**Oparin** qui, en 1936, publie un ouvrage de synthèse sur les origines de la vie. Ce livre, très largement diffusé, témoigne de l'intérêt d'**Oparin** pour ce thème de recherche, sur lequel il bâtira toute sa carrière.

Il s'agit d'un vaste développement de l'approche de 1924 et d'une synthèse de toutes les données qui permettent d'imaginer comment la matière vivante a pu apparaître à la surface de la Terre. Deux aspects doivent être soulignés prioritairement. Oparin estime que l'atmosphère primitive ne pouvait

contenir de CO₂ ; cette caractéristique aura, nous le verrons, une influence notable sur le développement ultérieur des modèles. Par ailleurs, dans la vaste fresque de l'apparition de la vie proposée par Oparin, les structures vivantes élémentaires sont modélisées à l'aide de la notion de «coacervats ». Il s'agit de structures sphéroïdales se formant dans les solutions colloïdales et dont la genèse et le comportement ont été étudiés au début des années 1930 par le biochimiste néerlandais (Leyde) **Hendrik Gerard Bungenberg de Jong** (1893-1977).

La première partie du siècle apparaît donc comme une période de formulations théoriques de plus en plus complètes et élaborées – il faudrait présenter, par exemple, celle de l'astronome et physicien français **Alexandre Dauvillier** (1892 - 1979). Au terme de cet épisode, la réflexion du britannique **John D. Bernal** (1901-1971) incarne cette ambition spéculative. À partir de la fin des années 1940, en s'appuyant sur les travaux de ses prédécesseurs, notamment ceux d'**Oparin**, **Bernal** propose à son tour un scénario, mais non sans apporter ses propres compléments. Ainsi, remarquant que l'apparition de la matière organique complexe reste très improbable en solution, il suggère que le fond argileux de certaines étendues liquides a pu jouer, d'une part, le rôle de support quant à la polymérisation et, d'autre part, celui de catalyseur. Une hypothèse qui, on le verra, sera repris trente ans plus tard par **Graham Cairns-Smith**.

Quelle chimie dans la soupe prébiotique ?

Au milieu du XXe siècle, alors qu'un cadre théorique semble établi, l'approche expérimentale du problème des origines de la vie prend son essor. De prime abord, l'objectif semble simple : il s'agit de réaliser des synthèses de molécules organiques à partir de molécules minérales, en respectant des conditions expérimentales correspondant à celles qui existaient sur la Terre primitive.

En 1951, **Melvin Calvin**(1911-1997) est le premier à se lancer dans cette voie. Il annonce avoir obtenu du formaldéhyde après avoir exposé une solution de CO₂ à un rayonnement. L'expérience est conçue à partir de données lui permettant d'affirmer qu'il respecte les conditions de la Terre primitive et qu'il s'agit bien là d'une expérience sur les origines de la vie.

Pourtant, ses choix seront vigoureusement contestés par **Harold Urey** (1893-1981). Ce physicien (prix Nobel de chimie 1934 pour sa découverte du deutérium) affirme en effet, en 1952, que le milieu primitif envisagé par **Calvin** n'est pas recevable, car contenant du CO₂. S'appuyant sur les travaux d'**Oparin** et sur les siens, il affirme que cette molécule doit être exclue du modèle de l'atmosphère primitive et que celle-ci doit être réductrice.

Il propose alors une ébauche de protocole et dès 1953, l'expérience est tentée par un doctorant chimiste travaillant avec **Urey** à l'université de Chicago, **Stanley Miller**, qui publie ses résultats dans la revue *Science*. A l'aide d'un dispositif devenu célèbre, **Miller** simule un milieu primitif, mer chaude et atmosphère, et utilise des décharges électriques pour reproduire les éclairs supposés fréquents sur la Terre à cette époque. Le mélange initial, représentant l'atmosphère primitive, comprend donc de la vapeur d'eau, de l'hydrogène, de l'ammoniaque et du méthane. Au bout d'une semaine d'exposition de ce mélange aux décharges électriques, **Miller** peut mettre en évidence la synthèse de plusieurs acides aminés.

Le paradigme prébiotique

Cette expérience a fondé les bases d'une chimie des origines de la vie qui devait se développer, suivant les conditions énoncées par **Urey**, pendant environ trois décennies : la chimie prébiotique. La multiplication des tentatives et l'obtention de molécules organiques des plus variées (acides aminés, sucres, bases azotés, thermopolymérisation d'acides aminés...) a permis de concevoir un modèle comprenant trois principaux stades de développement de la vie sur la Terre. À partir de la « soupe

prébiotique » minérale, le premier stade consiste en l'apparition des « petites » molécules : sucres, acides aminés, bases azotées...

Dans un deuxième temps, certaines de ces molécules sont susceptibles de se polymériser, formant des macromolécules, les protéines et les acides nucléiques. Enfin, cette matière organique complexe s'organise en structures constituant les « cellules » primitives.

L'édification de ce modèle est le résultat des travaux de toute une communauté de spécialistes, encouragée notamment par le contexte de la course à l'espace et l'urgence de comprendre l'émergence de la vie afin d'évaluer quelles formes vivantes l'homme pourrait rencontrer en quittant la planète.

La soupe n'est plus si bonne

Au début des années 1980, la confirmation de la présence d'une quantité notable de CO₂ dans l'atmosphère primitive provoque une remise en question de ce qui fondait le modèle de la soupe prébiotique. La nature fortement réductrice de l'atmosphère primitive n'étant plus de mise, ce modèle s'en trouve affaibli et les expériences respectant les conditions dictées par Urey perdent de leur pertinence.

Ainsi, après une longue période durant laquelle on pensait avoir repéré les voies suivies par l'évolution de la matière, cette révision des conditions primitives rappelait que la grande difficulté de la question des origines de la vie réside dans son caractère historique. En clair, la remise en question du dogme de l'atmosphère réductrice ramène à l'un des fondements de l'épistémologie de l'histoire. En effet, toute histoire est constituée par une suite d'événements contingents, dans laquelle chaque état détermine l'existence du suivant. Une conséquence de la contingence de l'histoire est que s'il est possible de tenter d'expliquer comment on est passé d'un état connu à un autre état connu, il est impossible, à partir d'un état, de prévoir quel sera le suivant. Concernant les origines de la vie, il est donc possible d'analyser ainsi la démarche de spécialistes. Ils abordent l'histoire des origines de la vie en mettant en jeu deux états.

Le premier est constitué par les conditions supposées primitives, et le second par l'organisation de la matière dans le vivant actuel. La tâche des chimistes prébioticiens consiste donc à vérifier si des synthèses chimiques, en conditions prébiotiques, permettent de passer de molécules minérales données à des molécules organiques plus ou moins complexes, ou, toujours dans des conditions prébiotiques, de molécules organiques données à d'autres molécules organiques.

Ce faisant, ils testent des possibles et proposent que certaines voies ont pu être suivies par la nature. On l'aura compris, la détermination des conditions supposées régner sur la Terre primitive joue un rôle crucial, puisque tout l'intérêt du test des voies possibles dépend de ce choix de départ. L'abandon définitif de la notion d'atmosphère primitive réductrice rappelle donc les limites de la validité de tout scénario. Pour explorer une histoire, il est indispensable de disposer d'archives, de traces matérielles. Or, précisément, dans le cas des origines de la vie, celles-ci manquent cruellement.

La science en quête d'une histoire sans trace.

Pour l'histoire de la vie, les archives sont les fossiles. Or les microfossiles les plus anciens témoignent de structures déjà extraordinairement complexes qui ne révèlent rien du processus primordial de l'apparition de la vie sur la Terre.

Cette absence a deux conséquences : la première est que les expériences de la chimie prébiotique, bien que parfaitement justifiées, ne peuvent jamais qu'explorer des scénarios fondés sur de conceptions variables des conditions primitives, elles-mêmes issues de travaux de géochimie ou de planétologie comparée. En l'absence d'archives, elles ne permettent pas d'affirmer qu'un scénario soit certain.

La deuxième conséquence est sans doute plus profonde : aborder le problème des origines de la vie nous confronte à la nécessité de développer une réflexion sur la notion même du Vivant.

L'orientation des travaux de ces vingt dernières années témoigne que le renouvellement des idées n'a pu se faire sans tenir compte de ce deuxième point. En effet, le chemin indiqué par la chimie prébiotique s'avérant trop simple, il est devenu nécessaire d'imaginer des systèmes chimiques primordiaux dont les propriétés ont pu en faire des précurseurs du Vivant actuel. C'est dans cette perspective que, dès les années 1970, le chimiste britannique **Graham Cairns-Smith** a développé la théorie de la « relève génétique » (*genetic takeover*), selon laquelle des systèmes chimiques vivants de plus en plus complexes et performants se seraient succédés au cours des temps primordiaux.

Reprenant les idées de **John Bernal**, il suggère que des surfaces argileuses auraient joué un rôle de catalyseur pour la formation des premières molécules organiques.

Une genèse génétique

Le pas le plus remarquable dans cette voie « génétique » a été franchi, grâce aux avancées de la biologie moléculaire, avec l'avènement de la théorie du « monde ARN ». En 1986, **Walter Gilbert** (prix Nobel de chimie 1980 pour sa méthode de séquençage de l'ADN) suggère que la molécule d'ARN, forte de ses propriétés catalytiques (mises en évidence en 1983 par **Sidney Altman** et en 1986 par **Thomas Cech**, tous deux prix Nobel de chimie 1989), aurait pu précéder l'ADN et les protéines («The RNA World », *Nature*).

Cette théorie, qui a été largement amendée depuis, trouve aujourd'hui une audience considérable.

Si ce « monde ARN » semble vraisemblable parce qu'il mobilise des molécules et des propriétés (autocatalyse, réplication, mutation) connues dans le Vivant actuel, il en va autrement des premiers systèmes, disparus sans laisser de trace et dont aucun phénomène actuel ne semble témoigner : leur existence passée ne peut faire l'objet que de spéculations.

Celles-ci mettent en scène des systèmes minéraux susceptibles d'évoluer. **Cairns-Smith**, qui compte parmi ceux qui ont relevé ce défi, a imaginé un monde où les micas, minéraux silicatés formant les argiles, auraient constitué les premiers systèmes assimilables à du vivant. De manière analogue, depuis la fin des années 1980, les pyrites de **Günter Wächtershäuser** et leur métabolisme de surface constituent un autre exemple de réflexion sur de possibles formes vivantes primitives et minérales.

Ainsi, au-delà du discours sur la reconstitution de l'histoire chimique de la planète, ces propositions, qui nous entraînent loin des représentations courantes du monde vivant, nous rappellent que l'historicité de la question des origines de la vie sur la Terre engage à la formulation d'une autre question : qu'est-ce que ce Vivant dont nous cherchons à comprendre le commencement ?

Références

The Huxley Files

<http://aleph0.clarku.edu/huxley/>

S. Miyakawa *et al.* (2002) Prebiotic synthesis from CO atmospheres: Implications for the origins of life, *Proc Natl Acad Sci U S A*. November 12; 99 (23): 14628–14631.

<http://www.pubmedcentral.gov/articlerender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=137469>.

A. G. Cairns-Smith (1982) *Genetic Takeover and the mineral origins of life*, Cambridge University Press.

Voir aussi le site Originoflife.net : <http://originoflife.net/takeover/index.php>.

A. Cairns-smith (1990) *L'énigme de la vie*, Odile Jacob, 204 p.

G. Wächtershäuser (1994) Life in a ligand sphere, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 91: 4283-4287.

<http://www.pubmedcentral.gov/picrender.fcgi?tool=pmcentrez&action=stream&blobtype=pdf&artid=43769>.

G. Wächtershäuser (1988) Before enzymes and templates: theory of surface metabolism, *Microbiol Rev.* 52 (4): 452–484.

<http://www.pubmedcentral.gov/picrender.fcgi?artid=373159&action=stream&blobtype=pdf>.

Site de Marie-Christine Maurel, Institut Jacques Monod, Paris

<http://origines.snv.jussieu.fr/>

American Association for the Advancement of Science, Dialogue on Science, Ethics and Religion

<http://www.aaas.org/spp/dser/petworkshop/index2.shtml>.

Exobiologie, aspects historiques et épistémologiques, actes du colloque du 15 mai 2001, *in Cahiers Francois Viète* co-édité avec Florence Raulin-Cerceau et Stéphane Tirard, n°4, 2002.

Renseignements : <http://www.sciences.univ-nantes.fr/cfv/cahiers.html>

© Vivant Editions – <http://www.vivantinfo.com>

L'origine de la vie

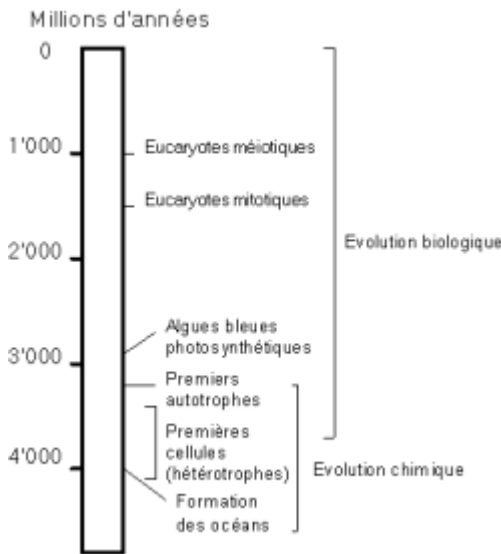
Une analyse du 27/07/05 par Jean ZIN

<http://pagesperso-orange.fr/marxiens/sciences/originvi.htm>

A l'écoute du vivant, Christian de Duve, Odile Jacob, 2002

L'histoire de la vie, La Recherche, mai-juillet 2005

Le mystère de la complexité de la vie



création du vivant et de son évolution.

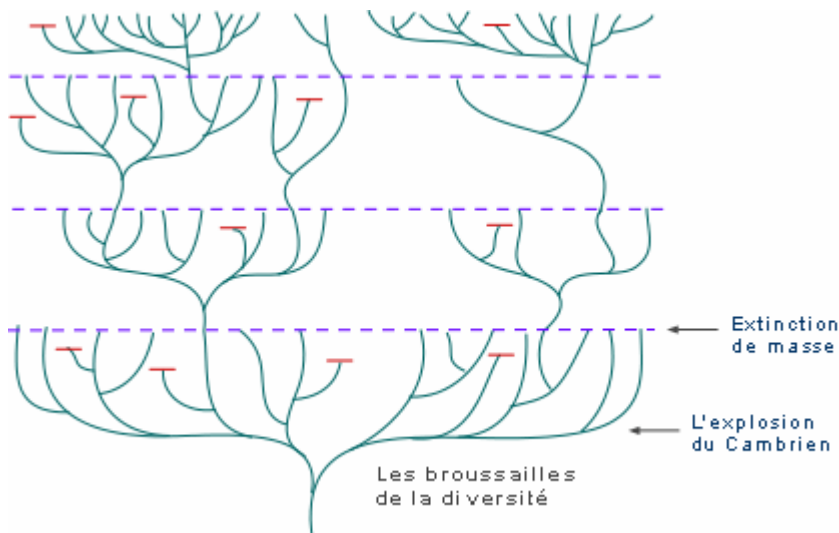
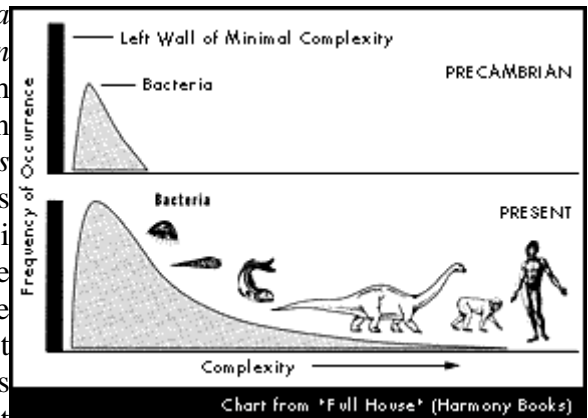
L'histoire de l'origine de la vie est passionnante, non qu'il n'y ait plus aucun **mystère** comme certains le prétendent avec quelque précipitation, mais au contraire parce qu'elle les multiplie et dessine un tracé approximatif qui va du chimique au biologique, des ARN autocatalytiques à la constitution de la cellule et toute l'évolution qui a suivi jusqu'à nous. C'est une histoire dont on connaît la fin et les principales étapes mais où subsistent de multiples trous plus ou moins obscurs, dont certains d'une importance considérable. Pourtant, depuis une dizaine d'années on peut s'enorgueillir d'avoir percé ce qui semblait si obscur jusqu'ici, et compris les grandes lignes de l'apparition de la vie sur Terre il y a 3,8 milliards d'années. Pour la plupart des spécialistes, désormais l'essentiel est acquis, en fin de compte tout se réduit à la chimie ! et certes il n'y a plus aucune nécessité d'un "dessein intelligent" encore moins du doigt de Dieu dans la

C'est un fait acquis, il faudra que la foi aille se faire voir ailleurs.



On peut regretter la place que prennent les **religions** dans le débat biologique (et le livre de Christian de Duve), y compris dans l'opposition militante au créationnisme qui va jusqu'à refuser toute **finalité** au vivant, à l'encontre de l'évidence la plus manifeste, par peur de donner prise au finalisme religieux ! Il y a donc une vue relativement claire des différents stades de l'émergence de la vie, mais cela n'empêche pas que leur interprétation est encore trop incertaine et réductionniste. La plupart du temps on ne fait rien d'autre que de se persuader que ce qui s'est passé devait se passer ainsi (tout ce qui apparaît est bon) ! Il est très exagéré de prétendre avoir tout compris ("*Aujourd'hui, il n'est pas exagéré d'affirmer que nous connaissons le secret de la vie*" CdD 24) car ce qui est remarquable, c'est que les points d'achoppement, les trous de l'histoire, coïncident à chaque fois avec des sauts inouïs de complexification. Effectivement, la complexité du fonctionnement des cellules dépasse l'imagination, chaque processus multipliant les intermédiaires à foison et l'équilibre entre réactions contradictoires. Il faut en retenir deux choses :

1. Comme le dit Christian de Duve dans *La Recherche*, "La direction vers une complexité croissante me paraît un phénomène de stricte observation". John Maynard Smith n'a sans doute pas tort de répondre à cette constatation qu'"aucune règle de l'évolution ne dit que les choses doivent devenir plus complexes", car il y a des régressions ou des bactéries n'ayant pas du tout évolué, ce qui est aussi indéniable. Certains pensent même que la cellule originelle était plus complexe que les bactéries qui en sont issues. Ce n'est pas une raison pour penser que cette complexité aurait pu apparaître d'un seul coup sans passer par des stades plus primitifs. Il faut admettre que la complexification est malgré tout une loi reliée à celle de l'entropie, d'ordre statistique elle aussi et fonction du temps passé. La complexification ne s'applique pas aux espèces mais seulement à un niveau plus global où les probabilités s'ajoutent, où les événements improbables finissent par se produire. Ce n'est pas une loi qui concerne le court terme, au contraire de l'entropie cette fois, mais uniquement le **long terme**. Au fond la complexification inverse l'entropie sur le long terme car si le court terme va presque toujours au plus probable et ramène tout à la moyenne, plus le temps passe et plus l'improbable peut se produire et laisser sa trace pour toujours, organiser durablement l'espace (c'est une forme d'auto-organisation!). Peu importe le temps qu'il faudra mais le meilleur l'emportera un jour et pour toujours même si dans l'immédiat tous les autres passent devant. La complexification à long terme est tout simplement la contrepartie du caractère statistique de l'entropie contre laquelle la vie se défend par le nombre, abandonnant au vent des semences par milliers.



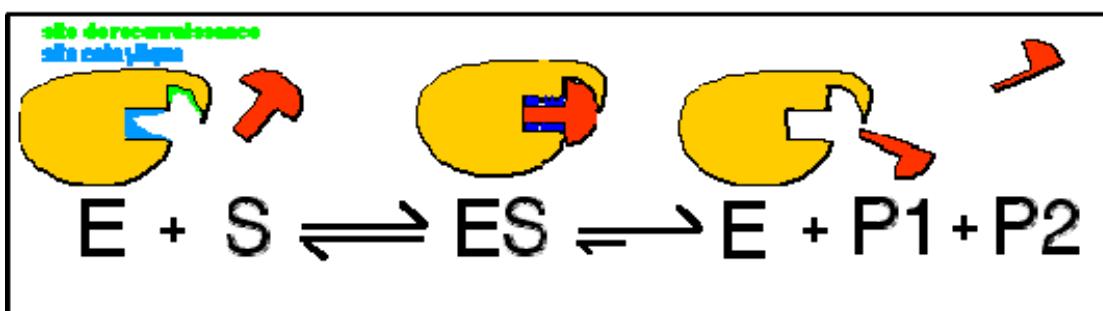
Ce qui est une loi, indubitablement, c'est que la complexité prend du temps, chaque stade se construisant sur le stade précédent grâce à des circonstances exceptionnelles. La loi de l'évolution c'est que le simple précède le complexe et qu'on ne passe pas de la bactérie à l'homme immédiatement, il faut du temps et de nombreuses étapes. Plus le temps passe et plus les organismes peuvent devenir complexes. Ce n'est certes qu'une possibilité mais il semble bien que toutes les possibilités de la combinatoire génétique finissent par être actualisées (il n'y a pas de hasard à ce niveau même si les périodes de radiations accélèrent les mutations). Il suffit qu'elles trouvent des conditions où elles se révèlent favorables. A condition d'avoir un certain degré d'isolation des populations (condition de la biodiversité), le plus probable est une diversification génétique, et sur une période ou un éventail de populations plus large, l'apparition d'une **complexification**. La simple observation démontre que c'est effectivement ce qui se produit. La complexité a donc bien un avantage reproductif à long terme ("*loi de la variété requise*" de Ashby, stipulant qu'il faut un degré de complexité interne équivalent à la

complexité des phénomènes qu'on veut contrôler). Cet avantage adaptatif est fonction des changements environnementaux et des cataclysmes que le vivant a dû traverser, et qui marquent sa mémoire génétique. Ce sont souvent des extinctions de masse qui favorisent l'émergence d'organismes plus complexes, d'autant qu'ils provoquent un morcellement des populations et libèrent des niches écologiques. Il faut se méfier pourtant des mots, il ne s'agit pas d'une simple complexité quantitative car, sur ce plan, on atteint vite un maximum au-delà duquel les performances s'effondrent. Il s'agit d'organisation et d'optimisations, qui peuvent être simplificatrices, d'une mémoire cumulée et de l'incarnation de stratégies éprouvées d'adaptation à des situations de crise qui font partie intégrante de la vie qui les a surmontées (résilience). Il apparaît que la complexité ne vient pas tellement d'une perte de redondance comme le supposait Henri Atlan, ce qui est plutôt une conséquence, mais se construit par découpage, par division et multiplication des intermédiaires (des conditions supplémentaires à remplir) ainsi que par la réutilisation de l'existant ou par branchements genre GOTO en programmation.

2. On se heurte à chaque stade à une complexité telle qu'on ne peut en rendre compte au-delà des mécanismes de base et de la sélection naturelle. Ce "**mur de la complexité**" est peut-être infranchissable, même si on peut considérer que cela n'a pas vraiment d'importance dès lors qu'on tient les deux bouts de la chaîne. Les sauts évolutifs restent pourtant des boîtes noires et notre maîtrise du vivant très approximative. On fait des modèles simplifiés dont le détail nous échappe. La "sélection naturelle" est la formule magique sensée résoudre la question, comme s'il suffisait de secouer la boîte, de faire "abracadabra" et d'attendre un moment pour que tout s'arrange. Le problème, c'est qu'il faudrait attendre très très longtemps ! En fait la place incontournable de la sélection darwinienne dans l'évolution devrait réfuter les prétentions de contrôler le vivant, encore plus de faire mieux ! On peut le réparer voire le modifier mais dans l'optimisation des fonctions rien ne remplace le travail des années.

Il y a beaucoup de choses qu'on sait tout-de-même mais voyons quels sont ces événements improbables qui ponctuent l'histoire de la vie (les transitions de Maynard Smith et Szathmàry) après la formation de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années et l'apparition de la vie il y a 3,8 milliards d'année :

- 1 - L'apparition inexplicée de molécules répliquantes (ARN auto-catalytique)
- 2 - Leur confinement dans un compartiment (argile puis membrane), **cellule**
- 3 - Le passage de répliqueurs indépendants aux chromosomes qui les regroupe (monde à ARN)
- 4 - Le passage de l'ARN comme enzyme et gène (LUCA, *Last Universal Common Ancestor*) à l'ADN (code génétique) et aux protéines (enzymes).
- 5 - Le passage des procaryotes (bactéries) aux **eucaryotes** (cellules à noyau), il y a 2,7 milliards d'années (laissant des traces de stéroïdes)
- 6 - L'apparition de la reproduction sexuée (900 millions ?)
- 7 - L'apparition des organismes pluricellulaires : plantes, animaux, champignons (différenciation cellulaire) au moins vers 800 millions d'années, avec les premiers bilatériens vers 600 millions d'années (après terre gelée et réchauffement) puis l'explosion du cambrien inaugurant le paléozoïque (542 millions d'années) après de grandes extinctions et une remontée de l'oxygène
- 8 - La constitution de colonies animales, d'individus sociaux
- 9 - L'apparition du langage



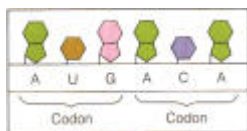
Le fondement chimique de la vie est donc la **catalyse**, molécule facilitant une réaction chimique sans en être affectée (souvent en constituant une étape intermédiaire divisant par 2 l'énergie de chaque réaction. La forme de la molécule détermine sa fonction catalytique par son "site actif"). C'est ce qu'on appelle une enzyme (zyme signifiant levain ou ferment, un pain azyne est un pain sans levain. Ce sont des enzymes qui produisent de l'alcool fermenté par exemple). Les ARN puis les protéines, constituent les enzymes du vivant qui sont des catalyseurs biologiques très complexes, de véritables machineries à l'échelle nanométrique. Il faut souligner que les premières bactéries anaérobies utilisaient le mécanisme de la fermentation pour se nourrir de molécules organiques en rejetant du CO₂. La faculté d'auto-catalyse de certains ARN peut engendrer leur réplication, et donc leur sélection ce qui enclencherait tout le mécanisme de l'évolution.



A partir du quatrième point, c'est l'information qui mène la barque. Les **sauts** de complexité les plus importants se situent à la formation de la cellule sans noyau (bactérienne), déjà extraordinairement complexe, puis à la cellule avec noyau (eucaryote), beaucoup plus grosse et complexe encore. Le passage au stade pluricellulaire serait moins extraordinaire, s'étant produit plusieurs fois (végétaux, animaux, champignons), mais il permettra de faire éclater cette complexité en une exubérance de formes taillée à coups de dents par la course entre prédateurs et proies dans l'espace des possibles, course sans fin entre contraintes de l'organisme et de l'environnement en co-évolution constante.

La reproduction et l'information

Qu'est-ce que la vie ? Elle résulte de processus chimiques complexes où interviennent principalement trois types de molécules géantes capables de transmettre de l'information : les protéines et deux familles d'acides nucléiques, l'acide ribonucléique (ARN) et l'acide désoxyribonucléique (ADN). La Recherche p34



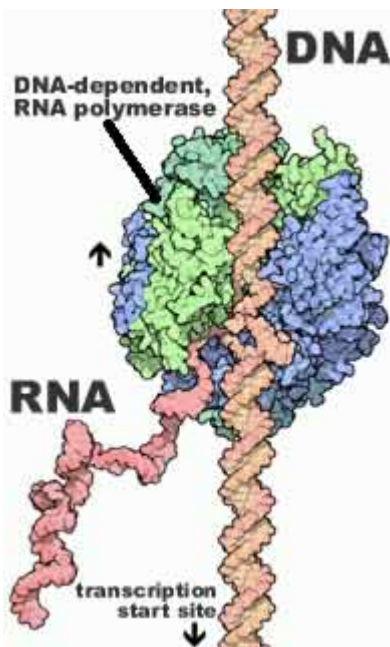
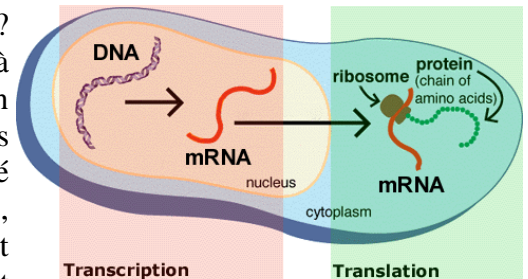
L'évolution est une diversification et une complexification mais, avant tout organisme complexe, il faut une solide reproduction de l'information. Tout découle de la **reproduction** qui ajoute à la chimie l'information, aussi bien dans la suite d'acides aminés des protéines que dans la suite des gènes de l'ADN combinant 4 bases : Adénine, Guanine, Cytosine, Thymine (ou Uracile pour l'ARN) désignés par leur initiale (AGCT). En fait on peut dire que la vie, ce n'est pas autre chose que la reproduction elle-même. C'est ce qui fait que dès qu'une chimie de la reproduction se met en route (autocatalyse de l'ARN), on quitte le domaine de la chimie pour celui de la "sélection darwinienne", c'est-à-dire de la sélection par le résultat, par rétroaction extérieure, par "causalité descendante" et non plus par causalité chimique : seul ce qui se reproduit le mieux continue à se reproduire, même s'il est très improbable au départ, à cause de son amplification ultérieure par la reproduction justement. L'évolution procède en effet par pression adaptative, mutation, sélection, et amplification (reproduction). Il faut d'ailleurs distinguer les mutations majeures, qui apportent de nouvelles fonctions et changent d'environnement, des mutations adaptatives qui vont suivre.

La vie (ou l'évolution) naît de la reproduction, quand la chimie est sous contrainte et n'est plus déterminante mais étroitement contrôlée par l'**information** qui émerge du processus par rétroaction après un temps plus ou moins long de reproduction et de sélection. On peut dire que l'information comme mémoire sélective résulte d'une optimisation de la réaction, et donc de la reproduction finale. Cette inversion de causalité est le coeur du darwinisme, toujours aussi difficile à comprendre pour le réductionnisme car le déterminisme devient extérieur. En effet, la causalité vient désormais de

l'environnement qui n'a de sens que pour un organisme vivant, c'est-à-dire fait pour durer et se reproduire dans un espace limité et un temps qui reste imprévisible. Dès lors, il vaut mieux dans le court terme ne pas occuper tout l'espace (être trop bien adapté) afin de garder ses capacités d'adaptation et de reproduction à plus long terme. Car le temps long est une dimension fondamentale de la vie et de son inversion de l'entropie au travers de toutes sortes de cataclysmes et d'extinctions de masse. Les phénomènes biologiques relèvent d'abord de la loi des grands nombres et de temps géologiques.

Comment peut-on décrire la vie d'une cellule de l'intérieur ? C'est essentiellement une production incessante, par l'ARN à partir de l'ADN, de protéines, molécules géantes se repliant en formes complexes et qui ont des fonctions catalytiques (enzymes), participant au métabolisme de la cellule (constitué du catabolisme destructeur et de l'anabolisme constructeur), notamment les divers cycles du cytoplasme qui maintiennent l'homéostasie (les cycles permettent de rétablir alternativement les excès et les manques de l'équilibre interne).

A la base de cette **énergie vitale**, il y a une horloge biologique dont le principe est très simple : Un gène produit une ou plusieurs protéines (PER/CRY) qui l'inhibe jusqu'à ce que la protéine se décompose réactivant le gène qui la produit à nouveau, etc. Le temps de décomposition de cette protéine est donc l'unité de base d'une horloge interne sur laquelle de nombreux processus vont se greffer, dans une programmation complexe des cycles biologiques. Ce n'est pas si différent d'un ordinateur dont la cadence d'horloge détermine le temps de traitement de l'information. L'énergie vitale de la cellule est catalytique, c'est une chaîne de réactions qui s'engendrent constamment. A ce sujet, il est intéressant de préciser que certains vers microscopiques ([tardigrades](#)) peuvent s'arrêter de vivre en séchant (cryptobiose), se conserver ainsi indéfiniment, puis reprendre vie avec un peu d'eau comme des graines !

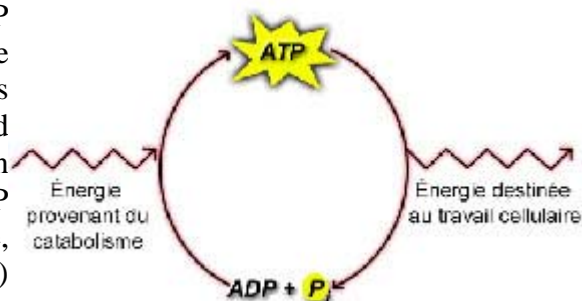


La fonction d'horloge de base, ou d'énergie vitale, pourrait d'ailleurs s'appliquer de façon plus pertinente encore au déplacement incessant de l'ARN-polymérase le long de l'ADN, effectuant la transcription de l'ARN-messager qui sera traduit ensuite en protéine dans le ribosome, s'il ne pouvait y avoir plusieurs ARN-polymérase décodant en même temps des parties différentes de l'ADN. L'intéressant ici, c'est la sélection des parties à transcrire, des commandes à effectuer, car c'est une toute petite partie de l'ADN qui sera lue à chaque fois, même si cela représente déjà des milliers de base. Ainsi chaque cellule de notre corps possède tout notre matériel génétique mais seule une partie des gènes est activée dans chacune, selon sa fonction, par des "facteurs d'expression", protéines produites par des gènes régulateurs (ou "supergènes"). Le mécanisme d'expression des gènes, découvert par Jacob et Monod, (Nobels 1965) ressemble au mécanisme d'horloge décrit plus haut dont le principe est significativement celui d'une levée d'**inhibition**. En effet, un "opéron" (gène opératoire) commence normalement par un code de départ, codon-start dit "promoteur" (le plus souvent, pour les eucaryotes, TATAAT, appelé TATA box, alternance de Thymine et Adénine, mais qui peut être parfois ATG entre autres). C'est l'équivalent

d'un X-on en informatique. L'opéron se termine aussi par une séquence terminale de 3 codons-stop (UAG, UAA et UGA), équivalent d'un X-off. Or, le code de départ se trouve la plupart du temps inhibé par un "répresseur" spécifique qui le rend illisible et s'applique sur un ensemble fonctionnel de gènes. Il faut que surgisse un "inducteur" venant se fixer sur le répresseur pour que celui-ci lâche prise et libère la lecture du codon-start, ce qui enclenche la production de la protéine codée par le gène concerné. L'inducteur, le plus souvent signal d'un déséquilibre à réduire, représente l'information circulante, une perception extérieure codifiée, une commande externe. L'opéron qui y répond est l'information

structure, l'organisation matérielle, la production de protéines en cascade, la procédure interne mémorisée.

L'énergie chimique est stockée sous forme d'ATP (adénosine triphosphate) qui fournit de l'énergie en se réduisant en ADP (adénosine diphosphate) grâce à des "transducteurs". Il faut souligner que l'ATP lorsqu'il perd 2 phosphates sur 3 n'est rien d'autre que l'Adénine et qu'on trouve aussi, bien que beaucoup moins, CTP, GTP et UTP basés sur les autres acides nucléiques. Dans la cellule, énergie et information sont donc reliés. L'énergie (ATP) précède l'information (Adénine) mais si l'information est inactive par elle-même, l'énergie est bien guidée par



l'information puisqu'elle est au service de la production de protéines. On peut dire qu'elle alimente les catalyses qui sont le véritable moteur, les protéines produites servant ensuite de "[pompes](#)" à travers la membrane de molécules spécifiques aussi bien que d'évacuation, voire de toxine contre un agresseur, assurant l'homéostasie interne, la défense et la reproduction de la cellule (méiose et mitose). Il doit être clair que ce qui organise la cellule, ce n'est pas la complexité des cascades de réactions chimiques, sélectionnées à la longue, mais bien la fonction, l'avantage reproductif (et ce n'est évidemment pas le gène qui se reproduit, hypothèse imbécile, mais la fonction qu'il permet avec l'introduction de cette protéine, sa justesse, son optimisation, la vérité qu'il dit sur le monde, une sorte de mémoire perceptive, de rémanence du vivant, de caractère acquis au cours de l'évolution, sélectionné par sa fonction, même si c'est bien par le gène que tout commence et qu'il y a des mutations neutres ou d'abord inutiles). "Un stade doit nécessairement arriver où la sélection des molécules ne se fonde plus sur ce qu'elles sont, mais sur ce qu'elles font" CdD p107.

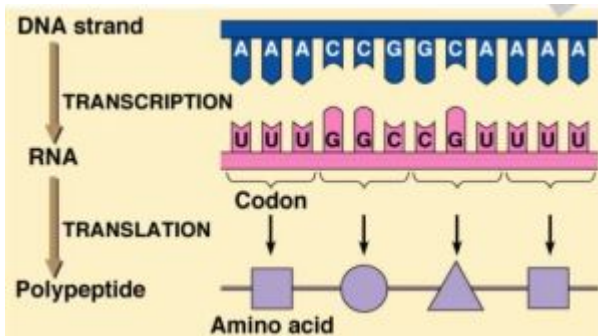
L'évolution renforce le rôle de l'information au fur et à mesure de ces reproductions et sélections qui ne mènent pas à l'uniformité mais à la complexification, la diversification, la différenciation pour faire face à l'imprévisibilité du monde. Le caractère de **totalité** du vivant (de clôture opérationnelle) va se renforcer dans le même mouvement, de la membrane cellulaire au noyau central, puis totalité sexuelle, totalité d'un organisme, totalité sociale, langage...



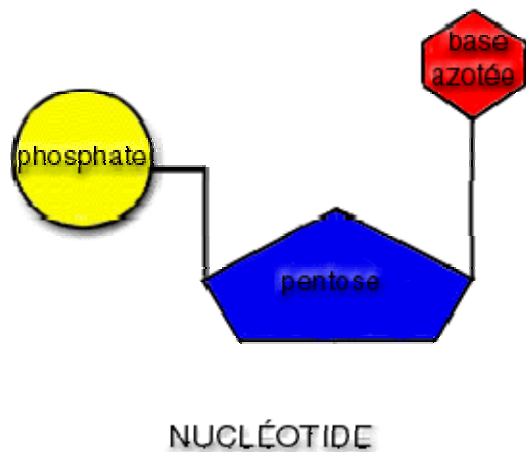
Il est remarquable que l'avantage reproductif de la **sexualité** n'ait absolument rien d'évident pour les spécialistes puisque le coût reproductif des mâles (qui n'enfantent pas) est la division par 2 de la fécondité à chaque génération ! On s'imagine que c'est le mélange des gènes qui expliquerait son succès adaptatif mais c'est contredit par le fait que les bactéries échangent souvent leurs gènes ("*c'est le voisinage écologique des partenaires qui favorise les échanges*" p44). Le véritable avantage me semble plutôt à chercher du côté de la communication qui doit s'élaborer entre sexes, sur la sélection qui s'opère par le choix du partenaire, du partage d'un code commun, d'une capacité de coopération et de réactivité commune à l'environnement, un début de solidarité de groupe et de normalisation. De plus la sexualité introduit un certain degré de divergence génétique (dimorphisme sexuel) permettant une division des fonctions et donc leur optimisation, véritable complémentarité.

La complémentarité

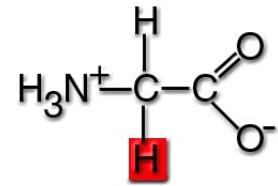
Le principe de base de l'information biochimique et de la reproduction, c'est la complémentarité, ce qu'on appelle l'**appariement** des bases qui permet la transcription de l'ADN à l'ARN puis la traduction de l'ARN en protéines (mais c'est aussi le principe des récepteurs des cellules avec les neuromédiateurs par exemple, sans parler de la sexualité) :



- Les **acides nucléiques**(ARN et ADN) se caractérisent par l'association d'un sucre (ribose pour l'ARN, désoxyribose pour l'ADN), d'un acide phosphorique et d'une base azotée. Ils se lient en longues chaînes. La transcription de ces longues chaînes se fait par un système de moule, ou de négatif plutôt puisque les codons seront traduits en anti-codons par l'ARN avant de servir à sélectionner les acides aminés dans les protéines ou recopier un brin d'ADN. L'ADN est une sorte d'ARN désactivé, très peu réactif et plus rigide, une mémoire inerte. L'ARN plus réactif et fragile, est devenu son messager. Tout ceci n'est possible qu'à disposer d'un nombre réduit de bases (A, G, C, T/U) pouvant se combiner 2 à 2 (A-U ou G-C) et constituant un code correspondant à des acides aminés, ce n'est pas rien. Ainsi un ARN porteur uniquement d'Uracile produit de la phenylalanine (Nirenberg, 1961). La complémentarité est aussi ce qui explique les deux brins d'ADN permettant une reproduction presque parfaite en assurant une redondance de l'information qui permet de contrôler sa validité (mécanisme de correction d'erreur). Le mécanisme de reproduction est si parfait qu'il produit un peu moins d'une erreur sur 1 milliard ! Cependant "*remarquons que cela fait encore une demi-douzaine d'erreurs chaque fois qu'une cellule humaine recopie son génome avant de se diviser*" CdD p54



- Les **acides aminés**, qui sont les briques élémentaires des protéines, présents dans la "soupe primitive" (Stanley Miller, 1953), se caractérisent par un groupement acide et un groupement amine, ainsi qu'un autre groupement différent pour les 20 acides aminés qui constituent l'alphabet utilisé par toutes les protéines dans les cellules vivantes (sous leur forme, on dit leur chiralité, tournée vers la gauche à l'exclusion de la droite tout aussi courante chimiquement, sans doute pour ne pas mélanger les formes). La liaison du groupement acide au groupement amine d'un autre acide aminé constitue une



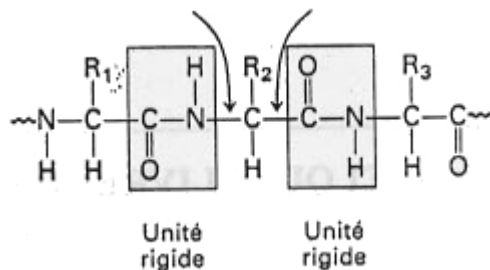
GLYCINE (Gly)



"liaison peptidique", principe d'assemblage de longues chaînes d'acides aminés (par les ribosomes, qui sont des ARN servant d'enzymes et qui ajoutent des séquences d'acides aminés aux protéines).

C'est ainsi que se forme une chaîne de polypeptides, de centaines ou milliers d'acides aminés, qu'on appelle une **protéine**, véritable machinerie biologique. En effet, l'interaction entre les liaisons peptidiques replie la protéine en hélice. L'interaction entre les différents radicaux lui donne une forme tridimensionnelle. Enfin l'interaction entre les différentes unités lui donne une conformation globulaire, spiralée, etc. On peut dire que c'est cette forme qui est codée dans une séquence de gènes et qui détermine ses propriétés (c'est une structure dynamique en mouvement, une véritable machine).

Chaque protéine "reconnaît" spécifiquement une ou plusieurs molécules selon un principe de complémentarité de type clé-serrure, grâce à des sites de reconnaissance et de fixation situés à sa surface. La biochimie, basée sur le carbone, est une chimie des formes, une chimie in-formée par l'ADN qui est la mémoire de la vie.



Liaison peptidique

La sainte trinité

Le vivant sait compter jusqu'à 3. Il n'y a pas que l'unité primordiale de la cellule et la complémentarité 2 à 2 dans la vie car on retrouve des structures ternaires à différents niveaux:

- L'assemblage des acides aminés se fait par groupes de 3, correspondant aux triplets de bases de l'ADN appelés **codons**. Si les bases sont des bits qui peuvent avoir des valeurs de 1 à 4, les codons sont des bytes (ou octets) constitués de 3 bases permettant de coder 64 acides aminés différents (même s'il n'y en a que 20 qui marchent et sont traduits par des ARN de transfert).

- Les protéines correspondent aux fonctions et caractéristiques d'une cellule, y compris sa reproduction. Elles font partie d'un système triple **ADN/ARN/protéines** où chaque partie dépend des autres. L'ADN contient l'information génétique de base (codons), l'ARN les traduit en protéines, les protéines assurent la reproduction et l'homéostasie de l'ensemble. On a donc séparation entre mémoire, lecture (commande) et fonction. L'ARN d'où vient la vie n'est plus que son médiateur qui se sert de moins réactif que lui (ADN) pour produire plus réactif que lui (protéine).

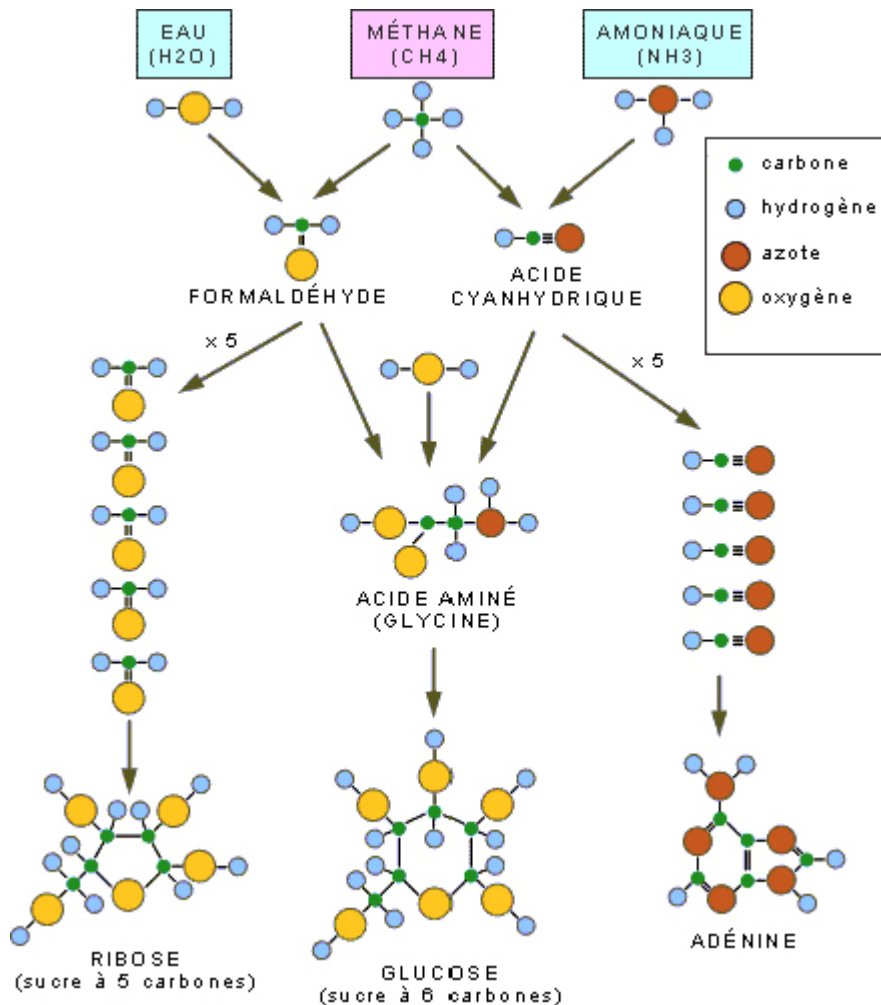
- Il y a aussi 3 sortes de **cellules** : bactéries, archéobactéries (ou archées) et cellules eucaryotes. Ici, on a sans doute d'abord 2 sortes d'ADN, puis une cellule qui réunit les deux en symbiose puisque le noyau de la cellule eucaryote serait à l'origine une archéobactérie intégrée dans une bactérie (ou le contraire, ou un virus).

- Il y a enfin 3 sortes d'**organismes** pluricellulaires. Pourquoi 3 ? Sans doute les champignons (levures, moisissures) sont une forme intermédiaire, proche des cellules animales (de la chair plus que de la cellulose), et qui vivent en parasite ou symbiose d'autres organismes leurs fournissant énergie et carbone. La division entre végétal et animal oppose plante "*autotrophe*", qui trouve son énergie directement dans la matière inanimée (photosynthétiques ou chimiosynthétiques), et l'animal *hétérotrophe* qui retire son énergie chimique d'autres matières organiques : tous les animaux sont des prédateurs, même les herbivores, et toutes les plantes sont des capteurs d'énergie. Les champignons sont au milieu, "*absorbotrophes*", plutôt du côté animal mais sans vouloir la mort de ceux qui les nourrissent, en parasites ou en symbiose (lichens), apportant minéraux et protection bactérienne à leurs hôtes. Leur rôle d'équilibre bactérien est sans doute ce qui leur procure un espace vital irremplaçable.

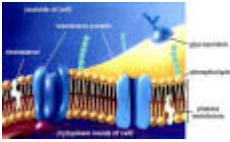
On voit que la vie incarne 4 sortes de **dialectiques** : celle qui de 3 fait 1, celle qui fait du tiers l'entre-deux, le médiateur, celle qui fait un troisième de la réunion des deux, enfin celle de la voie moyenne, du compromis. Le rôle du troisième n'est pas le même à chaque fois. Le premier est quelconque, partie d'un tout, le second est liaison active entre l'un et l'autre, le suivant intègre l'un dans l'autre, le dernier est composé, mélange, ni l'un, ni l'autre, au milieu. On occuperait ainsi tout l'espace des possibles ? Mais voyons comment ça c'est passé, du moins ce qu'on croit en savoir à ce jour.

La naissance de la vie (reconstitution)

L'ARN est une molécule déjà très complexe, qui n'a jamais été synthétisée en laboratoire sans enzymes. La plupart des chercheurs pensent aujourd'hui que l'apparition de la vie est antérieure à celle de l'ARN. *La Recherche*, p35



L'origine nous échappe toujours. Nous ne savons pas ce qui a précédé l'ARN, nous savons que la vie a commencé avec des molécules d'ARN autorépliquatives (Walter Gilbert 1986), peut-être elles-mêmes le produit d'une autre molécule autorépliquante (acides aminés "activés", soufrés, ou thioesters en chaînes peptidiques, qu'on trouve dans les cheminées hydrothermales sous-marines), mais ce serait encore un miracle que de l'ARN se forme spontanément, même si ce n'est pas tout-à-fait de l'ordre de l'impossible (à partir d'une réaction dite de formose qui consiste à polymériser les molécules de formaldéhyde en longue chaîne. D'autres hypothèses partent du [monoxyde d'azote](#)). En tout cas, il est certain que ce devait être au début des petits ARN (dits ARN interférents) constitués d'une vingtaine d'acides nucléiques seulement (quoique la capacité catalytique soit liée à la capacité de se plier de l'ARN qui doit donc être assez long pour cela). On peut considérer qu'à partir de là tout est joué, mais comment y parvenir sinon déjà par une reproduction sélective ? (Ce que [Antoine Danchin](#) appelle une chimie sélective, aboutissant selon lui à l'auto-réplication de ptéridine-phosphate ou autres peptides). Hélas, il n'est pas possible de remonter au-delà de la mémoire du vivant, fixée dans l'ARN jusqu'à nos jours. En tout cas, ce qu'il faut au début de la vie, c'est l'emballage d'un mécanisme de reproduction chimique plus simple et d'abord sans mémoire, véritable réaction en chaîne qui dure encore. On ne peut dire qu'on sait vraiment ce qui a mis en mouvement ce monde de la vie, pas plus d'ailleurs qu'on ne connaît la cause du Big Bang à l'origine de notre univers. Pas de quoi donner à quelque dieu ce petit rôle de *starter* (de premier moteur d'Aristote qui enclenche le mouvement) mais il faut reconnaître que la cause première reste hors de notre portée, l'étincelle initiale (il y en a eu d'innombrables sans doute).



La reproduction et la sélection de l'ARN autocatalytique a peut-être déjà commencé à constituer un proto-métabolisme dans les pores de l'argile. La prochaine étape qui tient encore du miracle, c'est la constitution d'une **membrane**, du moins son intégration au matériel génétique porté par l'ARN. Bien sûr les membranes n'ont rien de mystérieux. Ce sont des molécules phospho-lipidiques (acides gras) dont un côté est hydrophile et l'autre hydrophobe, ce sont des petites bulles huileuses comme il y en a tant, mais on ne sait comment ça s'est produit. Il est possible que les membranes lipidiques aient été précédées de membranes protéinoïdes qui se produisent quand on chauffe des acides aminés. Selon Christian de Duve il n'est pas nécessaire que la membrane soit intégrée au code génétique car toute membrane vient d'une membrane et peut donc avoir une vie autonome. Remarquons qu'il n'est pas impossible que proto-métabolisme et membrane soient antérieurs à l'ARN, et même que tout ait commencé par la reproduction de membranes (c'est l'hypothèse d'Antoine Danchin mais semble contredit par le fait que bactéries et archéobactéries n'ont pas les mêmes membranes).

Le rassemblement de tout le matériel génétique en **chromosomes** rassemblant les ARN codants et représentant des centaines de gènes paraît moins extraordinaire, dicté par l'efficacité reproductive (ainsi notre ADN est constitué de 23 paires de chromosomes qui s'assemblent au moment de la méiose avant de se séparer en 2 brins distincts pour se reproduire. La surprise a été de constater que nous avons moins de 32 000 gènes, peut-être même seulement 25 000, mais, par exemple, le chromosome X a 931 gènes ce qui fait déjà 154 millions de paires de base!). Ce qui est sans doute trompeur car les mammifères ont une codification plus compacte que les autres vivants, saut évolutif bien plus tardif.

Là où les mammifères se différencient du reste des organismes, c'est dans le recours plus fréquent à l'épissage alternatif : en fonction de l'environnement cellulaire, ils fabriquent différentes combinaisons d'exons [parties codantes d'un gène séparées par des "introns" non codants qui sont éliminés] En moyenne, un gène donne naissance ainsi à 3 ARN différents. Mais certains gènes tels que le gène de la neurexine [protéines récepteurs des neurones], peuvent donner 2000 ARN distincts!

[...]

On découvre que le nombre de partenaires impliqués dans la régulation d'un gène pourrait être nettement plus important que ce que l'on pensait. Il est possible que cela explique une partie de la complexité des organismes supérieurs. Le concept de réseau au sein du génome, reposant sur de multiples boucles de rétroaction positives et négatives, réapparaît.

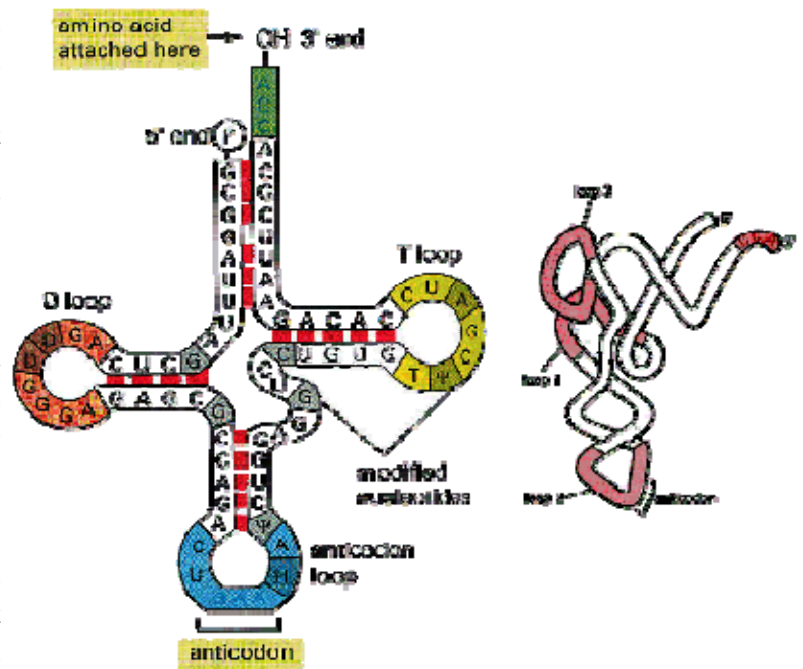
[...]

Il y a aussi toute une panoplie d'ARN non codants [ne fabriquant pas de protéines]. Ce qui est surprenant, c'est que ces derniers sont codés par des régions situées "entre" les gènes, zones que l'on pensait non transcrites jusqu'à présent. Par ailleurs, on a découvert que certains ARN non codants étaient produits par des gènes codant aussi des protéines. Notre ignorance à leur sujet est quasi complète.

[...]

Avec une redéfinition du gène, il pourrait donc y avoir des dizaines de milliers de gènes supplémentaires [actuellement autour de 25000]. La Recherche, octobre 2005

Le stade suivant de production de **protéines** à partir de l'ARN ne présente pas beaucoup de mystère non plus puisque c'est ainsi que les protéines sont formés dans les **ribosomes** des cellules, par des ribozymes qui sont des ARN enzymes (les ribosomes sont des ribozymes!). Comment c'est arrivé ? C'est une autre histoire ! Il est possible que ce soit venu petit à petit, en attachant des acides aminés au bout d'un ARN devenu ainsi plus réactif (sur le modèle des ARN de transfert ci-contre, assurant la traduction anticodons-acides aminés). En tout cas, avec les protéines ce sont les fonctions de la cellule qui se multiplient, ses capacités de réaction et de communication, l'étendue de son vocabulaire, puisqu'on passe de 4 bases



à 20 acides aminés. On peut parler désormais d'un véritable métabolisme et d'un saut de complexité avec ce qui est sans doute l'ancêtre commun de toute cellule (appelé LUCA, *Last Universal Common Ancestor*). Actuellement on pense que le nombre minimum nécessaire pour un métabolisme complet serait de l'ordre de 300 protéines (gènes). [En fait l'hypothèse d'un ancêtre commun à ce niveau me semble absurde car il faudrait que cette cellule évolue très longtemps sans se diviser. Il est plus probable qu'il y a eu une population de départ avec échanges de gènes et sélection tardive d'une structure très optimisée]

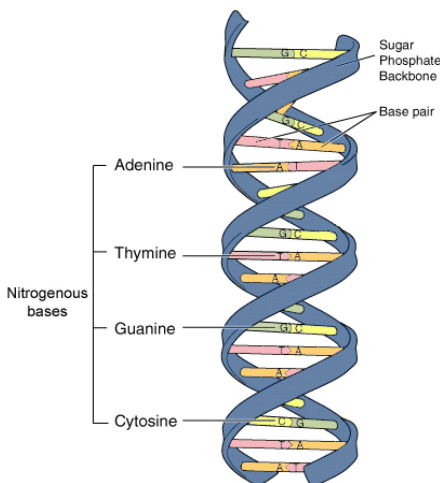
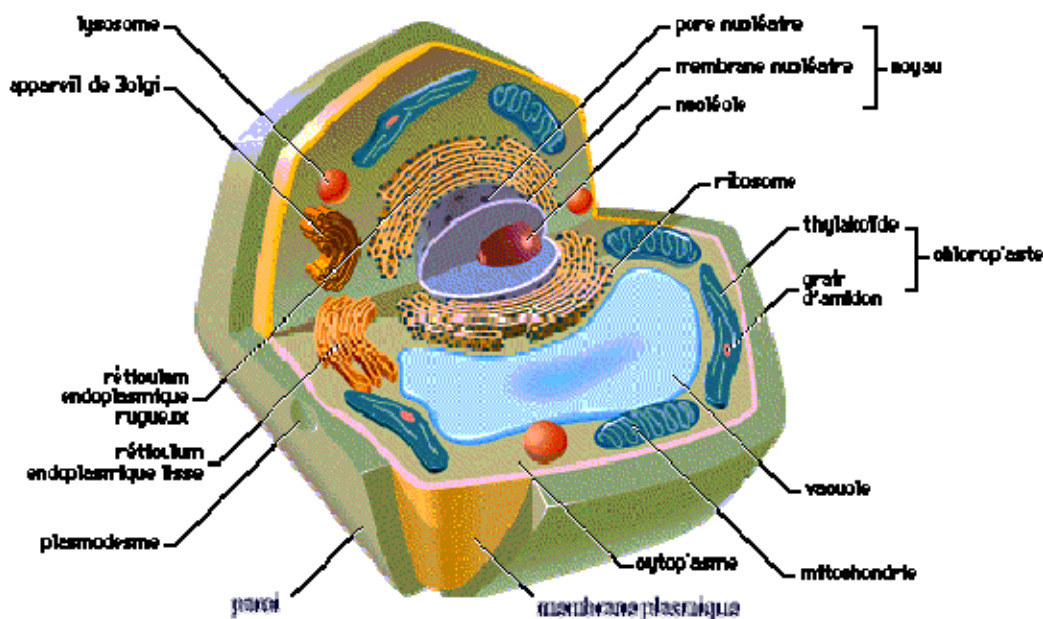


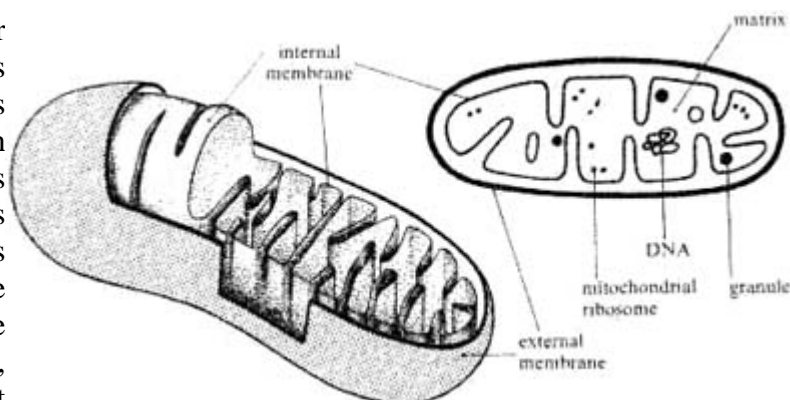
Image adapted from: National Human Genome Research Institute.

A partir de là, la formation de l'ADN par les protéines semble moins difficile qu'on pourrait le croire sous prétexte qu'il s'est imposé universellement après. Il suffit que des protéines ou un rétro-virus aient transformé le ribose de l'ARN en désoxyribose, ensuite la rigidité de l'ADN, sa stabilité et son caractère inerte, lui ont donné un avantage reproductif décisif, séparant la mémoire génétique de la catalyse elle-même, ce que renforcera le noyau dans un deuxième temps. Il est possible, voire probable, que l'ADN soit apparu d'abord chez les virus (selon Patrick Forterre, p39) mais ce n'est pas un événement tellement improbable puisqu'il s'est peut-être produit deux fois à peu près à la même époque, de façon différenciée chez les bactéries et les archéobactéries (ou **archées**, bactéries des milieux extrêmes, thermophiles, fonds marins, 10 fois plus petites que les bactéries et sans doute plus originaires). L'apparition de l'ADN en stabilisant le génome, puis en substituant la thymine à l'uracile, ce qui permettra d'éliminer une des sources d'erreur les plus courantes (la dérive de cytosine en uracile), va diminuer brutalement la vitesse d'évolution des protéines en améliorant considérablement la fiabilité de la reproduction. C'est ce que Carl Woese appelle la "cristallisation génétique". On passe dès lors dans un tout autre régime.

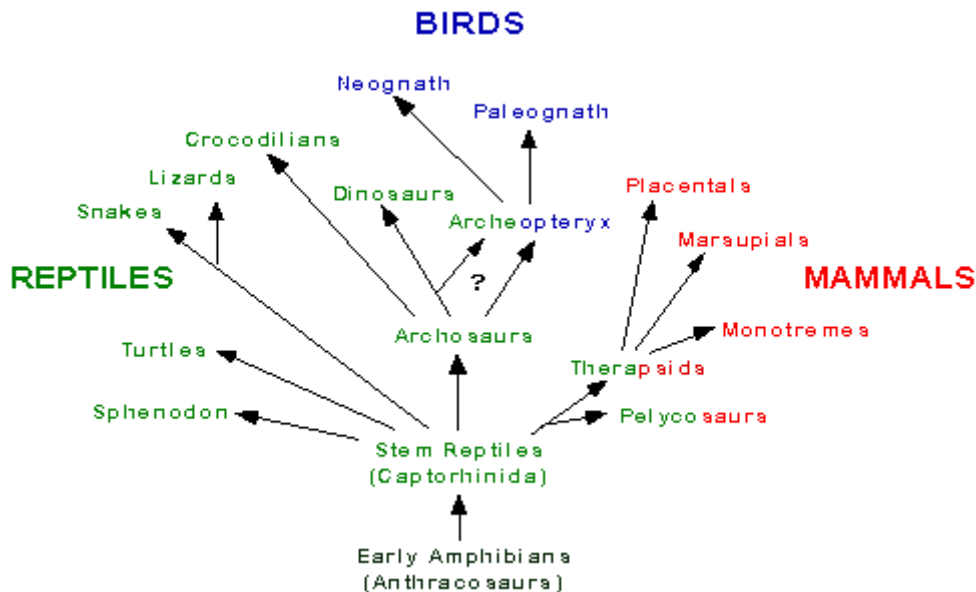


Le stade suivant, au moins vers 1,8 milliards d'années si on en croit les traces de stéroïdes qui en témoignent, c'est le passage des bactéries "procaryotes" (sans noyaux où l'ADN est libre) aux cellules "eucaryotes" (avec noyaux). Ce n'est pas une mince affaire, même si on peut penser que c'est le résultat d'une phagocytose d'une archéobactérie par une bactérie (ou le contraire), puis de leur symbiose, car on retrouve dans le noyau des gènes reproducteurs appartenant aux archéobactéries tandis que les gènes opérationnels du cytoplasme sont d'origine bactérienne. L'accroissement de complexité est inimaginable dans ces cellules au moins dix mille fois plus grosses que des bactéries et dont nous sommes faits. C'est sans doute une conséquence de la constitution d'un noyau, d'une nouvelle amélioration de la fiabilité de reproduction et de la division des tâches, plutôt qu'une condition préalable. La reproduction de la cellule passe d'ailleurs sous le contrôle de gènes régulateurs qui peuvent la bloquer et devient beaucoup moins rapide que pour les bactéries. Une reproduction fiabilisée jointe à une plus grande complexité va empêcher l'optimisation du génome eucaryote, encombré comme un vieux programme informatique de vestiges inactifs depuis longtemps ("introns", appelés aussi "ADN poubelle" mais qui pourrait avoir un rôle dans la conformation spatiale de l'ADN, voir *Pour la Science*, no334, août 2005). Cela va renforcer aussi le rôle des virus dans les mutations génétiques et favoriser sans doute l'apparition de la reproduction sexuée (vers 900 millions d'années?). Un des avantages décisifs des cellules à noyau sur les bactéries c'est leur mécanisme de digestion interne (lysosomes) alors que les bactéries déversent leurs enzymes à l'extérieur pour se nourrir. Une autre différence essentielle, c'est la bien plus grande capacité de communication avec l'extérieur à travers la membrane (récepteurs), condition de la formation d'organismes pluricellulaires.

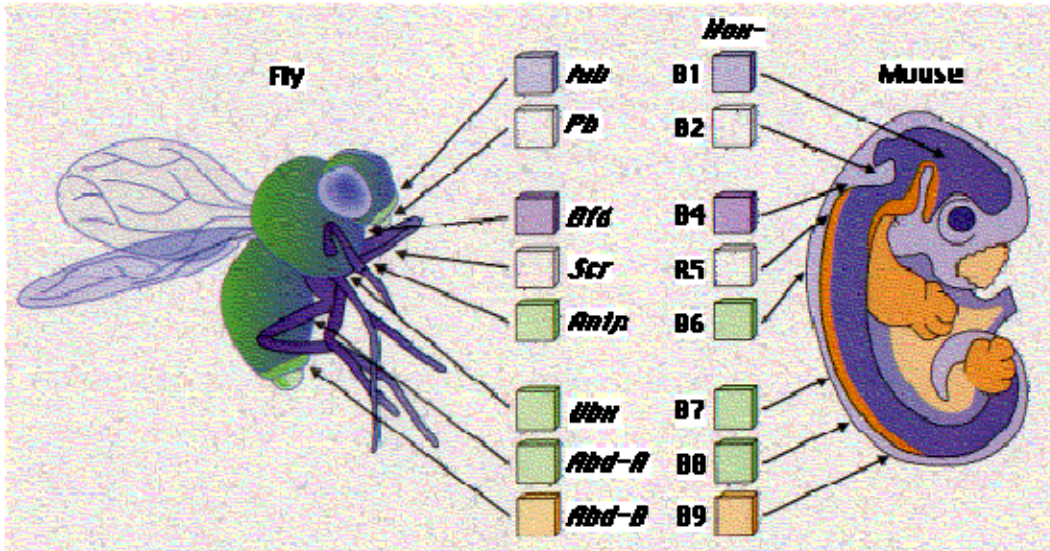
Les eucaryotes vont intégrer ensuite (au moins vers 800 millions d'années) des [mitochondries](#), bactéries symbiotiques transformant l'**oxygène** en énergie (comburent du glucose et des acides gras), ce qui est devenu à la fois possible et nécessaire lorsque les cyanobactéries ont commencé à produire de l'oxygène. L'oxygène, sous-produit de la vie (à partir de 2,2 milliards d'années), a été d'abord un terrible poison décimant la plupart des cellules qui étaient toutes forcément "anaérobies" au départ puisque nées dans un monde sans oxygène. L'oxygène nous est devenu vital et nous protège des radiations grâce à la couche d'ozone



qu'il produit mais il est toujours agressif et on sait bien que nous avons besoin de notre dose quotidienne d'[anti-oxydants](#). Cette fonction de protection de l'oxygène a d'abord été assurée par les peroxysomes. Une lignée d'eucaryotes intégrera aussi des [cyanobactéries](#) qui donneront les [chloroplastes](#) permettant de capter l'énergie solaire pour fixer le carbone, et donnant naissance ainsi au royaume végétal qui entretient toujours la production d'oxygène pour les animaux qui le respirent, et produisent en retour du gaz carbonique respiré par les plantes. Il faut souligner que la séparation des fonctions de production d'énergie, prises en charge par les mitochondries, permet d'en centraliser la régulation (par le NO) et, surtout, libère les échanges électriques à travers la membrane à des fins de signalisation cellulaire (permettant une cohésion d'ensemble).



A partir de là, on peut dire que l'évolution suit son cours, les organismes coulent de source jusqu'aux [origines de l'homme](#), passant d'un seuil de complexité au suivant. Le passage aux **organismes** pluricellulaires est inévitable puisqu'il a eu lieu trois fois de façon indépendante avec les animaux (700 millions), les végétaux (500 millions) et les champignons (600 millions?). D'après [Ameisen](#), ce qui fait corps c'est un "module de dépendance" associant toxine et protection. On peut penser que c'est plutôt l'origine commune et la spécialisation des organes qui crée un code commun (hormones régulatrices), une unité de réaction (système immunitaire), un système vivant traversé par une même information à laquelle on répond d'un seul coeur. En effet, contrairement aux colonies de bactéries, les organismes pluricellulaires se constituent à partir d'une seule cellule eucaryote (oeuf) et partagent le même code génétique, condition de la spécialisation des organes qui n'en expriment qu'une partie grâce à un rôle renforcé des gènes régulateurs. Nous avons donc un certain degré de communauté avec toute forme de vie puisque nous descendons finalement d'un ancêtre commun et d'une cellule unique.

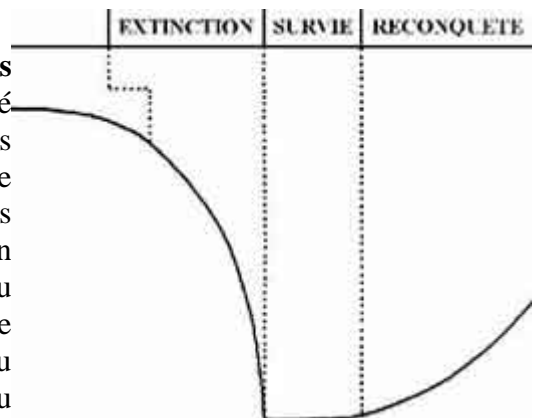


Correspondance entre les gènes Hox de la mouche et de la souris

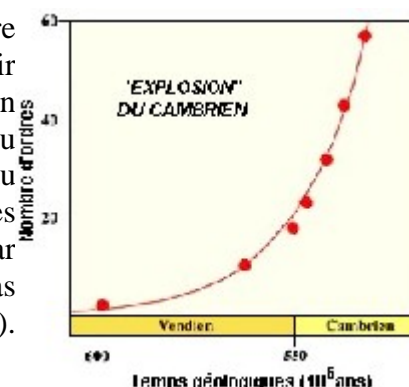


En tout cas, ce qui sera décisif c'est l'émergence des organismes, d'abord indifférenciés (tribolites, méduses, éponges) puis organisés par les **gènes Hox** (sans doute à partir d'un ver marin annelé et bilatéralisé comme le Néréis de la photo, si cela ne remonte pas au minuscule [vernanimalcula](#)) séparant les parties du corps (tête, yeux, système nerveux, pattes, tube digestif, pompe circulatoire) et donnant naissance d'abord aux arthropodes (crustacés, araignées, insectes). Nous partageons ces "gènes architectes" (ou *homéotiques*) avec la mouche par exemple (et une seule mutation d'un de ces gènes suffit pour que des pattes poussent sur sa [tête!](#)). C'est cette nouvelle structure qui produira l'explosion du cambrien, après des épreuves répétées (Terre gelée, réchauffement, retour glaciations) et la multiplication des prédateurs (dans une dialectique prédation/stratégies de défenses), inaugurant le paléozoïque il y a 542 millions d'années, bien avant la colonisation de la Terre par les araignées et scorpions vers 410 millions d'années, suivis par les amphibiens.

Il ne restera plus ensuite, à travers une série d'**extinctions** (440, 365, 250, 145, 65 millions d'année), dont la pire aura été celle du permien (250 millions), qu'à développer les neurones (liés au mouvement animal et à la prédation) pour optimiser le traitement de l'information et constituer des individus capables d'apprendre, adaptables et sociaux, permettant d'aboutir enfin à l'espèce humaine et au langage qui sont bien le dessus du panier de l'évolution, quoiqu'on dise, car cela ne pouvait guère venir beaucoup plus tôt. Chaque pas compte et prend du temps. Les extinctions de masse constituent un accélérateur au moins, un nouveau départ qui fait place nette, remettant toutes les espèces à égalité dans la compétition de l'espace. Car le reste du temps, il y a rarement compétition des espèces et encore moins de colonisation d'espaces vierges. Beaucoup plus souvent, on a un équilibre des populations prédateurs/proies relativement régulé et ne laissant aucune place à de nouveaux entrants (le prédateur protégeant son territoire des autres prédateurs et des autres espèces. Les prédateurs sont des marqueurs de la stabilité écologique car ils ont besoin de la stabilité des proies. La stabilité écologique est la condition du prédateur qui la renforce).



C'est sans doute après l'explosion du **Cambrien** où ils étaient encore anarchiques que les rapports prédateurs/proies ont fini par devenir régulés (par les couleurs notamment, mais surtout par la défense d'un territoire), stabilisant l'évolution et figeant les plans d'organisation du vivant (macroévolution et biodisparité étaient achevées à la fin du Cambrien). En effet, on peut penser que les prédateurs sans limites (comme les humains peuvent l'être) ont fini par être éliminés par manque de proies. Là aussi, avec le temps, l'information a pris le pas sur la force pure (comme l'élevage a pris le pas sur la chasse).



Ce sont seulement les extinctions qui isolent d'abord, et font dériver génétiquement, puis mettent en **concurrence** l'adaptabilité des organismes, ce qui permet l'émergence de la complexification après chaque catastrophe. Ainsi après les amphibiens, le Carbonifère sera à partir de 360 millions d'années, la période des reptiles et des fougères. Ensuite, les premiers dinosaures apparaissent vers 280 millions d'années mais ne s'épanouiront qu'après le désastre du permien, par leur adaptation au manque d'oxygène, ne laissant place aux mammifères qu'après leur quasi disparition à la fin du Crétacé (et du secondaire), il y a 65 millions d'années.



A chaque seuil de complexité franchi, le temps se ralentit et notamment avec l'organisme animal, "le champ des mutations efficaces va se rétrécissant de plus en plus [...] A partir d'une certaine complexité, les mutations efficaces sont presque exclusivement celles qui affectent des gènes qui règlent la transcription d'autres gènes" p25. Les **mutations** génétiques sont donc de plus en plus pathogènes et néfastes (cancers). On peut juste espérer par ce biais accélérer ou ralentir, augmenter ou réduire, changer de place, guère plus. Et encore, à condition d'avoir une isolation des populations pendant un certain temps. L'évolution naturelle est en bout de course, passant le relais à l'apprentissage et aux progrès de la technique. Nous en sommes

là ! Ce n'est pourtant pas le dernier mot de l'histoire de la vie dont nous essayons bien imprudemment de prendre les commandes (il n'y a pas que les OGM et le clonage. On crée des ADN avec de nouvelles bases, certains espèrent créer des formes de vie artificielles...). Ce n'est d'ailleurs que la suite d'une évolution humaine accélérée par une [sélection culturelle](#) proche de la création artificielle de races animales. "L'univers c'est de la pensée qui émerge de la vie, qui elle-même émerge de la matière dite inerte" Christian de Duve, *La Recherche*, p26.

Complexité, Emergence et Explication

Par **Hervé ZWIRN**

Directeur de Recherche Associé au CNRS (CMLA à l'ENS de Cachan et IHPST)
Président de la société Eurobios, spécialisée dans l'application des sciences de la complexité
au monde des affaires.

Les sciences de la complexité ont pour objet l'étude et la prédiction du comportement des systèmes composés d'un grand nombre de constituants en interaction. Ces systèmes, dits "complexes" sont omniprésents. C'est bien sûr en biologie qu'on en rencontre le plus fréquemment. Ainsi, une cellule vivante, le cerveau, le système immunitaire, le système génétique sont des systèmes complexes. Mais un réseau aimanté, une galaxie, un marché financier, une colonie de fourmis et même Internet en sont également. John von Neumann, le père de l'ordinateur, avait prédit à juste titre qu'elles seraient les sciences du 21^e siècle.

Pourquoi les systèmes complexes sont-ils difficiles à prédire ? C'est ce que nous allons essayer de comprendre. Disons tout de suite qu'une des raisons de cette difficulté provient du fait que certaines de leurs propriétés globales, bien que résultant des interactions de leurs constituants, semblent inattendues et impossibles à prévoir à partir de la connaissance qu'on peut avoir du comportement de ces constituants. Ces propriétés globales sont qualifiées d'émergentes. Au-delà d'une intuition simple, définir correctement ce qu'on entend par là n'est pas trivial car le concept d'émergence, bien qu'il ne soit pas nouveau, peut se comprendre dans des sens plus ou moins forts et plus ou moins objectifs.

Les premiers émergentistes¹

Au siècle dernier, John Stuart Mill, Alexander Bain et George Henry Lewes furent les premiers à s'intéresser à la différence entre effets résultants et effets émergents dans le cas où plusieurs causes se combinent. Mill introduisit ainsi la distinction entre les effets *homopathiques* qui se réduisent à la somme des effets de chacune de leurs causes et les effets *hétéropathiques* pour lesquels une telle réduction est impossible. Lewes semble être le premier à avoir introduit le terme *émergent*. Selon lui, alors que tout effet est bien la résultante de ses facteurs, il n'est pas toujours possible de suivre les étapes du processus qui permet de retrouver dans le produit des facteurs, le mode d'opération de chacun d'entre eux. C'est ce dernier type d'effets, hétéropathiques au sens de Mill, qu'il propose d'appeler émergents. Il ajoute que ce qui émerge n'est pas comparable aux constituants qui lui ont donné naissance car ce n'est réductible ni à leur somme ni à leur différence. On doit peut-être voir là le premier énoncé de la phrase (galvaudée par la suite) "le tout est plus que la somme de ses parties". Au début des années vingt, Samuel Alexander et Lloyd Morgan utilisèrent cette distinction pour bâtir une théorie connue sous le nom d'"évolutionnisme émergent" selon laquelle l'univers se développe à partir de ses éléments de base en faisant apparaître des configurations de plus en plus complexes. Lors de cette croissance et lorsque la complexité franchit certains seuils, des propriétés réellement nouvelles émergent et ce processus conduit à des niveaux d'organisation hiérarchiques successifs. Selon Alexander, quatre niveaux principaux sont à distinguer dans l'évolution de l'univers : tout d'abord l'apparition de la matière à partir de l'espace-temps, puis l'émergence de la vie à partir des configurations complexes de la matière, puis celle de la conscience à partir des processus biologiques et enfin, l'émergence du divin à partir de la conscience. A la même époque (1925), C.D. Broad utilisa le concept d'émergence comme moyen de sortir du débat entre vitalistes et mécanistes. La thèse mécaniste prétend que la vie et les phénomènes biologiques peuvent être expliqués entièrement par les lois de la nature appliquées aux seules entités matérielles. La thèse vitaliste, elle, postule l'existence de certaines entités non matérielles comme l'"élan vital" ou l'"entéléchie" qui seraient présentes dans les

¹ Emergence or Reduction, A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim éditeurs, de Gruyter (1992).

organismes vivants et absentes dans les objets inanimés. Broad proposa comme issue au conflit une théorie émergentiste, intermédiaire entre vitalisme et mécanisme, qui repose comme la théorie mécaniste sur le fait que les phénomènes de la vie proviennent uniquement d'entités purement matérielles mais qui suppose de plus, que le comportement de certains ensembles de constituants (ceux par exemple qui sont des systèmes vivants) ne puisse, même en principe, être déduit de la connaissance du comportement de leurs constituants. Ceci permet d'adopter une position selon laquelle d'une part, rien d'autre que des entités matérielles n'existe dans les êtres vivants et d'autre part, la connaissance des lois de la nature et du comportement de chacun des constituants d'un système biologique ne permet en aucun cas de prédire a priori que le système global est vivant.

Ce qu'il faut retenir des positions émergentistes de cette époque est la caractéristique suivante du concept d'émergence sur lequel elles reposent et qui a été précisément décrit par Broad. Une loi L (ou une propriété P) émergente à un certain niveau A est :

- 1) entièrement due à la configuration adoptée par les constituants de niveau inférieur B
- 2) totalement irréductible en ce sens qu'il serait impossible, même avec la connaissance complète des propriétés des constituants du niveau inférieur B et des capacités de calcul infinie, de prédire que le niveau A obéit à la loi L ou (possède la propriété P).

Ce qui émerge est donc à la fois totalement dû au niveau inférieur et nouveau par rapport à celui-ci.

Ce matérialisme non réductionniste peut se comprendre lorsqu'on se replace dans le contexte scientifique de l'époque. La mécanique quantique n'était pas encore née et l'énigme des liaisons chimiques embarrassait tous les scientifiques. Aucune explication cohérente des raisons pour lesquelles certains éléments se liaient à d'autres en donnant de nouveaux éléments aux propriétés totalement différentes de leurs constituants n'était disponible. Il était donc tentant de postuler que certains arrangements, certaines configurations, donnaient naissance à de nouvelles forces fondamentales donc à de nouvelles lois, qui n'étaient en rien réductibles aux lois connues. J'appellerai cette thèse, la thèse émergentiste forte. L'avènement de la mécanique quantique et les explications qu'elle fournit quant à la nature des liaisons chimiques ont rendu la thèse émergentiste forte à la fois inutile et peu probable, même si l'énigme des relations entre les états mentaux et leur substrat matériel a aujourd'hui pris la place de celle des liaisons chimiques. La possibilité, récente grâce à la puissance accrue des ordinateurs, de calculer ab initio les propriétés d'une molécule à partir de ses constituants est un démenti clair apporté aux tenants de l'irréductibilité de la chimie à la physique. Plus personne aujourd'hui ne défend réellement l'idée selon laquelle il existe des lois ou des forces qui sont dues aux configurations adoptées par les constituants d'un système et qui sont non réductibles aux lois de la physique standard. Ce qui reste de la notion d'émergence est donc une version faible selon laquelle une propriété ou un processus sont émergents à un niveau donné d'un système physique si, bien que réductibles en principe aux propriétés des constituants de niveau inférieur, il semble impossible de prédire leur survenance a priori à partir de la connaissance, même complète, de ces propriétés. Cette exigence n'est évidemment pas sans poser de nombreux problèmes, comme celui de savoir ce qu'on entend précisément par prédire.

Le renouveau du débat

Le débat autour de l'émergence a connu un renouveau ces dernières années en raison de plusieurs avancées importantes à la fois sur le plan conceptuel et sur le plan pratique. L'étude des systèmes non linéaires (qui a été popularisée sous le nom de chaos déterministe) a tout d'abord montré l'importance des phénomènes d'auto organisation. Ceux-ci se manifestent par exemple dans de nombreux systèmes chimiques dont l'évolution à partir d'un état initial homogène fait apparaître spontanément des motifs ordonnés ou des oscillations. C'est le cas de la célèbre réaction de Belousov-Zhabotinsky dans laquelle la couleur de la solution passe périodiquement du rouge au bleu. Alors que la plupart des réactions chimiques évoluent de manière monotone, on est là en présence d'une oscillation interdite par la thermodynamique linéaire qui ne se comprend que grâce au fait que les équations modélisant la

réaction sont non linéaires. On a aussi découvert le fait qu'un comportement complexe n'est pas obligatoirement dû à des règles qui le sont. Un exemple frappant de cela est donné par les automates cellulaires² dont les règles extrêmement simples peuvent engendrer des comportements qui défient toute tentative de prédiction a priori, voire semblent totalement aléatoires (voir l'article sur les automates cellulaires). C'est l'augmentation considérable de la puissance des ordinateurs qui a permis d'explorer leur comportement ainsi que celui de nombreux systèmes qui autrement seraient restés hors de portée. Lorsqu'un système n'est pas complexe, son comportement résulte d'une manière plus ou moins simple du comportement de ses parties (voir encadré 1). Lorsque le système est complexe une telle décomposition est impossible. Il en résulte que la prédiction du comportement devient plus problématique. Bien entendu, cela ne veut pas dire obligatoirement qu'elle est impossible à partir de méthodes analytiques mais elle passe alors par des équations non linéaires qui souvent n'ont pas de solutions analytiques exactes. Devant une telle situation, simuler le comportement des constituants du système et de leurs interactions sur un ordinateur est la meilleure méthode pour déterminer quel sera le comportement global du système. C'est ce qu'on appelle la simulation à base d'agents, un agent pouvant être aussi bien une particule élémentaire n'ayant que des interactions simples avec les autres particules, qu'un individu conscient ayant lui-même un comportement sophistiqué (voir encadré 2). Lorsqu'on simule un système complexe, il devient clair que le comportement global d'un ensemble de constituants peut à la fois résulter directement du comportement simple de chacune de ses parties et être néanmoins différent de ce qu'on aurait pu intuitivement anticiper de la connaissance de ces constituants. Le concept de phénomène émergent a donc perdu l'aspect quelque peu "magique" qu'il pouvait avoir dans la conception de Broad, pour qualifier aujourd'hui un phénomène qui se manifeste à un niveau global et qu'il semble difficile de réduire de manière évidente aux propriétés des constituants qui lui donnent naissance. Ce glissement de sens a été grandement facilité par la possibilité de simuler sur ordinateur le comportement des systèmes étudiés.

Emergence objective ou subjective ?

Tel que nous l'avons défini, le concept d'émergence semble donc reposer sur la difficulté que nous éprouvons à relier intuitivement ce que nous observons au niveau global aux lois qui régissent le niveau des constituants. L'émergence serait donc une propriété dépendant de nos capacités intellectuelles humaines. Pour éviter cette conclusion, certaines définitions objectives de l'émergence ont été proposées. Il est devenu courant de distinguer deux types d'émergence : l'émergence synchronique et l'émergence diachronique. L'émergence synchronique fait référence à l'identification à un instant donné d'une structure ou d'une propriété, présente dans le système à un certain niveau et absente ou non pertinente aux niveaux inférieurs. D'une certaine manière, la reconnaissance d'un visage dans un tableau pointilliste, invisible tant que l'on est trop près mais qui apparaît lorsqu'on se met à la bonne distance est un bon exemple d'émergence synchronique. La reconnaissance de la structure fractale des côtes qui ne se manifeste qu'à partir d'une certaine hauteur d'observation, mais aussi les états mentaux qui émergent du fonctionnement des neurones sont d'autres exemples classiques. L'émergence synchronique a été associée par certains à une baisse soudaine de la complexité algorithmique (voir l'article de Jean-Paul Delahaye) descriptionnelle du système. Cette définition repose sur le fait que l'identification d'une structure au niveau global permet de donner une description du système beaucoup plus concise que celle qui consisterait à décrire individuellement chaque constituant. L'émergence diachronique concerne elle, le comportement dynamique du système. La succession des états d'un automate cellulaire, les oscillations de certaines réactions chimiques, la création d'anneaux autour de Saturne en sont des exemples. L'émergence diachronique est souvent définie de la manière suivante : étant donné un système qui évolue dans le temps, on qualifiera son comportement d'émergent si et seulement si le seul moyen de prédire son évolution est de simuler le fonctionnement du système. L'idée de base est qu'il n'y a aucun moyen plus rapide que d'observer le système lui-même (à travers une simulation sur ordinateur) pour savoir comment il va se comporter. C'est ainsi que Wolfram a avancé l'idée selon laquelle la succession des états de certains automates

² A New Kind of Science, S. Wolfram, Wolfram media (2002).

cellulaires ne pourrait être prédite qu'en simulant leur fonctionnement. En d'autres termes, il n'y aurait aucun raccourci permettant de connaître directement l'état de l'automate à la millième itération. Prédire cet état exigerait de passer au préalable par les 999 étapes précédentes. Wolfram ne prouve cependant aucunement ce qu'il avance et cette définition demande de toute façon à être rendue rigoureuse, ce qui pose un certain nombre de difficultés non triviales. Mais, en première approximation, on peut conserver l'intuition sur laquelle elle repose et qui peut être formulée de manière objective.

Compréhension

Qu'en est-il de la compréhension des phénomènes émergents ? La notion de compréhension n'est pas simple et nécessiterait à elle seule de longs développements mais il semble que les deux éléments suivants y jouent un rôle important. On dit qu'on a compris un phénomène lorsque : 1) on a identifié les règles qui l'engendrent 2) on peut suivre mentalement les étapes qui, d'un état initial connu aboutissent à l'apparition du phénomène ou de l'état final à expliquer. Si l'application répétée des règles simples d'un automate cellulaire me montre à l'évidence que tel pattern va apparaître (par exemple une alternance de cases noires et blanches), je dirai que je comprends le comportement de cet automate et qu'il n'est pas émergent. Si en revanche l'application répétée des règles n'est pas possible mentalement (par exemple pour l'automate obéissant à la règle 101) alors, je qualifierai le comportement d'émergent et je ne le comprendrai pas. A la réflexion cependant, il semble que les deux situations diffèrent seulement par une question de degré et ne soient pas réellement de nature différente. "Comprendre", c'est en partie être capable d'enchaîner mentalement les étapes d'un processus menant d'un état initial à un état final. Lorsque ces étapes sont trop nombreuses ou trop intriquées pour que cela soit possible, il faut recourir à la simulation sur un ordinateur et la sensation de compréhension s'évanouit. On peut donc défendre l'idée que la compréhension est en partie la possibilité d'une simulation mentale. On pourrait alors faire la distinction entre deux concepts d'émergence : un concept d'émergence subjective qui serait applicable lorsqu'un processus est trop complexe pour que nous puissions suivre mentalement la manière dont il se produit et un concept d'émergence objectif qui serait lié au fait qu'il n'existe aucun moyen plus rapide pour prédire le comportement du système au cours de son évolution que d'observer le système lui-même ou une simulation sur ordinateur. Le fait qu'il semble bien que, pour nous, un phénomène émergent au sens objectif l'est obligatoirement au sens subjectif pourrait alors n'être qu'une manifestation de nos limites humaines. Cette implication pourrait bien ne pas être absolue. Pour des êtres aux capacités supérieures aux nôtres, certains phénomènes émergents au sens objectif pourraient ne pas l'être au sens subjectif.