

Publication de l'Académie  
des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS  
Tél. : 01 44 41 43 68  
Fax : 01 44 41 43 84  
http : www.academie-sciences.fr

Directeur de publication  
Jean-François Bach

Directoire  
Jean-François Bach  
Jean Dercourt

Rédacteur en chef  
Paul Caro

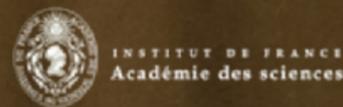
Secrétariat général  
de la rédaction  
Marie-Christine Brissot

Conception & réalisation  
graphique  
Nicolas Guilbert

Photographies & illustrations  
DR couv.,  
DR p. 4, 9, 10, 11, 22, 33  
Louis du Preez, p. 11  
olei@despammed.com p. 16, 17  
B. Eymann p. 36, 37  
Nicolas Guilbert p. 1, 3, 13, 27, 29, 41

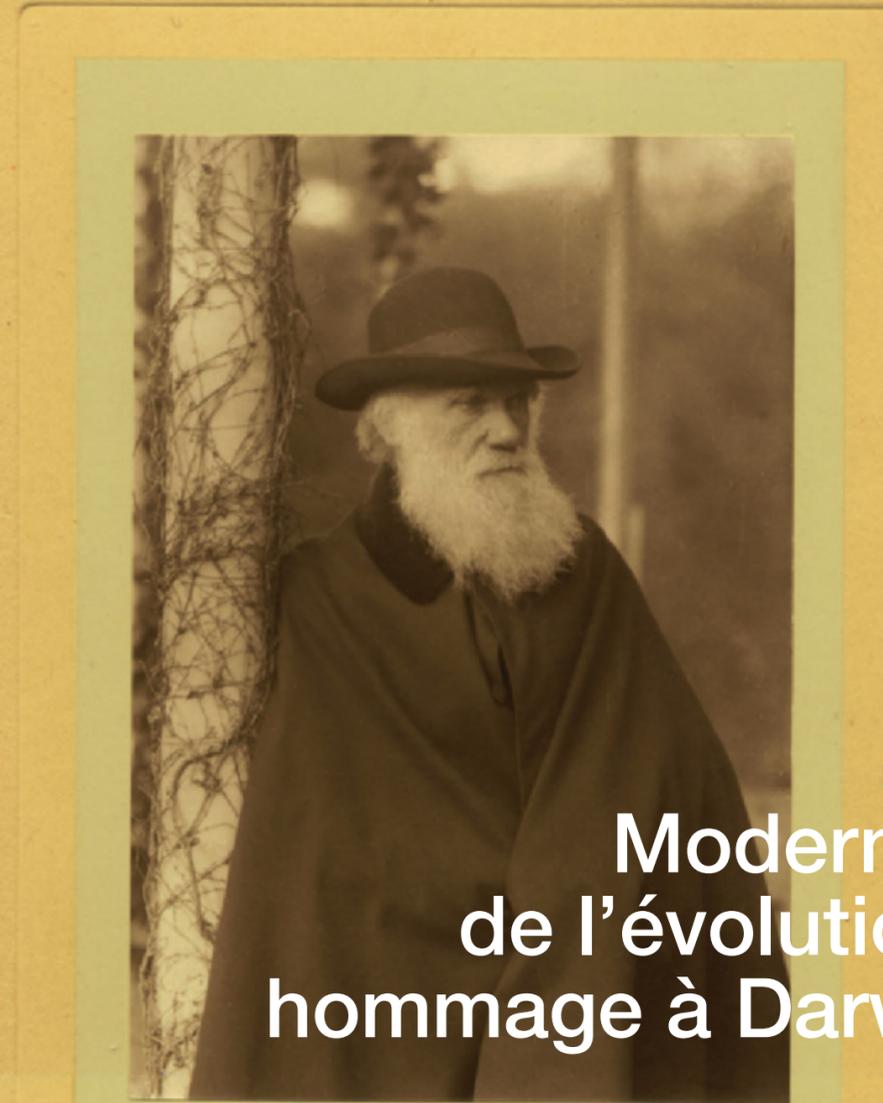
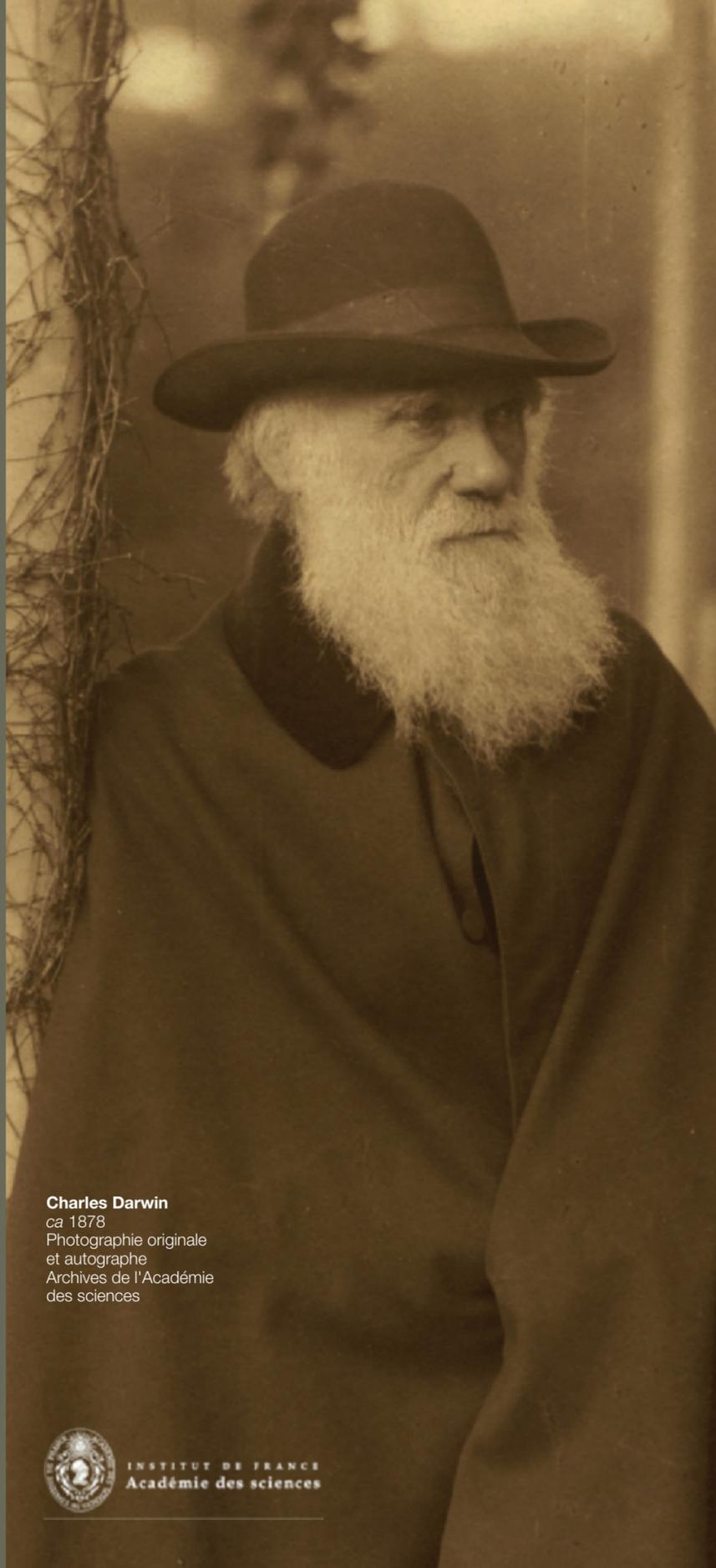
Comité de rédaction  
Jean-François Bach, Édouard Brézin,  
Pierre Buser, Paul Caro, Alain Carpentier,  
Pascale Cossart, Anne Fagot-Largeault,  
Jean-Pierre Kahane, Nicole Le Douarin,  
Jacques Livage, Dominique Meyer,  
Jean Salençon, Philippe Taquet

Photogravure & impression  
Edipro/PrintreferenceTM  
01 41 40 49 00  
n° de C.P. : 0108 B 06337  
ISSN 2102-5398



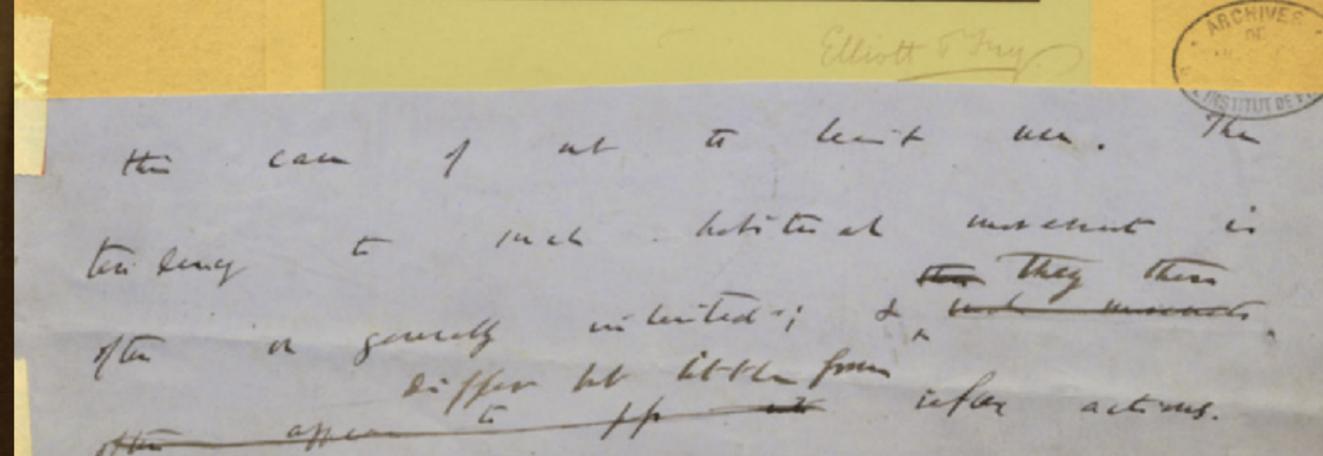
**Charles Darwin**  
ca 1878  
Photographie originale  
et autographe  
Archives de l'Académie  
des sciences

# la lettre de l'Académie des sciences n°26



Dossier

## Modernité de l'évolution : hommage à Darwin



## ÉDITORIAL

## L'Académie dans le monde

Guy Laval  
page 1

## DOSSIER

## Modernité de l'évolution: hommage à Darwin

## Darwin et l'évolution des espèces

Philippe Taquet  
page 2

## L'héritage fécond de Charles Darwin

Kevin Padian  
page 5

## Les parasites et la sélection naturelle

Entretien de Claude Combes par Paul Caro  
page 10

## Regard sur l'évolutionnisme d'aujourd'hui : de la "synthèse moderne" à la "super synthèse évo-dévo" (1970-2010)

Armand de Ricqlès  
page 12

## Darwin devant Dieu

Dominique Lecourt  
page 22

## Génétique, évolution et développement: la nouvelle synthèse

Entretien de Alain Prochiantz par Paul Caro  
page 26

## QUESTION D'ACTUALITÉ

## Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable

Dominique Meyer  
page 30

## LA VIE DES SÉANCES

## L'imagination et l'intuition dans les sciences

Pierre Buser et Claude Debru  
page 32

## LA VIE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

## La Grande Médaille de l'Académie des sciences

page 35

## Le Grand Prix Émile Jungfleisch

page 36

## Le Prix Microsoft de la Royal Society et de l'Académie des sciences

page 37

## Rapport "Longévité de l'information numérique"

page 38

## Élections de dix-huit Associés étrangers

page 39

## Remise des Prix de "La main à la pâte"

page 40

## Une image

page 41

# L'Académie dans le Monde

Par **Guy Laval**

Membre de l'Académie des sciences,  
Vice-président délégué aux relations  
internationales de l'Académie des sciences.

**L**es académiciens des sciences ont toujours porté leurs regards au-delà des frontières nationales. Le règlement de 1699 créait déjà une catégorie de membres associés étrangers. La même année, l'astronome italien Giovanni Domenico Cassini, attiré en France par Colbert, obtenait sa naturalisation et entrait à l'Académie des sciences dont il devint vite un des membres les plus prolifiques. Initialement limité à huit, le nombre de membres associés étrangers atteint le chiffre de 133 aujourd'hui.

Pour faire face aux charges multiples générées par le développement des collaborations et échanges avec les autres pays, l'Académie a décidé, en 1982, de créer une structure administrative dédiée à ces activités. Baptisée Délégation aux relations internationales, elle est animée par un membre de l'Académie qui, depuis janvier 2009, porte le titre de Vice-président délégué aux relations internationales. De la part de l'Académie, ces évolutions traduisent la prise de conscience d'un changement profond dans le statut des sciences et manifestent la volonté de s'y adapter. Ces transformations du monde scientifique résultent, en partie, de la mondialisation mais elles découlent aussi de la dynamique naturelle des sciences. En particulier, la recherche scientifique a su utiliser le développement des transports et de la communication pour s'internationaliser et, pendant les dernières

décennies, cette tendance s'est intensifiée sur tous les plans: composition des équipes, financement, formation, partage du travail, diffusion des résultats, évaluation. La compétition ne s'exerce plus entre pays mais directement entre les équipes et les chercheurs eux-mêmes. Le prestige des distinctions et honneurs internationaux en témoigne. En conséquence, l'Académie se doit de défendre l'image de la recherche nationale autant, sinon plus, à l'étranger qu'en France. Il lui faut faciliter les contacts, les déplacements, les séjours des nationaux dans les autres pays et attirer vers la France et l'Europe les meilleurs étrangers. Elle doit s'y appliquer tout particulièrement en direction des pays émergents qui accèdent au développement scientifique et atteignent le meilleur niveau.

C'est là qu'il faut chercher la signification de plusieurs initiatives de l'Académie, comme la participation aux manifestations de l'année France-Brésil et la convention signée avec l'Académie des sciences de la Chine en 2008 et en 2009, ou la préparation de l'année croisée France-Russie et de l'exposition universelle de Shanghai de 2010. Le cas du Brésil est exemplaire par le nombre et la qualité des délégués que l'Académie des sciences y a envoyés en 2009 et par l'engagement des partenaires brésiliens, en particulier pour tout ce qui a impliqué l'Académie des sciences du Brésil. Le renforcement des liens avec cette académie devrait perdurer au-delà du 31 décembre 2009, fin de l'année de la France au Brésil, grâce à la création d'une chaire à Rio et d'un probable séminaire commun annuel.

Ces transformations affectent aussi les relations entre Science et Société. Alors que la mondialisation s'imposait, la science prenait une place de plus en plus importante dans la société en tant que source d'applications révolutionnaires jugées tantôt bénéfiques, tantôt maléfiques. Que ce soit pour l'alimentation, la santé, l'énergie, les ressources, l'environnement, le





scientifique expertise et arbitre. De plus en plus souvent, son avis est sollicité dans un cadre international. Il est alors confronté à celui de ses collègues étrangers, mais son impact s'en trouve renforcé quand l'accord se réalise. Afin de faciliter leur compréhension mutuelle, ces experts doivent donc entretenir en permanence des relations étroites.

Les académies sont particulièrement bien équipées pour assurer ces contacts en raison des liens qu'elles entretiennent aussi bien avec les politiques que les scientifiques. De plus, elles ont le droit de s'exprimer sans précaution diplomatique. En conséquence, elles remplissent des missions officielles comme celle de conseil consultatif pour les réunions du G8. Dans ce cadre, en 2008 et 2009, elles ont émis de fortes recommandations relatives au climat et à la politique de l'énergie. L'Académie des sciences a aussi participé aux réunions des présidents d'académies et au forum annuel de Kyoto sur la science et la technologie dans la société. Avec la Royal Society canadienne, elle a organisé un débat très ouvert sur l'utilisation des plantes génétiquement modifiées dans l'agriculture et les réactions sociétales associées. En outre, comme membre de plusieurs réseaux d'académies, elle a cosigné des rapports et des recommandations concernant les grandes questions actuelles.

Enfin, ce nouvel état d'esprit international interdit d'oublier quiconque. En particulier, l'avenir des pays en développement devient un facteur dominant dans les débats, comme l'a montré la récente conférence

de Copenhague sur l'environnement. Leur accès aux technologies nouvelles devient urgent et ne pourra se réaliser rapidement sans un développement scientifique général. L'Académie des sciences s'en préoccupe en aidant ces pays à se doter d'une académie des sciences, comme ce fut le cas récemment pour le Liban, en les réunissant en réseaux comme celui des pays méditerranéens et en travaillant avec eux à la construction des compétences nécessaires à l'appropriation des technologies.

L'Académie des sciences intervient de plusieurs autres manières, sur la scène internationale, que ce soit à travers des organismes comme le Conseil international des sciences (ICSU), le réseau international de l'aide aux hommes de science ou la participation de nombreux membres à des académies étrangères. Elle exporte aussi ses idées sur la formation et l'enseignement des sciences. Il faut s'attendre à voir ces activités devenir de plus en plus envahissantes, de plus en plus passionnantes et de plus en plus enrichissantes ■

# Darwin et l'évolution des espèces

Par **Philippe Taquet**

Membre de l'Académie des sciences,  
professeur au Muséum national  
d'histoire naturelle.

**I**l y a 200 ans, le 12 février 1809, Charles Darwin naissait à Shrewsbury dans le Shropshire (Angleterre). Jeune naturaliste passionné il s'embarqua en décembre 1831 sur le *Beagle* pour un tour du monde de cinq années. Durant ce périple, Darwin multiplia les récoltes de spécimens animaux et végétaux, rassembla une grande quantité d'observations sur la formation des îles volcaniques, sur la construction des récifs coralliens, sur le soulèvement du continent sud-américain et sur la distribution géographique des espèces. De retour dans son pays, il s'attacha à la publication des résultats scientifiques de son voyage, se passionna pour les effets de la domestication et se plongea dans l'étude des crustacés cirripèdes, tout en préparant les premières esquisses de la théorie qui devait le rendre célèbre.

Le 24 novembre 1859, Darwin publia la première des six éditions de son fameux ouvrage ? sous le titre : *De l'origine des espèces au moyen de la sélection naturelle, ou la préservation des races favorisée dans la lutte pour la vie*. L'exposé fondateur de Darwin implique que l'apparition de nouvelles formes vivantes est le fruit d'une succession de variations dont le seul moteur est la sélection naturelle. C'était donc une approche résolument nouvelle et féconde de l'histoire de la vie, en rupture complète à toute idée de finalité.

L'année 2009 a donc été à la fois celle du bicentenaire

de la naissance de Charles Darwin et celle du cent cinquantième de la publication de son ouvrage fondateur : *L'Origine des Espèces*. L'Académie des sciences s'est associée à cette commémoration en publiant deux numéros exceptionnels de ses *Comptes Rendus*, l'un de *Biologie* et l'autre de *Palevol*, consacrés à la théorie darwinienne et à l'évolution, sous ses aspects biologiques et paléobiologiques. Elle a consacré également, le 30 juin 2009, l'une de ses séances publiques à un hommage à Darwin en proposant une série de douze conférences.

Alors que paraissent ici ou là quelques ouvrages qui voudraient contester le fait évolutif en présentant un florilège de fantasmagories et d'arguments non scientifiques, alors que divers groupes de pression tentent de suggérer qu'un plan, qu'un dessein guide la marche de l'évolution, il est bon de rappeler avec force que c'est une démarche rationnelle et scientifique qui a permis au cours des siècles de découvrir et de décrire les caractéristiques du monde dans lequel nous vivons, de proposer une représentation exacte de la place de l'homme dans la nature. Ainsi, la Terre, de plate est devenue ronde, le soleil ne tourne plus autour de notre planète, les continents se déplacent au fil des millions d'années et les espèces évoluent et se transforment depuis les débuts de la vie. La théorie de l'évolution, tout comme celle de la gravitation universelle, repose sur des fondations solides ; elles sont le fruit de l'observation et de l'expérience.



Les idées de Darwin ne furent acceptées en son temps que très progressivement. En France, en particulier, il fallut vaincre bien des réticences, y compris au sein de l'Académie des sciences.

Charles Darwin écrit le 21 janvier 1868 une lettre à Albert Gaudry, titulaire de la chaire de paléontologie du Muséum, qui avait dessiné en 1866 les premiers arbres évolutifs de l'histoire de la paléontologie :

“ Je suis enchanté d'apprendre que vous avez l'intention d'examiner les relations des animaux fossiles au point de vue de leur généalogie. Je suppose que vos croyances vous diminueront quant à présent dans l'opinion de vos compatriotes ; mais, à en juger par la rapidité avec laquelle la croyance en la descendance commune des espèces alliées s'étend dans toutes les parties de l'Europe, à l'exception de la France, je crois que cette foi deviendra générale d'ici peu. Comme il est étrange que le pays qui a donné naissance à Buffon, à l'aîné des Geoffroy, et particulièrement à Lamarck, s'accroche maintenant avec autant d'obstination à la croyance que les espèces sont des créations immuables ” (*Correspondance II*, p. 396).

Darwin avait raison de souligner les réticences des zoologistes français à l'égard de sa nouvelle théorie car son élection comme membre correspondant de l'Académie des sciences fut marquée en effet par une série

de péripéties qui se prolongèrent durant huit années, de 1870 à 1878.

C'est le lundi 27 juin 1870, 11 ans après la publication de *L'Origine des Espèces* que Henri Milne-Edwards, doyen de l'Académie, présente une liste de 9 candidats pour une place de correspondant étranger dans la section Anatomie et Zoologie, Darwin figurant sur une liste comprenant également Huxley. Le vote a lieu le 1<sup>er</sup> juillet et c'est von Brandt, directeur du Musée de Saint-Petersbourg qui est élu avec 22 voix contre 16 à Darwin, à la grande déception du zoologiste marin Henri de Lacaze Duthiers qui soutenait Darwin.

Le 22 juillet 1872, une deuxième tentative voit l'élection de Loven de Stockholm avec 32 suffrages, alors que Darwin ne recueille que quinze voix.

Le 7 juillet 1873, une troisième tentative élit le suédois Steenstrup avec 38 voix contre Darwin qui ne recueille que 6 voix.

Le 29 juillet 1878 une quatrième tentative élit à la majorité absolue l'Américain Asa Gray contre Darwin.

Il faudra attendre le 5 août 1878 pour que Darwin soit enfin élu, 2928 jours après sa première présentation et ce... dans la section de botanique !

Darwin n'est pas dupe de l'aspect cocasse de cette élection en écrivant à son ami américain Asa Gray :

“ Je vois que nous avons été tous deux élus membres correspondants de l'Institut. C'est une assez bonne plai-

Darwin jeune,  
sculpture  
d'Anthony  
Smith, Christ's,  
Cambridge,  
UK.



santerie que je sois élu dans la section de Botanique, l'étendue de ma science dans cette branche ne me permettant guère plus de savoir que la marguerite est une composée, et le pois une légumineuse ”.

Aujourd'hui, plus personne ne conteste “ La Logique du Vivant ” pour reprendre la formule magistrale de François Jacob. Cent cinquante années après la publication de *L'Origine des Espèces*, la théorie formulée par Darwin garde toute sa valeur explicative et illustre l'une des avancées les plus importantes de la connaissance. Elle féconde toutes les branches des sciences de la vie, de la paléontologie à l'anthropologie, de l'embryologie à l'écologie, de la biologie moléculaire à la neurologie.

Comme l'a souligné fort justement Théodore Dobzhansky en 1973 : rien n'a de sens en biologie si ce n'est à la lumière de l'évolution. Ce numéro de *La Lettre de l'Académie* donne la parole, au terme de l'année Darwin, à quelques-uns des acteurs, qui aujourd'hui, exercent leur activité scientifique au cœur du paradigme darwinien. Leurs réflexions montrent tout à la fois l'importance et la fécondité de la théorie de l'évolution des espèces ■

Par **Kevin Padian**

Professor, Department of Interative  
Paleontology and Museum of Paleontology,  
University of California, Berkeley, USA

**C**harles Darwin est sans doute le seul savant à avoir exercé une telle influence sur tant de dimensions de la vie sociale et intellectuelle de l'humanité. Si on le compare à Karl Marx ou à Sigmund Freud, ces deux autres géants de l'ère victorienne à la “Belle époque”, le premier a vu ses idées incroyablement déformées dans leur mise en œuvre politique, et les idées du second sur le psychisme et le comportement humain ne méritent plus vraiment d'être considérées comme participant du domaine scientifique. Ni Marx, ni Freud n'ont eu l'impact de Darwin sur la structure et le contenu substantiel de la connaissance scientifique.

À l'occasion de cette année du bicentenaire de la naissance de Darwin et du cent cinquantième de la publication de *L'Origine des Espèces*, il semble donc approprié de réfléchir un peu à ce qui constitue la grandeur de ses apports. Il est impossible de réduire ses contributions à une simple liste, mais je voudrais donner une petite idée de l'importance de son héritage.

### La sélection naturelle

Tant Darwin qu'Alfred Russel Wallace furent tous deux franchement inspirés par la théorie sociale et économique de Thomas Robert Malthus. Malthus a postulé, dans son grand *Essai sur la Population* que la croissance des populations humaines devancerait toujours la possibilité d'augmenter les ressources, dont les vivres et les approvisionnements quotidiens. En conséquence, l'excès de population relativement à l'insuffisance des approvisionnements est inéluctable, selon Malthus, il faudrait donc accepter cette réalité et la prendre en compte. La charité serait inutile ; elle ne servirait qu'à encourager les pauvres à devenir paresseux et à avoir plus d'enfants, qu'il est impossible de supprimer.

# L'héritage fécond de Charles Darwin

Darwin et Wallace ont indépendamment appliqué et généralisé ces principes malthusiens sur la croissance des populations humaines au reste du monde vivant naturel. Dans toutes les espèces il naît bien plus de rejetons qu'il n'en peut survivre. Certains d'entre eux sont plus aptes que d'autres à survivre, face aux problèmes et conditions de leur environnement. Leurs descendants seront donc mieux représentés dans les générations suivantes. L'environnement exerce donc une *sélection naturelle* qui "trie" perpétuellement entre les organismes, et qui réalise du même coup leur adaptation à leur environnement. Darwin insistait moins que Wallace sur la toute-puissance de la sélection naturelle mais il la considérait comme très importante et, de fait, elle a fourni une explication possible, voire probable, de l'origine commune de la vie et de la diversification progressive de tous les êtres vivants.

## L'arbre du vivant

Une esquisse qu'a tracée Darwin après son retour de voyage à bord de l'*HMS Beagle* en 1837 illustre clairement ses réflexions sur la diversification de toutes les branches de la vie à partir d'une racine unique. Cette idée de ramification, étendue et complétée par sa vision d'une origine commune et unique, a constitué finalement tout le concept de l'arbre du vivant, un concept développé avec passion par son collègue allemand Ernst Haeckel. Cette image a forcément remplacé les listes parallèles de la classification de Linné, tout comme le système quinaire (par cinq) avancé par W.S. MacLeay, ainsi que l'idée des quatre embranchements du règne animal défendue par Cuvier. Le concept d'un arbre unique du vivant est à son tour lié à notre prochain sujet.

## Les classifications doivent être généalogiques

Avant que l'idée de l'origine commune des espèces soit acceptée, les classifications constituaient des ten-

tatives d'édification d'une sorte de "système naturel" à vocation philosophique ou théologique, cela afin de comprendre et d'organiser la diversité du vivant. L'idée d'un arbre du vivant a suggéré ensuite que la généalogie constitue ce que Darwin a nommé "le lien caché à la base de toutes nos classifications" et il a insisté au cours de sa carrière pour que les classifications deviennent véritablement généalogiques, dans la mesure du possible. Pourtant, lors de ses propres travaux sur la classification des crustacés cirripèdes Darwin a constaté à quel point il était difficile d'établir des classifications fondées seulement sur l'origine commune, du fait que les animaux actuels sont très modifiés par rapport à leurs ancêtres communs. Ce problème l'a conduit à élaborer un autre concept, trop souvent négligé, mais qui constitue une pierre angulaire de son œuvre (ci-dessous).

## Les extinctions sélectives

Dès le milieu du dix-huitième siècle, on s'était rendu compte du fait de l'extinction d'espèces. Mais Darwin a été le premier à reconnaître dans toute son ampleur quels ont été le rôle et la contribution du phénomène des extinctions et comment celles-ci modèlent les contours de la diversité du vivant en créant des lacunes entre les groupes, et cela pendant la durée de tous les temps géologiques. La sélection naturelle a préférentiellement éliminé les formes intermédiaires, moins bien adaptées. Loin de constituer une "grande chaîne des êtres", complète et linéaire, le monde actuel représente donc plutôt un choix d'échantillons des diverses formes possibles, dans lequel la plupart des formes les plus caractéristiques sont absentes. Cela explique pourquoi il est si facile de séparer et de classer toutes les formes vivantes en les subdivisant en groupes hiérarchisés comme les "phylum", les "classes", etc. – mais si difficile en même temps de les réunir en bran-

chements exprimant leur généalogie, comme Darwin l'a observé en pratique en essayant de classer ses balanes (cirripèdes).

### Le temps profond

Cette expression pertinente était inconnue dans sa forme à l'époque de Darwin, mais elle véhicule un concept qui était pour lui aussi familier qu'inéluctable. Darwin écrit dans *L'Origine des Espèces* que le lecteur qui n'a pas saisi ou qui ne peut pas accepter l'étendue incroyable de temps qu'il faut pour l'évolution de l'arbre du vivant peut – ce sont ses propres mots – “refermer ce livre tout de suite.” Il n'exagérerait pas. Il a calculé le temps qu'il a fallu pour déposer, soulever puis éroder les falaises des formations géologiques de l'Angleterre afin de souligner cette notion de la profondeur du temps. Il est vrai qu'à l'époque de Darwin la limite de la durée de vie du soleil calculée par Lord Kelvin avait déconcerté les partisans de l'idée d'un temps profond, c'est-à-dire, d'une durée de plusieurs millions d'années. Mais Darwin n'était pas intimidé par ces résultats de la physique, car il connaissait bien les contraintes imposées par la géologie. Le temps profond était absolument indispensable à sa théorie, bien plus qu'à toutes les théories antérieures sur l'évolution. Il n'était plus possible d'accepter que la Terre n'ait que six mille ans, ou même quelques centaines de milliers d'années.

### Les répartitions géographiques

Si les espèces peuvent se diversifier, si elles changent en s'adaptant aux nouvelles circonstances et occasions offertes par l'environnement, si elles peuvent migrer, et si les climats ont changé au fil du temps, alors les patrons de répartition des plantes et des animaux à la surface du globe ne sont ni aléatoires ni des lubies d'un dieu créateur. Darwin a remarqué que les rongeurs des montagnes et des savanes de l'Amérique du Nord ou du Sud étaient plus apparentés à leurs voisins géographiques, qu'à ceux qui vivaient dans les mêmes environnements qu'eux mais sur des continents différents. Seuls les processus de l'adaptation évolutive et de la dispersion géographique pouvaient expliquer de tels patrons de répartition. C'est d'ailleurs Wallace qui avait le premier compris tout cela mieux que personne. À son époque, seule la dispersion par la *migration* était acceptée comme le mécanisme capable d'expliquer les patrons de répartition biogéographiques. Un siècle plus tard, la théorie de la tectonique des plaques a contribué à fournir le deuxième grand mécanisme biogéographique : la *vicariance*, où c'est la dispersion passive des aires continentales elles-mêmes qui explique, sans migrations, la répartition des espèces endémiques.

### La sélection sexuelle

Darwin s'est rendu compte que la sélection naturelle n'est pas la seule force qui établit et modèle la diver-

sité du vivant. Il a remarqué que les différences entre les sexes, présentes dans un fort pourcentage des espèces vivantes, des scarabées aux oiseaux et aux mammifères, en passant par les invertébrés marins, etc., peuvent se révéler très importantes, au sein de chaque espèce, pour les partenaires sexuels potentiels, dans le choix effectif de leurs conjoints et des accouplements subséquents. Ces choix doivent influencer à leur tour le succès reproductif des générations suivantes. Ainsi peuvent se différencier des caractéristiques (couleurs vives, comportements) favorisant le succès reproducteur, même si ces traits sont, par ailleurs, non adaptatifs relativement à la sélection naturelle “ordinaire”.

### La co-évolution

Un des livres les moins connus de Darwin est intitulé : *Sur les inventions variées par lesquelles les orchidées sont fécondées*. C'était la première exposition de la co-évolution, l'idée que des espèces d'origine très différentes ont pourtant évolué ensemble, du fait de la création entre elles (par la sélection naturelle) de liens écologiques réciproques qui ont influencé à leur tour des aspects importants de leurs morphologies. Avant Darwin, (et sans doute dès la préhistoire !) les apiculteurs puis les naturalistes, dont son grand-père Erasme Darwin, avaient constaté que les abeilles et d'autres insectes visitaient les fleurs pour se nourrir. Mais Darwin fut le premier à découvrir que les plantes en profitent aussi, parce que les insectes butineurs disséminent le pollen. À cette époque on découvrit une orchidée africaine à la fleur d'une trentaine de centimètres de long. Darwin conjectura qu'il devait exister un papillon de nuit à la langue suffisamment longue pour pouvoir en extraire le pollen. Quand le papillon fut finalement découvert, on lui a donné le nom de sous-espèce “*praedicta*”, parce que Darwin avait vraiment prédit son existence.

### L'économie de la nature

Darwin a inventé plusieurs idées au cœur de l'actuelle science écologique, mais le mot “écologie” était inconnu à son époque, on se servait plutôt du mot “économie.” Il a donc développé l'idée d'une “économie de la nature”, l'étude des relations des espèces entre elles au sein d'une communauté naturelle, tout comme celles qui existent entre les entreprises et les clients au sein d'une société humaine. Avant Darwin, ces relations étaient considérées comme ordonnées par un créateur divin (harmonie pré-établie) ; après lui, elles devinrent le reflet de la guerre autocatalytique de tous contre tous au sein de la nature, comme l'a exprimé Alphonse de Candolle, mais la situation est plus ambiguë. Darwin a reconnu les liens compliqués existant entre les espèces au sein d'une communauté, et il a souligné la dynamique des influences biologiques et physiques contrôlant la répartition et la survie des espèces. Au cours de sa carrière il s'est convaincu de plus en plus

que les processus biologiques, comme la compétition et la prédation, sont de la plus haute importance.

### Le changement graduel

Il est bien connu que Darwin a mis l'accent sur le déroulement graduel de l'évolution. Mais que voulait-il dire exactement par "graduel"? Aujourd'hui l'on conçoit ce terme comme signifiant "lent et continu" et c'est bien un des sens dont Darwin s'est servi. Mais il y a également un autre sens. Pendant le voyage du *Beagle*, Darwin a visité la région de Concepcion, au Chili, où se produisit un tremblement de terre vraiment terrible, avec des centaines de blessés et de morts, et de bâtiments détruits. Le lendemain, à bord du navire, Darwin remarqua que les falaises du bord de la mer s'étaient d'un seul coup soulevées de quelques mètres. Il a décrit tout cela dans son journal sous le terme d'un "changement graduel." Pour nous qui habitons aujourd'hui la Californie nous pouvons trouver que l'emploi d'un tel terme est surprenant, voire choquant. Mais considérons l'origine latine du mot "graduel": "*gradus*" veut dire "marche", comme dans un escalier, signifiant donc quelque chose qui monte par accroissements discrets successifs. Pour Darwin, les marches sont nombreuses, petites et non pas grandes, mais elles existent bien cependant. Toutefois Darwin a rejeté la suggestion de son fidèle ami Thomas Henry Huxley d'abandonner l'idée reçue selon laquelle "la Nature ne fait pas de sauts." Darwin voulait signifier par là que les changements évolutifs étaient petits et nombreux, relativement à l'ampleur globale des changements géologiques et biologiques accumulés, mais que ces changements ne sont pas tout à fait insensibles et continus. Alors, en fin de compte, Darwin n'aurait sans doute pas vu beaucoup de différences entre les taux "graduels", c'est-à-dire lents et continus des Néo-darwiniens "orthodoxes" d'aujourd'hui et ceux décrits par les actuels tenants des "équilibres ponctués".

### La résolution du conflit entre "L'unité de plan" et "Les conditions d'existence"

Le sixième chapitre de *L'Origine* concerne les difficultés de la théorie de la sélection naturelle, difficultés que Darwin présupposait à la suite des entretiens et des lettres de ses collègues avant sa publication. À la fin de chaque chapitre Darwin a inclus un résumé. Mais celui du sixième est un peu différent, parce qu'après avoir récapitulé les arguments du chapitre, Darwin lance une idée vraiment révolutionnaire. Pendant les cent cinquante années précédant *L'Origine* la science morphologique, et donc la biologie, avaient été structurées par deux théories apparemment incompatibles. En bref, et très simplement, il y avait d'une part l'idée de "*L'Unité de Plan*" de Geoffroy St. Hilaire et d'autres, selon laquelle il existait un ou quelques "plans" architecturaux communs

à partir desquels étaient construits tous les animaux. Ces "plans structuraux" étaient donc les déterminants majeurs de la forme organique. D'autre part, Cuvier avait mis en avant l'idée des "*Conditions d'Existence*", selon laquelle les structures sont adaptées à leurs fonctions, compte tenu des conditions écologiques des organismes (si l'on peut dire puisque le mot d'écologie était inconnu à l'époque).

En un seul paragraphe, Darwin a bouleversé ce débat et l'a résolu dans une large mesure. *L'Unité de Plan*, dit-il, ne reflète que *l'ascendance commune* de tous les êtres vivants, mais comme les extinctions sélectives ont effacé de nombreuses branches de la vie, elles ont créé l'impression de lignées très distinctes. Quant à ces lignées survivantes, poursuit Darwin, c'est la sélection naturelle qui les a changées et transformées telles qu'elles sont aujourd'hui. L'adaptation des structures conformément aux conditions d'existence n'est donc que le produit de la sélection naturelle s'exerçant sur les caractères hérités et les modifiant. Par ces mots et d'un seul coup, Darwin explique la genèse de la morphologie biologique et le sens des ressemblances et des différences entre les organismes. Il ne faut faire appel ni à des "créations spéciales" et séparées ni à des lois mystérieuses et transcendantes de la forme, mais seulement aux processus matériels et naturels quotidiens et incontestables de l'ascendance commune et de la sélection naturelle.

Il est important de souligner à quel point Darwin a ainsi complètement changé la perspective de l'homme sur la nature. C'est pourquoi son œuvre demeure bien connue, importante, et toujours discutée plus d'un siècle un quart après sa mort. Il y a peu de biologistes, géologues, ou autres scientifiques des temps passés dont les écrits soient toujours aussi lus et médités.

Il subsiste néanmoins une mythologie darwinienne véhiculant des inexactitudes et malentendus qu'il est bon d'éclaircir :

**1. "Jeune garçon, il n'était bon qu'à chasser, s'occuper des chiens et piéger les rats".** C'est bien ce que lui a dit son père, un jour qu'il était fâché contre lui, et Darwin ne l'a jamais oublié. Il l'a même écrit dans son *Autobiographie*, qu'il a (rappelons-le) rédigée expressément pour ses enfants. En fait Darwin s'était toujours fortement intéressé à l'histoire naturelle. Il a amassé des collections d'insectes et d'invertébrés; il connaissait bien les noms des diverses plantes et animaux; il lisait constamment des volumes d'histoire naturelle dans la bibliothèque de son père. Et avec son frère Erasme il a bâti un laboratoire de chimie près de la maison. En fait Darwin a toujours voulu devenir naturaliste, mais à l'époque cela n'était pas un bon choix dans le cadre de sa condition sociale, ce qui explique la remarque exaspérée de son père.

**2. Il n'était qu'un compagnon du capitaine sur le navire HMS Beagle.** Cela n'est pas vrai. Le capitaine Fitzroy était un scientifique de premier plan. Il a été un pionnier de la science météorologique en Europe. Il a fait aménager le plus de place possible dans le navire pour les collections scientifiques. Il a remplacé tous les canons en laiton afin de ne pas perturber les instruments scientifiques. Pour préciser les longitudes il a emprunté plus de trente chronomètres pour le voyage, au terme duquel trois marchaient encore. Fitzroy a commencé par demander à des professeurs connus d'histoire naturelle de l'accompagner. Tous ont refusé, mais lui ont indiqué que Darwin, malgré sa jeunesse, serait parfaitement qualifié pour le rôle de naturaliste. On dit que Fitzroy aurait donné son accord après avoir mesuré la tête de Darwin !

**3. Il a eu la révélation de la sélection naturelle lors de sa visite des Iles Galapagos.** Non, il n'a pas reconnu tout de suite l'importance évolutive des oiseaux de ces îles. En fait, il les avait mal identifiés et il lui a fallu demander les notes de terrain du Capitaine et de son assistant pour enregistrer les localités où les oiseaux avaient été récoltés. Il n'aimait pas beaucoup les îles, qui l'inspirèrent surtout sur des problèmes biogéographiques et ce ne fut que bien après son retour en Angleterre qu'il a ouvert son carnet sur le problème de "la transmutation" des espèces.

**4. Darwin a volé à Wallace l'idée de la Sélection Naturelle.** Les deux savants ont lu indépendamment l'essai fameux de Thomas Robert Malthus sur *La Population*. Darwin a commencé son travail sur la sélection naturelle de très nombreuses années avant Wallace. Il a développé une vision globale, exhaustive et détaillée de l'évolution des êtres vivants dans la nature. Wallace s'est toujours considéré lui-même comme "la lune à côté du soleil Darwin", et il n'a jamais eu de ressentiment à son égard.

**5. "Population thinking" : Darwin voyait l'évolution en termes de populations.** C'est un mythe créé par l'évolutionniste Ernst Mayr. Mayr a joué un rôle très important dans l'élaboration de la "synthèse moderne de l'évolution" dans les années 1940 et encore bien après. Il a donc voulu que la "pensée populationnelle" soit au centre de toute pensée évolutionniste et s'est réclamé de Darwin sur ce point. Malheureusement Darwin ne s'est jamais servi du mot de population, ni de l'idée correspondante, dans *L'Origine*. Il pensait simplement en termes d'individus au sein de l'espèce, voilà tout.

**6. Deux critères pour la classification : généalogie et similarité (ou ressemblance globale).** Il s'agit encore d'un mythe forgé par Ernst Mayr, qui

voulait appuyer les propositions de la "synthèse moderne" sur l'autorité de Darwin en reformulant les pensées de Darwin dans les termes mêmes de la synthèse. J'ai déjà expliqué que Darwin n'avait qu'un seul critère, très clair dans ses livres comme dans sa correspondance, pour édifier les classifications : celui de la généalogie.

**7. Le changement graduel est lent et constant.** Encore un mythe de la synthèse moderne, qui résulte (voir ci-dessus) du malentendu sur les sens différents du mot "graduel" en anglais, surtout à l'époque de Darwin.

**8. L'évolution de l'homme est contrôlée par la sélection naturelle.** Non : c'est pourquoi Darwin a écrit son deuxième grand livre, *La descendance* (= *as-cendance*; au sens d'origine) de l'homme, et la sélection sexuelle. Il conçoit dans cet ouvrage (longtemps objet de scandale) que la sélection sexuelle a joué un rôle très profond dans l'évolution de l'homme (et de la femme, naturellement). Il était impressionné par les différences des instincts, des inclinations et occupations, des caractéristiques, et des comportements entre hommes et femmes. Il considérait comme très important le rôle de la coopération et des instincts sociaux dans l'évolution humaine. Ces instincts, eux mêmes sélectionnés, en viendraient, combinés à la pensée réfléchie, à contrebalancer la violence éliminatoire de la sélection naturelle en privilégiant les comportements altruistes. Ainsi la sélection naturelle appliquée à l'homme, autrement dit la lutte malthusienne et éliminatoire des hommes contre eux-mêmes, et la contestation perpétuelle entre les sociétés, et les civilisations sont des idées propres à Herbert Spencer et non pas à Darwin, qui n'a jamais aimé ni défendu les notions de "Darwinisme social".

**9. La sélection sexuelle concerne surtout le nombre des descendants des générations successives.** Non : il s'agit pour Darwin des opportunités de s'accoupler pour un individu donné et il y a une nette différence entre ce concept et le nombre de descendants d'un individu, bien que les deux aspects soient évidemment liés. Darwin considérait que les défenses développées du mâle, qui pouvait ainsi repousser ses rivaux, ou les structures d'avertissement insolites, comme les grandes plumes très colorées qui attirent les femelles, pouvaient avant tout procurer à leurs porteurs de plus grandes opportunités de s'accoupler. La question du nombre de descendants en découle, bien sûr, mais c'est un autre paramètre qui dépend d'abord des opportunités de s'accoupler. Et pour qu'il existe une véritable sélection sexuelle il faut que les mâles portent des structures ou attributs qui manquent aux femelles et sur lesquelles elles exercent un choix.

### 10. Darwin était un athée strict, mais il s'est converti au christianisme sur son lit de mort.

Non : pendant la majeure partie de sa vie, et notamment pendant sa jeunesse, Darwin fut déiste, mais non pas profondément religieux, comme Benjamin Franklin, Thomas Jefferson, George Washington, ou comme la plupart des savants anglais. Quand sa fille mourut à l'âge de dix ans, Darwin dit qu'il avait perdu sa foi en la Providence divine, c'est-à-dire l'idée que tout est pour le mieux, et qu'on ne peut pas comprendre l'esprit de Dieu. À la fin de sa vie il admit être agnostique, selon le mot de son ami Thomas Henry Huxley ; mais il ne fut jamais athée.

### 11. Si Darwin avait lu l'œuvre de Gregor Mendel, il aurait pu comprendre l'hérédité.

Il n'est pas du tout clair que Darwin ait lu Mendel, ni même qu'il ait entendu parler de ses expériences. Mais quand Darwin parle, dans *L'Origine*, des "lois mystérieuses de la corrélation de croissance", il veut dire bien plus que l'idée des caractères dominants et récessifs de la simple génétique mendélienne. Il voulait évoquer la question du mélange des caractéristiques parentales et pourquoi ce mélange ne se produit pas toujours. Il voulait faire allusion aussi aux problèmes de la croissance tout au long de l'ontogénie, et surtout à ceux de l'allométrie, ou variations de taux de croissance d'un organe relativement à d'autres. Il voulait parler également des questions de liaisons entre certaines caractéristiques, par exemple, pourquoi les chats aux yeux bleus sont sourds. Et il voulait enfin savoir pourquoi il y a des structures qui se développent à des vitesses différentes et à des moments différents au cours de la vie, et ce qui détermine ces changements. Face à tous ces questionnements sur la genèse comparative des structures et des formes organiques les découvertes de Mendel ne concernaient que certains aspects, quoique très importants. Darwin, contrairement à ce que disent les théoriciens de la synthèse moderne, voulait en savoir plus sur l'hérédité.

### 12. La réception de Darwin en France.

Il est souvent affirmé, au moins dans les pays anglophones, que Darwin n'a pas tellement impressionné ou influencé les savants français de

son temps, parce qu'il n'a pas pu découvrir comment apparaissent les variations structurales, c'est à dire l'origine du matériel brut de l'évolution. Quoiqu'il en soit, il est clair qu'il se préoccupait beaucoup de cette question. Mais il a appris à rester l'esprit en suspens et à ne pas faire de conjectures quand les mécanismes intimes de la variation qu'il situait à la base de l'évolution restaient cachés. Il est sûr qu'il était conscient de l'impuissance de la science de son temps à dévoiler ces mystères. Mais, en revanche, il faut apprécier à leur juste valeur toutes les avancées qu'il nous a apportées ■

K. Padian, 2008. *Darwin's enduring legacy*. *Nature* 451 : 632-634.

K. Padian, 2009. *Ten myths about Charles Darwin*. *BioScience* 59, 9 : 2-6.

Caricature de Darwin, 1874, London Sketchbook



# Les parasites et la sélection naturelle

**L** est un paradoxe que je souligne souvent : lorsqu'on lit le livre de Darwin, "*L'Origine des Espèces*", il n'y est pratiquement pas question de parasites et surtout de relations entre les parasites et leurs hôtes. Il n'en parle que très brièvement dans le cas du coucou, oiseau parasite. C'est un paradoxe parce que, aujourd'hui, avec tous les progrès qui ont été faits dans le domaine de la parasitologie, on découvre qu'il y a des exemples fabuleux, extraordinaires, d'adaptation à l'exploitation des autres, surtout à la manipulation des autres, qui auraient pu illustrer les thèses de Darwin. En fait, si on ré-écrivait son livre aujourd'hui on pourrait utiliser presque exclusivement les parasites pour argumenter la sélection naturelle ! Les parasites vivent dans un milieu vivant auquel il leur faut constamment s'adapter, en particulier parce qu'il mobilise des défenses qu'il faut contourner, et parce qu'il faut aussi savoir quitter ce milieu pour un autre afin de se reproduire, faire la conquête d'autres hôtes. Lorsque l'on étudie la biologie des parasites, on cotoie tout le temps la sélection naturelle, on est tout le temps en train d'observer des adaptations. On comprend comment certains caractères sont sélectionnés même s'ils nous paraissent parfois bien étranges !

*Mais dans le domaine du parasitisme qu'est-ce qui subsiste au niveau de la paléontologie ?*

C'est le gros problème ! Lorsque l'on veut comprendre une adaptation, des arguments peuvent être tirés de l'étude des systèmes actuels. Par contre, quand on veut valider une explication à l'échelle de l'évolution, on est bien embarrassé parce que la paléontologie des parasites, cela n'existe pas ! Il y a bien quelques traces, mais c'est anecdotique ! On pense qu'il y avait des parasites déjà à la fin de l'ère primaire, mais décrire leur anatomie, leur physiologie, leur cycle de vie, cela n'est pas possible. Par contre, depuis que la biologie moléculaire permet d'établir des phylogénies, on peut voir comment la phylogénie des parasites recoupe la phylogénie des hôtes. Lorsque les parasites sont spécifiques, c'est possible, on peut remonter plusieurs millions, voire centaines de millions d'années ! Mais retracer une phylogénie ce n'est pas



Entretien de **Claude Combes<sup>1</sup>** par **Paul Caro<sup>2</sup>**

1. Membre de l'Académie, professeur à l'université de Perpignan.
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS.

nécessairement comprendre comment les adaptations ont été sélectionnées. On est obligé de raisonner, d'utiliser une certaine logique. C'est dire que la faiblesse de l'évolution vue à travers les parasites, c'est la difficulté de la valider avec des documents paléontologiques ! On dispose d'exemples extraordinaires, mais on n'a pas de fossiles ! On est contraint de rester dans le contemporain. Par exemple, l'observation du *comportement* de l'hôte sous l'influence du parasite.

*Histoire du chat et du rat*

Le cas du toxoplasme est remarquable. C'est un parasite (*un protozoaire, Toxoplasma gondii*) qui modifie le comportement du rat pour (sélection naturelle !) qu'il se fasse manger par les chats. Et, il semble qu'il affecte aussi le comportement de l'homme parasité ! Beaucoup de parasites ont un cycle : il faut qu'ils rentrent dans un hôte, en ressortir pour pénétrer dans un autre, etc. Ces cycles sont souvent compliqués et pas faciles à expliquer évolutivement. Il est bien difficile par exemple de comprendre comment ces hôtes successifs ont été sélectionnés. Pour se reproduire sexuellement, le toxoplasme doit passer dans un rat, puis dans un chat. C'est dans l'intestin d'un chat que le parasite pratique sa reproduction sexuée puis il recommence un nouveau cycle *via* les excréments du chat. Divers mammifères peuvent alors être contaminés,



Trois espèces de polystomes : le premier à gauche vit chez des amphibiens, celui du centre est parasite de tortues d'eau douce, celui de droite se trouve de manière inattendue dans la paupière des hippopotames (où il est très commun)! La phylogénie moléculaire permet de penser que le passage chez les tortues date de l'ère secondaire et celui chez l'hippopotame du tertiaire. Un bel exemple de l'humeur vagabonde de certains parasites.

mais pour qu'il y ait brassage de la diversité génétique, le toxoplasme doit retrouver un chat! On a pu montrer, dans les dix dernières années, que le parasite influence le comportement du rat. Un rat sain, qui perçoit la présence d'un chat par exemple à travers son urine, fait tout pour l'éviter. Mais si le rat est contaminé par le toxoplasme, l'aversion au chat va être remplacée par une attirance pour le chat! Le rat va rechercher la présence du chat, s'en approcher et se faire manger : le parasite a réussi son coup!

Le toxoplasme s'installe dans le cerveau du rat, où il secrète probablement une molécule que l'on n'a pas encore isolée et qui affecte le comportement. Le rat perd alors sa prudence traditionnelle vis-à-vis du chat et, au contraire, s'expose avec audace au risque de la rencontre. Evolutivement on ne peut pas dire ce qui s'est passé, mais, par contre, on voit bien que c'est très bon pour le parasite qui réussit à manipuler à son avantage le comportement de son hôte!

Il n'est pas rare que le toxoplasme infecte l'espèce humaine à la place du rat, ce qui dans les pays développés pourrait concerner 50 % de la population selon les habitudes alimentaires et les contacts potentiels avec les chats! Une équipe de chercheurs tchèques a étudié le comportement des sujets infectés. Soumis à des batteries de tests psychologiques classiques, les hommes infectés étaient moins susceptibles de suivre des règles, étaient méfiants, jaloux et dogmatiques, les femmes, au contraire, étaient plus chaleureuses, plus consciencieuses,

et plus extraverties. L'étude a montré que les personnes infectées avaient 2,65 fois plus de risque d'avoir un accident de voiture... Le mécanisme chimique responsable de ces différences au niveau des neurones est encore mal connu.

#### *Des vaisseaux sanguins à la demande*

La trichine (*Trichinella spiralis*) est un petit ver nématode que divers mammifères peuvent abriter dans leurs tissus. La contamination se fait par ingestion de viande. Les parasites s'accouplent dans l'intestin et les femelles libèrent de très nombreuses larves qui se dispersent dans les muscles. Là commence une manipulation plus que

surprenante. Les larves pénètrent dans les cellules musculaires et "réorganisent" cet habitat. Par des signaux moléculaires encore loin d'être entièrement élucidés, la larve de trichine fait disparaître les filaments d'actine et de myosine, modifie l'appareil nucléaire de la cellule et surtout provoque le déclenchement d'une angiogénèse (formation d'un riche réseau de capillaires) autour de la cellule. Ces vaisseaux amènent les nutriments nécessaires au métabolisme des larves du parasite. Les gènes du parasite sont donc vraisemblablement capables de dialoguer avec les gènes de son hôte, ce qui témoigne une fois de plus de l'unité du vivant!

#### *L'évolution à grande échelle*

Le couple hôte-parasite est probablement aussi ancien que la vie et son histoire est évidemment partie intégrante de l'évolution. Les parasites de la famille des Polystomes, qui infectent surtout les Amphibiens (figures) mais aussi d'autres espèces (on en trouve sous la paupière des hippopotames) sont très répandus en Amérique du Nord et du Sud, en Eurasie et en Afrique. L'étude de leur phylogénie en fonction de leur distribution géographique peut refléter l'évolution des hôtes dans l'espace et dans le temps. On découvre ainsi les routes de colonisation de la planète depuis l'Amérique du Sud vers l'Amérique du Nord, l'Eurasie par Behring, puis l'Europe et l'Afrique entre le Paléocène et le Miocène supérieur. À travers l'exemple des Polystomes, la science des parasites montre sa capacité à fournir des marqueurs de la biogéographie historique, paramètre important de l'évolution ■

# Regard sur l'évolutionnisme d'aujourd'hui : de la " synthèse moderne " à la " super synthèse évo-dévo " (1970-2010)

Par **Armand de Ricqlès**

Professeur, équipe ostéohistologie comparée,  
UMR7179 CNRS-MNHN université Paris-6,  
Collège de France

**L**a théorie synthétique de l'évolution ou " synthèse moderne " est née peu avant la Seconde Guerre mondiale (Dobjansky 1937) et s'est formalisée pendant celle-ci (Huxley 1942). Cette " synthèse moderne " combinait fondamentalement le Néo-darwinisme (et son mécanisme évolutif : la sélection naturelle) avec la génétique des populations développée au cours des décennies 1920-1930. Autour de ce " noyau dur " les autres disciplines parties prenantes de l'évolutionnisme : paléontologie, systématique, écologie, biogéographie, vinrent progressivement s'agréger, les concepts d'espèce biologique (*biospecies*) et de *population* constituant une sorte de " commun dénominateur " entre ces diverses disciplines. Le succès de la théorie après la Seconde Guerre mondiale (1945-1970) a été dû à sa robustesse scientifique, à sa simplicité, à sa logique interne et à la remarquable aptitude à s'incorporer les nouveautés et découvertes qui s'accumulaient alors dans tous les domaines de la science biologique.

Pourtant une insatisfaction grandissante va se faire jour à partir de la décennie 1970, aboutissant à de profondes remises en cause. Toutes les disciplines scientifiques ont été concernées par ce renouvellement critique, quels que soient les niveaux d'intégration du vivant qu'elles considéraient. On n'envisagera rapidement ci-dessous qu'un

choix restreint des changements majeurs de points de vue, des contestations, découvertes et propositions qui sont venues contredire, moduler, amplifier et en fin de compte enrichir et approfondir la synthèse évolutive au cours des quarante dernières années, au point de la métamorphoser assez considérablement.

## Aspects moléculaires et génétiques

La génétique des populations, dont on a vu l'importance centrale dans la naissance de la théorie synthétique, avait incorporé d'emblée la sélection naturelle darwinienne comme mécanisme évolutif. Toutefois l'évolution propre de la génétique allait lui faire développer d'autres logiques que sélectives. Le mathématicien et généticien français Gustav Malécot a approfondi et généralisé (1948) la génétique des populations des " pères fondateurs " : Fisher, Haldane et surtout de Wright, affirmant que la dérive aléatoire est un facteur majeur de l'évolution des espèces et ouvrant la voie à une génétique probabiliste qui va servir d'outil à la génétique moléculaire actuelle. Les développements initiaux de la biologie moléculaire n'eurent d'abord que peu d'influence sur la théorie évolutionniste, mais dès les années 1970 ses concepts généraux étaient fermement établis et ils commencèrent alors à interférer de plus en plus fortement avec la biologie évolutive. De



façon très générale, on peut dire que la connaissance du monde moléculaire a eu pour effet, tendanciellement, de substituer une vision probabiliste généralisée à une vision initialement sélective et de nature déterministe de la causalité évolutive.

Cette évolution peut être illustrée par le développement d'un concept clé, celui de *l'évolution moléculaire non darwinienne*.

Historiquement, une première crise issue du domaine génético-moléculaire a résulté des travaux pionniers de Lewontin et Hubby (1966) qui ont montré que le polymorphisme génétique naturel dans les populations était

plus élevé qu'on ne le croyait. Or le maintien d'une telle quantité de polymorphisme (expression du fait que de nombreux gènes ne sont pas portés, au sein des populations naturelles, à l'état homozygote, alors qu'on pouvait s'attendre à ce que les gènes "favorisés" par la sélection le soient) a posé de difficiles problèmes pour être conciliable avec la sélection naturelle. Ces problèmes ont été résolus, en fin de compte, par l'acceptation d'une évolution "non darwinienne" au niveau moléculaire. C'est ce qu'a proposé, dans sa généralité, *la théorie neutraliste de l'évolution moléculaire par mutation et dérive aléatoire* de Motoo Kimura (1968) et King et Jukes (1969), qui est d'abord apparue comme remettant globalement en cause le déterminisme sélectif de l'évolution, et donc comme une alternative générale à la conception sélectionniste héritée de Darwin. À partir des années 1980, on a mieux compris comment une évolution en grande partie neutre au niveau moléculaire était compatible avec une évolution principalement sélectionniste au niveau des phénotypes. En effet de nombreux allèles (variants d'un gène occupant le même locus ou position sur un chromosome donné) semblent se comporter comme s'ils étaient indifférents vis-à-vis de la sélection. En fait un nombre considérable de mutations "neutres" peuvent s'accumuler dans les gènes sans être "vues" par la sélection, le changement affectant l'ADN étant

alors en grande partie comparable à un “bruit”. En revanche, certaines régions géniques qui codent pour des sites fonctionnels des protéines, se révèlent extraordinairement intolérantes au changement : la sélection joue alors à plein. Il n'en reste pas moins vrai que le génome apparaît désormais en état de flux permanent, une grande partie de ses changements étant fixée de façon non sélective. Ainsi l'idée selon laquelle la plupart des nucléotides de l'ADN résultent d'une sélection positive devenait intenable.

La fluidité génétique a été étendue, au-delà de la substitution ponctuelle des nucléotides, à des séquences bien plus grandes. Des régions entières de l'ADN peuvent se dupliquer ou se déplacer à de nouvelles localisations sur le génome, ces translocations pouvant modifier de façon drastique les modes d'expression phénotypiques (comme perçu dès 1952 par Barbara Mc Clintock sur le maïs). Des familles de séquences particulières mobiles, dites *transposons*, se sont aussi révélées comme des composantes importantes des génomes et l'on a désormais la preuve, avec l'histoire de “ l'élément P ”, que le génome d'une espèce entière, répandue au niveau mondial, peut être “ envahi ” en quelques dizaines d'années par un transposon. Toutes ces données ont entraîné une vision entièrement renouvelée concernant les possibilités de la dynamique évolutive.

Dans le domaine de la biologie moléculaire, il y aurait lieu de citer également le fort retentissement pour les sciences de l'évolution du développement du concept “ *d'horloge moléculaire* ”. Il est ainsi devenu possible de dater divers événements moléculaires et de “ caler ” ces datations par la documentation paléontologique (âge de la séparation entre lignées). Enfin si des gènes peuvent arriver à contrôler leur propre réplication au sein des génomes, ils peuvent y persister et s'y multiplier et y évoluer sans présenter le moindre avantage sélectif pour les organismes qui les contiennent : ces “ *gènes égoïstes* ” peuvent donc constituer les “ parasites ultimes ” du point de vue des organismes et populations qui les hébergent. On peut concevoir également une compétition, au sein même des génomes, entre des entités génétiques diverses, ces circonstances réalisant un niveau sélectif original, distinct de la sélection darwinienne classique s'exerçant entre les individus.

## La génétique moléculaire du développement

La génétique moléculaire du développement a constitué un autre élément fondamental venu compléter notre vision de l'évolution et de ses mécanismes à partir de la décennie 1980. La découverte chez la drosophile de la famille multigénique de gènes à homéoboîte (système *hox*) contrôlant la régionalisation précise des parties du corps a ouvert la “ boîte noire ” de l'ontogenèse, trop négligée par la synthèse classique. D'une part, on a pu analyser, avec les gènes *hox*, l'exemple d'un système hiérarchique, où des “ gènes architectes ” contrôlent et modulent l'activité de gènes subordonnés. Cette structuration hiérarchique du génome rend bien plus compréhensible son mode de fonctionnement général. On sait à présent que les *mutations homéotiques* découvertes par Bateson dès 1894 (où, par exemple, une patte peut se trouver localisée sur la tête à la place d'une antenne chez les insectes) répondent à des mutations des gènes *hox*, entraînant des “ erreurs d'adresse ” de certains “ modules structuraux ”. D'autre part le mode d'expression des gènes *hox* selon une règle de colinéarité spatio-temporelle est particulièrement fascinant. Il réintroduit dans l'ontogenèse un élément de “ préformation ” philosophiquement troublant, puisque c'est bien l'ordre spatial des gènes *hox* successifs sur la molécule d'ADN qui va correspondre à l'axe antéro-postérieur de l'organisme à venir ! L'acquisition du complexe génique *hox*, par les métazoaires (sans doute intervenue progressivement au cours du Néoprotérozoïque vers 800 Ma) pourrait permettre de comprendre certains événements majeurs de l'histoire de la vie animale, compte tenu des extraordinaires possibilités de contrôle du plan du corps qu'il recèle. C'est sans doute un élément d'explication de ce qu'il est convenu d'appeler “ l'explosion cambrienne ”, c'est-à-dire l'apparition “ rapide ”, dans la documentation paléontologique, des principaux grands types d'organisation des métazoaires (les embranchements de la systématique traditionnelle) il y a 545 millions d'années.

## La phylogénétique

La “ nouvelle systématique ” populationnelle développée dans le cadre de la synthèse par des chercheurs comme Mayr et Simpson se voulait explicitement évolutionniste, mais ses procédures dérivait directement de la systématique classique pré-évolutionniste. De fait, aussi bien d'un point de vue théorique que méthodologique, la nouvelle synthèse “ classique ” ne distinguait pas clairement l'étude des “ patterns ” (ou résultats de l'évolution) de celle des “ process ” (ou mécanismes évolutifs), suivant en cela une pratique inaugurée par Darwin lui-même. La reconstruction de “ l'arbre du vivant ” ne disposait donc pas d'une méthodologie spécifique dans le cadre de la théorie synthétique classique, où l'analyse des “ *patterns* ” évolutifs était largement subordonnée, voire confondue, à celle des “ *process* ”.

La situation va changer du tout au tout à partir de la décennie 1970. Initialement deux visions bien distinctes de la systématique vont simultanément s'opposer à la " nouvelle systématique " de la Synthèse: d'une part les méthodes phénétiques informatisées (dites taxonomie numérique), agnostiques vis-à-vis de l'évolution, et d'autre part la méthode cladistique. Cette dernière, fondamentalement évolutionniste dans ses intentions initiales, met en pratique, à la suite de Willy Hennig (1966), une méthodologie rationnelle et entièrement nouvelle pour reconstituer de façon aussi objective que possible l'apparement relatif entre les organismes. La méthode se fonde sur l'idée que pour être naturelles, les entités systématiques (clades) doivent répondre à une réalité historico-génétique concrète et que, pour ce faire, elles doivent inclure l'ancêtre commun et tous ses descendants. Ceci " disqualifie " comme non naturels une multitude de groupes traditionnels de la systématique classique (cryptogames, poissons, reptiles, au sens courant) qui par définition excluent un certain nombre de descendants de l'ancêtre commun. (groupes dits paraphylétiques). L'établissement de l'apparement se fonde uniquement sur la possession de " caractères dérivés partagés " (ou synapomorphies). Deux taxons (=espèces ou toute autre entité systématique présumée naturelle et nommée, quel que soit son " rang " traditionnel: famille, ordre, classe...) sont présumés être plus étroitement apparementés entre eux (on parle de groupes-frères) qu'avec un troisième si et seulement s'ils possèdent des caractères dérivés partagés (synapomorphies) hérités de leur ancêtre commun proche et exclusif, c'est-à-dire qui n'était pas l'ancêtre du troisième taxon. De proche en proche, l'analyse des caractères portés par les taxons permet ainsi de construire un cladogramme, schéma dichotomique exprimant une hypothèse sur l'apparement relatif entre les taxons étudiés. La méthode qui exploite le principe logique de la parcimonie, ne cherche pas à mettre en évidence des relations d'ancêtres à descendants (par exemple entre formes fossiles et actuelles), car cette relation n'est pas formellement testable. En revanche la méthode permet de " tester " (par consilience additive) l'apparement relatif entre les taxons. Initialement développée dans le cadre de l'entomologie puis de la paléontologie des vertébrés, la cladistique va rencontrer un immense succès, son champ d'application s'étendant petit à petit à l'analyse de tout l'arbre du vivant. Rapidement les techniques informatisées initialement développées dans le cadre de la " taxonomie numérique " (analyses de distances) vont être adaptées à la logique de la cladistique (parcimonie), permettant l'étude simultanée d'un grand nombre d'états de caractères dans un grand nombre de taxons. Simultanément au développement de la cladistique utilisant les caractères morphologiques les progrès techniques en biologie moléculaire rendus possibles par les techniques de séquençage en masse initiés

par Sanger et al (1977) vont déterminer une expansion foudroyante d'une *phylogénie moléculaire*, permettant une comparaison des gènes et de leurs séquences. Il est remarquable que l'expansion de cette phylogénie moléculaire n'ait nullement rendu obsolète la phylogénie sur bases morphologiques (de toute façon indispensable en paléontologie) et en a même sans doute facilité la survie. En effet, il est passionnant de pouvoir confronter "*molécules et morphologie*" en comparant le "signal phylogénétique" porté par des jeux de données différents (morphologiques et moléculaires) à propos des mêmes organismes, et d'évaluer ainsi le degré de "congruence" de signaux différents, mais censés raconter (plus ou moins) la même histoire évolutive. La phylogénétique moderne, qui s'est pratiquement constituée en une discipline autonome au sein des sciences de l'évolution, en vient actuellement à remettre en cause la métaphore " de l'arbre du vivant " issue de Darwin et de Haeckel. En effet les études moléculaires ont mis en évidence la grande importance, jusque-là insoupçonnée, des "*transferts horizontaux*" de matériels génétiques entre lignages différents et séparés. Ainsi la vision traditionnelle de l'arbre phylogénétique doit être désormais complétée et compliquée par celle de multiples réseaux reliant ses divers rameaux.

À partir des années 1970, la combinaison de la découverte de la " tectonique des plaques " en géologie avec l'approche cladistique en systématique a entièrement renouvelé une autre composante de la théorie synthétique: *la biogéographie historique*. En opposition à une ancienne " biogéographie de la dispersion ", la nouvelle biogéographie, dite vicariante, a mis l'accent sur le morcellement progressif d'aires biogéographiques initialement indivises occupées par des ancêtres " généralisés " pour expliquer l'endémisme de descendants " spécialisés " dans des aires désormais disjointes. Cette approche affiche une prétention à la testabilité (par accumulation de données indépendantes mais congruentes) plus grande que l'ancienne biogéographie " dispersionniste " fondée sur les migrations et développée dans le cadre de la synthèse. Ce renouveau de la biogéographie historique s'est complété d'une active "*phylogéographie de la spéciation*". Celle-ci analyse les mécanismes concrets de la spéciation dans les écosys-



Le mélanisme industriel de la phalène du bouleau (*Biston betularia* L.). Morphe de type sombre dit *carbonaria*.

tèmes actuels à partir de la synthèse des données géographiques, éco-éthologiques, morphologiques, cytologiques et génético-moléculaires.

### La vision gouldienne : pour une théorie hiérarchique de l'évolution

Avec le recul du temps, on peut considérer qu'une bonne partie de l'évolution de l'évolutionnisme au cours des décennies 1970-2000 a été stimulée par les travaux et prises de position du paléontologue Stephen Jay Gould (1941-2002). L'influence de Gould a bien davantage porté sur la considération des *process* ou mécanismes évolutifs que sur la méthodologie de reconstitution des *patterns évolutifs* (cladisme). À partir de 1980, Gould a progressivement construit et proposé une vision globale de l'évolution considérablement modifiée et amplifiée, relativement à l'orthodoxie de la synthèse de la décennie 1960-70. Loin de récuser la valeur générale des principes darwiniens et leur mise en œuvre dans le cadre de la synthèse, Gould a présenté sa construction comme un nouveau cadre théorique constituant seulement une " *expansion* " de ceux-ci (2002). Le " Gouldisme " se situe en effet dans le droit fil d'une tradition intellectuelle continue, revendiquée comme issue de Darwin et prenant en compte le rôle évolutif de la sélection naturelle. Gould réalise son expansion de la théorie au travers d'une analyse critique de ce qu'il considère comme les trois aspects fondamentaux de la sélection naturelle de Darwin (et de la synthèse), à savoir a/son

mode d'action (*agency*), b/son efficacité (*efficacy*) et c/ sa portée (*scope*). Face à ces trois aspects de la sélection, Gould récuse clairement ce qu'il considère comme des limitations inappropriées tant du darwinisme de Darwin que de la synthèse.

**a/le mode d'action.** La sélection n'opère pas uniquement entre les organismes individuels au sein de l'espèce mais sur une hiérarchie de niveaux emboîtés : au sein des génomes, entre individus (le niveau traditionnel de la sélection), mais aussi entre populations (sélection intraspécifique), espèces (sélection interspécifique) et entre clades de niveaux variés (sélection supraspécifique).

**b/l'efficacité.** La sélection naturelle (et la sélection sexuelle) ne sont pas les seuls mécanismes responsables de l'émergence de nouveautés. Il faut prendre également en compte les facteurs morphologiques, développementaux et historiques, en tant qu'ils agissent comme de puissantes contraintes canalisant le changement possible dans des voies délimitées.

**c/la portée.** La macroévolution ne peut être réduite à une expansion des changements intraspécifiques dans le temps long, mais fait intervenir des ordres de causalités paléobiologiques différents et particuliers (sélection inter- et supraspécifique), largement découplés de la sélection darwinienne " ordinaire ". En outre, la causalité forte, introduite à tous les niveaux hiérarchiques par l'action de la sélection naturelle, est modulée à chacun d'eux par le surgissement aléatoire



Le mélanisme industriel de la phalène du bouleau (*Biston betularia* L.). Morphe de type clair dit *typica*.

de la contingence historique, qui s'exerce du niveau du gène (mutation) à celui des événements géologiques ou cosmologiques majeurs. La *contingence historique* agit ainsi comme une série de "variables indépendantes" remettant sans cesse en cause le déroulement du "jeu évolutif". L'histoire évolutive est tissée de déterminisme et d'aléatoire et son déroulement est pour cela imprévisible.

Les trois ordres de considérations relatifs à la sélection naturelle expliquent et justifient la diversité des apports de Gould dans des domaines en apparence distincts (théorie de la spéciation, hétérochronies, contraintes de construction...) dont on rappellera très brièvement certains aspects ci-dessous.

De façon générale, la pensée gouldienne, récuse une vision quelque peu "mécaniste" et linéaire de la causalité et du déterminisme, au profit d'une vision probabiliste où toute causalité déterministe porteuse d'un ordre surgit, au travers d'une hiérarchie, d'un aléatoire plus profond. En ce sens Gould demeure très profondément darwinien.

### 1/Les "équilibres ponctués" comme modèle alternatif de la spéciation et du changement évolutif

Ce modèle de "process" évolutif, développé dès 1972 par Eldredge et Gould à partir de données paléontologiques, a été compris (et très contesté) comme présentant une alternative radicale au gradualisme darwinien.

Il distingue en effet de longues "stases" au cours desquelles les espèces fluctuent sans beaucoup changer, séparées par des épisodes de "ponctuation", longs au niveau du temps écologique, mais quasiment instantanés au niveau du "temps profond" (temps géologique). Au cours de tels "épisodes", généralement initiés par des changements écologiques et géographiques, de petites populations localisées pourraient donner naissance à des espèces nouvelles, d'emblée différentes. Le modèle prend en compte la relaxation de la sélection et les effets de dérive génique liés aux petits effectifs. Ultérieurement, avec l'accroissement des effectifs et de l'aire géographique colonisée, les espèces-filles entre-iraient elles-mêmes en compétition (sélection interspécifique). Le résultat se traduirait dans la documentation paléontologique par de petits "sauts quantiques" de la morphologie, d'une espèce à la suivante. Du point de vue des mécanismes (*process*) le modèle reste compatible avec la synthèse. Il met en jeu le modèle de la population fondatrice de Mayr, poussé dans toutes ses conséquences spatio-temporelles. Ce modèle dit "ponctualiste" fait la part belle à la cladogenèse, réduit l'importance de l'anagenèse et propose un découplage entre l'adaptation des populations pendant la stase et l'apparition, largement aléatoire, des espèces-filles pendant la phase de ponctuation cladogénétique. Ce qui est capital dans ce modèle, c'est que la spéciation ne suit pas l'adaptation, comme conséquence de celle-ci, mais au contraire qu'elle la précède.

D'autres modèles que les "équilibres ponctués" présentent en commun avec lui ce même aspect "quantique". Ainsi, dans le modèle du "goulot d'étranglement" (*bottleneck effect*) de Stanley (1978,1998), la population fondatrice ne s'isole pas dans l'espace mais dans le temps. (spéciation allochronique). Dans ces modèles une explication où intervient largement l'aléatoire vient se substituer ou se combiner au déterminisme sélectif et adaptationniste traditionnel.

Après de violents débats pendant les années 1970-1990 la compétition entre les divers modèles de spéciation semble s'être stabilisée, dans la mesure où prévaut une interprétation pluraliste et ouverte, où "gradualisme" et "ponctualisme" peuvent être considérés comme les extrêmes opposés d'un continuum de mécanismes de la spéciation, dans lesquels, toutefois, le rôle de la sélection (composante "déterministe") varie considérablement, relativement à la dérive (composante "aléatoire"). De même, la découverte de la diversité des situations concrètes de spéciation en cours a rendu quelque peu caduques les anciennes et véhémentes oppositions et prétentions à l'exclusivité entre modèles allo-, péri-, para- ou synpatriques de spéciation. On notera que les modèles "ponctualistes" ont une implication plus générale que le seul mécanisme de la spéciation. Dans ces modèles la spéciation est en effet perçue comme largement aléatoire vis-à-vis de la lignée en évolution, comme l'était déjà, à un autre niveau, la mutation vis-à-vis de la destinée de l'individu. Le cheminement évolutif global de la lignée est donc compris comme résultant de la juxtaposition de phénomènes à déterminisme sélectif et d'une composante aléatoire. Le déterminisme sélection-adaptation garde un rôle, mais il perd le contrôle exclusif et absolu de l'évolution. Autrement dit, la destinée de la lignée en évolution apparaît comme historiquement "sous-déterminée" par les mécanismes sélectifs traditionnels. Par là s'introduit la possibilité d'une "mécanique macroévolutive" (voir ci-dessous) partiellement indépendante et découplée des mécanismes micro-évolutifs sous jacents.

## 2/Le rôle des contraintes architecturales

Dans un article devenu célèbre, "Les Pendentifs de la cathédrale Saint-Marc et le paradigme de Panglosse: une critique du programme adaptationniste" (1979), Gould et Lewontin avaient attaqué de front certaines propositions sur le rôle de la sélection naturelle qui, en pratique, accompagnaient toujours sa mise en œuvre dans le cadre de la synthèse. Dans cet article, Gould prenait ses distances vis-à-vis du point de vue résolument fonctionnaliste et adaptationniste dont la logique est sous-jacente à la synthèse, pour s'intéresser à d'autres composantes que l'adaptation dans le contrôle du processus évolutif. Avec l'exemple des triangles sphériques, ou pendentifs, de la Cathédrale Saint-Marc, l'illustration était donnée d'une "contrainte de construction"

indûment interprétée comme une adaptation. Plus généralement, le "plan de construction" des organismes est tellement déterminé par les contraintes historiques (phylo-génétiques), les voies du développement ontogénique, et les possibilités ou limitations architecturales (topologiques), que toutes ces contraintes, en elles-mêmes, deviennent plus intéressantes et importantes pour délimiter la voie des changements évolutifs possibles que la force sélective qui peut provoquer, effectivement, le changement, quand il a lieu. En bref, l'accent était mis sur les contraintes internes propres aux organismes, plutôt que sur la causalité externe du changement, la sélection. En d'autres termes, Gould et Lewontin pointaient les conditions effectives d'action de la sélection naturelle et les limites de son efficacité, celle-ci ne pouvant jamais faire n'importe quel organisme à partir de n'importe quel génome.

L'article prenait ainsi à contre-pied toute une tradition interprétative fonctionnaliste-adaptationniste et sélectionniste issue de Darwin lui-même, qui avait pratiquement réussi à éliminer hors du champ de l'évolutionnisme moderne une autre tradition, celle-là "structuraliste", longtemps bien vivante dans l'ancienne biologie évolutive européenne et selon laquelle les organismes doivent être analysés en tant que totalités intégrées. Développés par E. Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844) et Richard Owen (1804-1892) puis, après Darwin, encore illustrés par Russell (1916) et d'Arcy Thomson (1917), des points de vue "structuralistes" s'étaient marginalement maintenus, en particulier en Allemagne sous la forme d'un intérêt persistant pour la biomorphologie théorique (Riedl, 1977; Gutman, 1980, etc.). L'école de "constructionmorphologie" de A. Seilacher avait ainsi proposé (1970) un concept de "triangle causal", selon lequel toute entité biologique est la résultante d'une causalité complexe intégrant l'historicisme, le fonctionnalisme et le structuralisme, une approche qui influença fortement Gould.

Par ailleurs, Gould et Lewontin (1979) ont montré qu'un "pan-adaptationnisme" exagéré avait infiltré la pensée évolutionniste dans le cadre de la théorie synthétique orthodoxe, où dominait l'idée que la sélection naturelle est un agent d'optimisation tout-puissant. En pratique, on "pulvérisait" donc l'organisme en autant de caractères élémentaires qu'on le souhaitait, en proposant un "scénario adaptatif" *ad hoc* pour expliquer la présence de chacun d'eux considéré isolément. La seule restriction à une adaptation parfaite était provoquée par les compromis opportunistes atteints quand des pressions sélectives contradictoires s'exerçaient simultanément sur les mêmes objets. Le caractère non optimal de l'adaptation était alors récupéré comme le résultat de l'adaptation elle-même. Toutefois de tels scénarios adaptatifs à vocation explicative étaient généralement non testables, d'où le reproche de "story telling" qui leur fut attaché par Gould et Lewontin. (1979).

L'article de 1979 a été donc perçu comme quelque peu "terroriste" par les tenants de l'adaptationnisme traditionnel mais son influence a été forte, au point de susciter pendant une quinzaine d'années une véritable défiance injustifiée vis-à-vis du concept même d'adaptation. Les interprétations semblent avoir pris à cet égard une tournure finalement beaucoup plus équilibrée. En résumé, le débat ne porte nullement sur l'importance de la sélection naturelle, celle-ci demeurant décisive, mais seulement sur le caractère absolu du déterminisme sélectif et du principe (corrélatif) d'adaptationnisme, tels qu'ils furent utilisés dans le cadre traditionnel de la théorie synthétique, ou tels qu'ils devraient l'être dans le cadre d'une vision plus large et ouverte, faisant leur part aux autres aspects, notamment structuraux, de la causalité évolutive.

### 3/L'exaptation et l'origine des adaptations

Concernant toujours les "process" évolutifs, Gould et Lewontin avaient aussi réagi, dans le même article où ils critiquaient le "programme adaptationniste" (1979), contre la myopie pan-adaptationniste qui confond l'utilité actuelle d'une structure (sa fonction dans l'organisme) avec la raison de son origine première au cours de l'évolution. Cette réflexion a été ensuite considérablement approfondie et amplifiée avec la présentation par Gould et Vrba (1982) du concept général d'exaptation. Cette notion "tourne" la difficulté classique portant sur l'origine adaptative des innovations évolutives. Il y a en effet un paradoxe à considérer que la sélection naturelle puisse favoriser l'origine et le développement d'un trait quelconque de l'organisme (structures, caractères...) si ce trait n'est pas d'emblée capable d'assurer la fonction pour laquelle il est sélectionné. L'idée directrice de l'exaptation est que des traits, fonctionnels ou pas, mais initialement présents dans un organisme (une population) pour quelque raison que ce soit, pourraient devenir de nouvelles cibles pour la sélection dans le contexte de modifications écologiques, au point d'acquérir une fonction ou d'en changer. Dans ce concept, déjà entrevu en France par Lucien Cuénot (1932) sous le nom de "préadaptation", il y a donc réutilisation opportuniste par la sélection naturelle de traits préexistants qui seraient amenés à changer de fonctions dans des contextes écologiques nouveaux. Le modèle s'applique bien à l'origine de quelques grandes "innovations évolutives" intervenues dans l'histoire des vertébrés. Au cours des vingt dernières années les découvertes paléontologiques spectaculaires portant sur l'origine des tétrapodes (vertébrés quadrupèdes) au Dévonien d'une part, et des oiseaux au Jurassique, d'autre part, ont pu être interprétées très fructueusement dans ce cadre. De même, au niveau moléculaire, le modèle est également très utile (acquisition de nouvelles fonctions pour une copie de gène après duplication).

### 4/Les hétérochronies : développement et évolution

Dans un livre célèbre, *Ontogeny and Phylogeny* (1977), Gould a revisité avec talent et donné une actualité nouvelle aux antiques réflexions sur les rapports entre évolution (des espèces) et développement (des individus) un thème qui, de Kielmeyer (1793) à G. de Beer (1951), en passant par Haeckel (1866), n'avait pas cessé d'interférer avec les problématiques évolutionnistes. L'ontogenèse est réellement une période de la vie où peuvent se dérouler des changements évolutifs très importants. À cet égard, la mise en place temporelle de l'activité de certains gènes, ou groupes de gènes, est sans doute capitale, toutes choses égales par ailleurs. Que, d'une ontogenèse à une autre, des signaux on ou off de mise en place de ces activités se trouvent déplacés (hétérochronies) pourra se traduire par des modifications morphologiques considérables (et géologiquement rapides), non initialement liées à l'action de la sélection, et ne faisant pas intervenir des formes de transitions graduelles. Les phénomènes hétérochroniques, très étudiés à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle à la suite de Haeckel, puis enterrés sans façon par la théorie synthétique orthodoxe ont retrouvé une place de choix dans les modèles modernes de mécanique évolutive (Gould 1977; Alberch et al. 1979). Ils peuvent expliquer la mise en place rapide de changements évolutifs très importants à partir de petites causes, telle une seule mutation touchant à un gène régulant la "temporalisation" de l'expression d'autres gènes, par exemple. Par leur grande diversité, en fonction des situations sélectives, les mécanismes hétérochroniques paraissent susceptibles de rendre compte de nombreux phénomènes évolutifs où des transformations massives, rapides et non nécessairement adaptatives dans tous leurs aspects, sont enregistrées. Leur réintroduction dans la synthèse évolutive a fortement contribué au rapprochement de la biologie du développement et de l'évolutionnisme, comme en témoigne l'abondance des travaux et publications dans ce domaine au cours des vingt dernières années. Il s'agit donc, à côté des approches moléculaires, d'une contribution importante des sciences morphologiques à l'émergence de la "synthèse évo-dévo" (de Ricqlès 2004). Un apport essentiel de Gould dans ce domaine est d'avoir clarifié la terminologie et les concepts. Il distingue en effet par des termes différents les mécanismes hétérochroniques de leurs résultats morphologiques et de leurs conséquences phylogénétiques.

L'ensemble des apports du "Gouldisme" à l'évolution de l'évolutionnisme au cours des 40 dernières années apparaît donc comme très important au plan théorique. Du fait de la généralisation proposée du principe de la sélection naturelle et des modalités et niveaux de ses applications, la *théorie hiérarchique* élaborée par Gould (2002) semble bien constituer "l'expansion" souhaitée de la synthèse classique, susceptible d'accueillir

et de co-organiser la multitude de données nouvelles découvertes depuis les années 1970. C'est dire qu'elle paraît bien répondre à ce qui est demandé à une théorie générale. Il n'en demeure pas moins que, au-delà de son aspect très séduisant, certaines composantes essentielles de la théorie hiérarchique Gouldienne (comme les nombreux niveaux emboîtés de sélection) demeurent encore sinon largement hypothétiques, du moins l'objet d'interrogations multiples et que leur existence même est fortement contestée par certains.

Faudrait-il donc prudemment en rester, comme proposé par la synthèse orthodoxe, à un réductionnisme généralisé et qui n'est pas seulement d'ordre méthodologique ? Faut-il, au contraire, comme y invite Stephen Jay Gould dans son livre-testament, (2002, 2006), accepter de considérer désormais la théorie de l'évolution comme foncièrement hiérarchique, avec la prise en compte de mécanismes et de propriétés intrinsèques émergeant des différents niveaux de complexité, et prenant également en compte que mécanismes déterministes et "contingence" historique interfèrent à tous les niveaux ?

Peut-on considérer, par exemple, les changements historiques intervenus au niveau des clades supraspécifiques comme relevant de véritables "mécanismes macroévolutifs" irréductibles à la microévolution ? De fait, les conséquences globales des cinq grandes "extinctions en masse" qui ont ponctué l'histoire de la vie depuis le Cambrien ont été indépendantes de l'adaptation déterministe et précise de chaque population ou espèce à son environnement, conséquence de la sélection darwinienne "classique". De tels événements ou épisodes ont massivement "rebatu les cartes" du jeu évolutif de façon imprévisible, redistribuant le sort des clades et des lignées. Ce serait là l'intrusion, irréductible, de la contingence historique comme élément de la causalité évolutive, exerçant directement son action à des niveaux très élevés de la hiérarchie systématique.

Quelles que soient les réponses à tous ces questionnements, il apparaît clairement désormais que celles-ci doivent venir de la considération simultanée de tous les niveaux d'organisation du vivant : de la molécule à l'écosystème et de la synchronie à la diachronie.

Ainsi, la recherche est re-légitimée à tous les niveaux d'organisation, aucune connaissance n'est inutile. La mise en pleine lumière de cette évidence – dont on n'a pas encore tiré les conséquences au niveau de l'organisation et du financement des disciplines au sein de la biologie – demeure un acquis décisif de l'œuvre de Stephen Jay Gould.

### Perspectives

À l'issue de cette revue, comment comprendre la situation de l'évolutionnisme d'aujourd'hui ? La théorie de l'évolution pourrait apparaître, à l'heure actuelle, comme un "objet non identifié" tant les différences sont marquées vis-à-vis de la "synthèse moderne". On peut

parler de "super synthèse" ou de théorie "post synthétique", ou d'"évo-dévo", etc., selon que l'on souhaite insister sur la continuité ou sur les différences avec la synthèse classique. L'ensemble des données nouvelles acquises au cours des dernières décennies semble se situer, sans difficultés, dans le cadre de la vaste théorie hiérarchique proposée par Gould (2002). Il s'agit là, incontestablement, du plus vaste et récent effort de recomposition et de synthèse théorique globale dont on dispose concernant l'évolutionnisme. En revanche il ne s'agit pas d'une description neutre de "l'état des lieux" en matière d'évolution, une telle analyse globale de la situation actuelle n'ayant été en fait que rarement tentée (Heams et al. 2009). Les éléments les plus importants qui se sont incorporés à la "super synthèse" actuelle, lui faisant bien mériter son nom d'"évo-dévo" (évolution-développement) sont ceux issus de la biologie du développement (la "grande absente" de la synthèse orthodoxe) et singulièrement de la nouvelle génétique moléculaire du développement, comme on l'a vu ci-dessus. À ces pièces fondamentales du "puzzle évolutif" qui manquaient précédemment, la biologie du développement a aussi apporté, dans des perspectives plus morphologiques toute la richesse d'une réflexion renouvelée sur les hétérochronies, et sur leurs rôles possibles à divers niveaux de la dynamique évolutive.

Le rapprochement actuel enfin réalisé entre biologie du développement et biologie de l'évolution, si ardemment souhaité par beaucoup (de Beer, Waddington, Devillers...) pendant la phase un peu triomphaliste de la "synthèse moderne" (décennies 1950-1970) va-t'il se poursuivre et s'approfondir ? Au contraire, après l'actuelle phase de rapprochement ces disciplines vont-elles à nouveau diverger (D. Duboule 2009), du fait, en particulier, des contraintes épistémologiques inéluctables distinguant les sciences expérimentales (nomologiques) et les sciences palétiologiques (historiques) ? L'avenir de "l'évo-dévo" le révélera.

Plutôt qu'une théorie achevée, on pourrait regarder l'évolutionnisme contemporain comme un système ouvert, un vaste programme de recherche fécond, dont la valeur heuristique se confirme sans cesse.

S'agissant d'une théorie où la dimension historique est très largement présente, l'évolutionnisme doit rendre compte de données et de faits qui sont la conséquence d'une causalité très complexe et non linéaire, intégrant des paramètres multiples. De ce point de vue, il faut souligner que les sciences de l'évolution relèvent de domaines assez variés des sciences de la nature et fonctionnent sous des régimes différents, en particulier quant au mode d'administration de la preuve, et que réaliser leur complémentarité pose donc des problèmes épistémologiques difficiles. Elles réunissent en effet, d'une part des sciences expérimentales, ou très formalisées, voire intensément mathématisées (biologie du développement, génétique moléculaire, génétique

des populations...), d'autre part des sciences historiques et comparatives (paléontologie, phylogénétique...). Ces diverses disciplines relèvent pour les unes des sciences nomologiques (sciences recherchant des lois générales indépendantes de la temporalité et utilisant la preuve expérimentale ou par démonstration : ce sont les sciences des *process* évolutifs) et pour les autres des sciences paléontologiques (sciences décrivant des réalités particulières dépendantes de la temporalité et utilisant la preuve par monstration ou par accumulation, ce sont les sciences des "*patterns*" évolutifs).

Dans le but d'intégrer ces divers aspects, Seilacher avait proposé (1970) une formalisation générale où toute entité biologique résulterait d'une causalité complexe dans laquelle on pourrait toujours discerner trois composantes essentielles, en étroites interactions : une composante historique (phylo) génétique, une composante fonctionnelle (sélective) et une composante structurale (ou "architecturale" : biomatériaux, topologie). Dans la vision synthétique classique, l'accent explicatif principal était mis sur la seule composante fonctionnelle, déterministe, la sélection naturelle, pour rendre compte du changement évolutif. Dans "le triangle de Seilacher", il est proposé une approche plus subtile et complexe de la causalité évolutive, celle-ci intégrant historicisme, fonctionnalisme et structuralisme, selon une vision clairement partagée et développée par Gould (2002), De nouvelles méthodes statistiques (Cubo et al. 2008) parviennent à présent à démêler quantitativement le "signal" de ces divers ordres de facteurs au sein d'une causalité complexe. Il apparaît alors que, si la sélection naturelle constitue bien le "moteur" fonctionnel du changement, celui-ci s'exerce toujours au sein de systèmes tellement contraints par des facteurs historiques et structuraux que ces systèmes de contraintes, en eux-mêmes, participent de façon irréductible à la causalité évolutive.

Bien d'autres aspects contemporains des développements de l'évolutionnisme n'ont pu être abordés dans cet essai : origine et signification évolutive générale de la sexualité, application de la théorie des jeux à la compréhension des interactions évolutives, validité et signification de la sociobiologie, et aussi, paradoxalement, signification et conséquences de la résurgence d'un antiévolutionnisme contemporain virulent. Au cours des très nombreuses manifestations scientifiques intervenues en 2009 dans le cadre de l'année Darwin, diverses données nouvelles ont gagné en visibilité au sein de la communauté scientifique des évolutionnistes. Ces données seraient susceptibles, selon certains, de constituer des remises en cause de notre conception des mécanismes évolutifs et même d'aboutir à une vision globale très renouvelée d'aspects jusqu'ici tenus pour fondamentaux de la biologie cellulaire et moléculaire. S'il est trop tôt pour proposer ici une évaluation de l'impact à attendre de ces découvertes et points de

vue nouveaux, ceux-ci sont à tout le moins révélateurs de la vitalité de la recherche. On se limitera à évoquer l'une de ces problématiques en devenir.

### Qu'est-ce qui se transmet vraiment d'une génération à la suivante ? les questionnements de l'épigénétique

En 1942 Waddington avait proposé le terme d'épigénétique pour désigner l'ensemble des mécanismes par lesquels le génotype engendre le phénotype au cours de l'ontogenèse. Le terme s'est révélé comme extrêmement polysémique, ses acceptions recouvrant une multitude de phénomènes et de concepts. Les uns sont totalement compatibles avec les aspects les plus classiques de la théorie synthétique, d'autres s'articulent à des conceptions hiérarchiques, émergentistes ou holistes plus ou moins proches de la vision "gouldienne" (Gould 2002) de la théorie. Avec la biologie moléculaire, le terme en est venu, actuellement, à désigner des mécanismes moléculaires précis (méthylation de l'ADN, modifications des protéines de la chromatine...) contrôlant l'expression des gènes. Ces modifications de l'environnement de l'ADN (ou épigénome) survenant au cours de la vie, seraient partiellement transmissibles au fil de quelques générations. On peut en rapprocher la transmission directe, dans le cytoplasme du zygote, de l'expression de gènes maternels selon un patron spatial précis ("héritage par extension"). Si l'importance de tels phénomènes dans le contrôle de la différenciation cellulaire est indéniable, leur rôle évolutif global demeure délicat à évaluer. La mise en évidence de quelques phénomènes à bases épigénétiques suggérant une "transmission de l'acquis" a promptement réactivé des gloses "néolamarckiennes". Toutefois, la diversité des phénomènes invoqués, la polysémie des termes et la modestie des données expérimentales ne font pas actuellement de l'épigénétique la base d'une théorie alternative à la théorie darwinienne de l'évolution, ni n'appellent à un quelconque retour au lamarckisme. L'épigénétique, au moins dans l'acception large du terme, semble constituer un approfondissement de la compréhension fine des rapports entre génétique moléculaire et développement, plutôt qu'une remise en cause des mécanismes de l'évolution ■

Les références sont sur le site de l'Académie des sciences : [www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)

## Regard sur l'évolutionnisme d'aujourd'hui : de la " synthèse moderne " à la " super synthèse évo-dévo " (1970-2010)

### Orientation bibliographique

Collectif . 2005. articles Cladistique, Créationnisme, Darwinisme, Déluge, Dérive des continents, Évolutionnisme, Fixisme, Lamarckisme, Phénétique, Récapitulation, Transformisme in Notionnaire 2 : Idées. Encyclopaedia Universalis, Paris.

Coppens Y ., Padian K., de Ricqlès A., Taquet Ph. (Direct.) 2009 . Histoire évolutive de la vie C. R. Palevol 8 (2-3)..

David P., Samadi S. 2000. La théorie de l'évolution ; Une logique pour la biologie. Champ université, Flammarion, Paris.

Gould St. J. 2002. The structure of Evolutionary Theory. Belknap press Harvard. Univ. Cambridge, Mass. Trad. fr. par M. Blanc, 2006. Gallimard, Paris.

Heams Th., Huneman Ph., Lecointre G., Silberstein M.(Direct.) 2009. Les mondes darwiniens, l'évolution de l'évolution. Syllepse, Paris.

Lecointre G. (Direct.) 2009. Guide critique de l'évolution. Belin, Paris.

Le Guyader H. (Direct.) 1998 ; L'Évolution, bibl.in : Pour la Science. Belin, Paris.

Le Guyader H., Combes Cl. (Direct.) 2009. C. R. Biologie 332 (2-3). La théorie de Darwin revisitée par la biologie d'aujourd'hui.

Néraudeau D. (Direct.) 2003. C. R. Palevol. 2 (6-7). Les chemins de l'évolution : sur les pas de Stephen J. Gould.

Tort P. (Direct.) 1996. Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution (3 Vol) PUF, Paris.

Tort P. (Direct ) 1997. Pour Darwin, PUF, Paris.

Veuille M. et Gayon J. (Direct. ) 2010. Vol. spec.Darwin. Comptes Rendus Biologie (sous presse).

# Darwin devant Dieu

Par **Dominique Lecourt** <sup>2</sup>

Professeur à l'université Paris Diderot (Paris 7), directeur du Centre Georges Canguilhem (Paris 7).



**D**u Dieu de la Bible, et de son rapport à la Nature, le jeune Darwin connut, à Cambridge où il étudiait la théologie, un visage très particulier. Celui que lui avait donné en 1802 l'archidiacre William Paley (1743-1805) dans un ouvrage célèbre en Angleterre intitulé *Natural theology; or, evidences of the existence and attributes of the Deity, collected from the appearances of nature*<sup>3</sup>. Paley y fondait sa vue providentialiste de la société sur une conception elle aussi providentialiste de la nature. “ Il ne peut y avoir de dessein (design) sans quelqu'un pour le former (a designer) ; d'invention sans inventeur ; d'ordre sans choix. [...] Ajustement, disposition des parties, utilité de moyens en fonction d'une fin, rapports des instruments à un usage impliquent la présence d'une intelligence et d'un esprit. ” Paley trouvait dans l'histoire naturelle, et spécialement dans l'anatomie, un terrain de choix pour mener à bien ses démonstrations. Le parfait ajustement des parties d'un organisme – leur “ adaptation ” les unes aux autres ainsi qu'au milieu – devait être regardé comme le signe le plus manifeste d'un dessein (design) de la nature. Lorsqu'il s'embarque sur le *Beagle* en 1831, Darwin est un disciple fervent de Paley. Ses carnets comme son journal montrent son cheminement intellectuel. Ses observations sur les côtes de l'Amérique du Sud l'obligent à constater que les fameuses “ adaptations ” des organismes à leur milieu ne présentent nullement l'impeccable perfection postulée par le théologien. Il en vient, en 1838, à l'idée que les espèces ne sont pas immuables. Il récuse l'idée de “ créations séparées ”.

Aux yeux des Églises, cette idée qui avait pour elle l'autorité d'Aristote, présentait l'intérêt décisif de permettre d'isoler l'homme de tous les autres vivants, conformément au texte des Écritures.

Darwin n'est certes pas le premier en son temps à avancer l'idée d'une "transformation" des espèces. Buffon, Lamarck et son propre grand-père Erasme l'avaient déjà fait. Mais Darwin sait qu'il donne à cette idée une tournure beaucoup plus radicale – par le mécanisme de la "sélection naturelle" – parce qu'il a entrepris de démontrer point par point l'argumentation de Paley et substituer explicitement à l'idée d'un horloger ou artisan divin la métaphore d'une nature imprévoyante quoique excellente bricoleuse.

À propos de *L'Origine des Espèces*, Darwin écrit : "on a dit que je parle de sélection naturelle comme d'un pouvoir actif ou d'une Divinité ; mais objecte-t-on à un auteur lorsqu'il parle de l'attraction de la gravité comme gouvernant (ruling) les mouvements des planètes ? Chacun sait ce que signifie et implique l'usage de telles expressions métaphysiques ; et elles sont presque inévitables si l'on veut être bref".

Non seulement Darwin affirme que la nature ne présente le témoignage d'aucun dessein divin, mais il avance que les "petites variations" sur le lot desquelles s'opère le "tri" dont résulte la transformation apparaissent par hasard, au sens où elles ne sont dirigées ni par un plan prédéterminé, ni par les seules modifications du milieu. Le traditionnel vocabulaire de la perfection, de l'échelle, de la marche ou du développement ne trouve plus place dans sa pensée.

En 1859, Darwin a cependant déclaré être resté "théiste", comme en témoignent les dernières pages de *L'Origine*. Ce mot de "théiste" revêt alors une signification très précise en Angleterre. Il implique l'abandon de la croyance en la révélation, mais le maintien de la conviction que l'univers admet un Créateur, non comme la simple et sèche conclusion d'un raisonnement, mais comme un Dieu personnel.

Ce "théisme" affirmé signifie une rupture avec l'orthodoxie chrétienne, y compris sous la version qu'elle prend dans la théologie naturelle, mais elle ne se confond nullement avec le "déisme" des philosophes français des Lumières dont le Dieu n'est qu'une pure abstraction. Dès 1838, Darwin percevait toutefois très bien la pente "athée" de sa pensée. Et les lettres qui accompagnent l'envoi de son maître-livre en 1859 montrent qu'il a clairement conscience de s'exposer à une riposte religieuse<sup>4</sup> qui ne tardera pas, comme on le sait, en Angleterre même dès le 30 juin 1860. À Richard Owen (1804-1892), il écrit : "je crains que ce livre ne soit abominable à vos yeux" ; à l'un de ses admirateurs américains, protestant fervent, le botaniste Asa Gray (1810-1888) : "ma conclusion hétérodoxe que les espèces peuvent varier vous inspirera du mépris à mon égard" ; au paléontologue et botaniste de Calcutta, Hugh Falconer (1808-

1865), ces mots stupéfiants : "Seigneur, comme vous serez furieux si vous le lisez, et comme vous aurez envie de me crucifier tout vif !".

Voilà qui n'était pas mal vu...

Les défenseurs du Dieu de la Genèse ne cesseront de s'en prendre à Darwin qui, lui-même de "théiste" se déplacera vers l'"agnosticisme" — mot inventé par son "bulldog" Thomas Henry Huxley (1825-1895) — pour désigner sa position en matière de croyance religieuse. Suspendant son jugement sur l'existence de Dieu, il lui importe seulement de refuser que l'homme ait été le fruit d'une création spéciale. Déjà en 1838, il écrivait "je n'admettrai jamais que l'homme, sous prétexte qu'il y a un abîme entre lui et les animaux, ait une origine différente".

Je n'insiste pas sur l'histoire, spécifiquement américaine dans un premier temps, du "procès du singe" en 1925, puis du "créationnisme scientifique" des années 1980 qui entendait obtenir la reconnaissance épistémologique de la Genèse comme hypothèse scientifique concurrente de la théorie de l'évolution<sup>5</sup>. Même si cette doctrine a maintenant gagné des soutiens spécialement dans le monde musulman, elle a pour l'essentiel cédé la place à une nouvelle prétendue "théorie scientifique" : celle de *l'Intelligent Design*. Cette théorie permet de conserver l'essentiel des résultats de la biologie actuelle, mais en les englobant dans une interprétation qui se révèle, sur le fond, de même inspiration que la théologie naturelle de Paley.

Que dit la doctrine de l'ID ? Elle soutient que l'ordre et la complexité du vivant imposent à la pensée l'idée que l'évolution est guidée, orientée par une force, une entité directrice, qu'on ne saurait identifier aux forces physicochimiques supposées par les darwiniens régler le jeu du hasard et de la nécessité dans la sélection naturelle. Ses théoriciens majeurs avancent deux arguments complémentaires.

Le premier a été élaboré par Michael J. Behe, un biochimiste (catholique)<sup>6</sup>. C'est l'argument de la "complexité irréductible". L'auteur s'appuie d'abord sur les passages de *L'Origine des Espèces* (ch. 6) où Darwin lui-même avoue son embarras pour expliquer l'existence d'"organes très parfaits et très complexes", comme l'œil, par le mécanisme de la sélection naturelle<sup>7</sup>.

2. "Modernité de l'évolution : Hommages à Darwin", colloque de l'Académie des sciences, Institut de France, 30 juin 2009.

3. Cet ouvrage a été réédité par Oxford University Press en mai 2008.

4. Charles Darwin. *Origines — Lettres choisies 1828-1859*, introduction et édition française dirigée par D. Lecourt, Bayard, Paris, 2009.

5. D. Lecourt, *L'Amérique entre la Bible et Darwin*, suivi de *Intelligent design : science, morale et politique* (1992), PUF, 3<sup>ème</sup> éd., 2007.

6. M. J. Behe, *Darwin's Black Box : The Biochemical Challenge to Evolution*, Free Press, 1996.

7. Ce chapitre s'intitule "Difficultés de la théorie". Darwin écrit : «... la difficulté d'admettre qu'un œil complexe et parfait a pu être produit par la sélection naturelle, bien qu'incompréhensible pour notre imagination, n'attaque en rien notre théorie. Nous n'avons pas plus à nous occuper de savoir comment un nerf a pu devenir sensible à l'action de la lumière que nous n'avons à nous occuper de rechercher l'origine de la vie elle-même... ».

Behe surenchérit. Il est impossible d'expliquer la production des organismes complexes par un agencement progressif d'organes supposés simples. Son exemple favori est constitué par le flagelle de certaines bactéries. La complexité du flagelle est irréductible à la somme d'unités plus petites dont les variations feraient l'objet de sélection. Or, la biologie actuelle montre qu'au niveau moléculaire, une telle complexité irréductible se rencontre partout. Donc, la théorie de Darwin ne peut pas, comme Behe dit qu'elle le prétend, entièrement "expliquer la vie". Il faut supposer que les êtres vivants "élémentaires", toujours déjà complexes, ont été créés d'un seul coup. Ce pourquoi on doit admettre qu'existe un créateur doué d'une intelligence supérieure, à la fois analytique et synthétique.

Le deuxième argument a été avancé peu après par le mathématicien William A. Dembski<sup>8</sup>, l'auteur de *Intelligent design: The Bridge between Science and Theology* (InterVarsity Press, 1999). Cet argument consiste à s'appuyer sur le calcul des probabilités pour "démontrer" qu'il apparaît hautement improbable que les grands changements biologiques dont fait état la théorie de l'évolution puissent être le résultat de mécanismes aléatoires. Dembski mène combat contre l'idée de sélection naturelle opérant sur des variations affectant au hasard les organismes individuels; il dénonce non l'idée même d'évolution, mais ce qu'il appelle "l'évolution inintelligente"<sup>9</sup>. Se contenter d'invoquer le hasard et la nécessité<sup>10</sup> pour expliquer l'évolution, c'est commettre l'erreur d'adopter la conception matérialiste du monde qui restreint notre concept de nature et se révèle attentatoire à notre dignité.

Seule une intelligence d'ingénieur, selon Dembski rejoignant Behe, est capable de produire des systèmes aussi complexes. Il faut supposer que les structures du vivant aient été ajustées par une telle (super) intelligence, susceptibles de se plier à un "design", c'est-à-dire en définitive à une volonté de perfection en fonction d'une fin prédéterminée. À ses adversaires qui crient à l'obscurantisme, Dembski réplique que refuser la conception matérialiste de la nature ne précipite nullement dans le "surnaturalisme" ou la magie, car l'intelligence qu'il invoque doit être considérée comme naturelle.

La plupart des tentatives de réfutation opposées à l'ID par les défenseurs du darwinisme ont en réalité contribué à accréditer cette idée pernicieuse que la controverse était scientifique, comme le souhaitait Dembski.

Plusieurs chercheurs, voyant qu'ils tombaient dans le piège de leurs adversaires dès lors qu'ils se plaçaient sur

leur terrain, préfèrent maintenant attaquer l'*Intelligent design* sur son versant religieux. Une véritable vague de publications plus ou moins tonitruantes en faveur de l'athéisme a ainsi déferlé sur le marché anglo-saxon, atteignant jusqu'aux flans des autobus catalans.

Les pages des journaux américains depuis 2005 retentissent de ces empoignades. De tels ouvrages prétendent comporter une réfutation scientifique des doctrines religieuses – spécialement chrétiennes et plus généralement bibliques. La position adoptée par Stephen Jay Gould dans *Rocks of Ages* (1999)<sup>11</sup> au nom du principe NOMA (*Non Overlapping Magisteria*) de la distinction des magistères leur paraît trop conciliante ou abusivement irénique. La religion n'est-elle pas elle-même un produit de l'évolution? demandent-ils. En quoi ce produit serait-il particulièrement respectable? Loin d'instaurer le règne de la paix parmi les hommes, les religions ne cessent au contraire de les précipiter dans les affrontements les plus sanglants! Dieu ne serait qu'une illusion. Mais dangereuse<sup>12</sup>.

Il y a quelque chose de profondément juste dans l'argumentation de Michael Ruse, philosophe darwinien, lorsqu'il déplore, dans son livre *The Evolution-Creation Struggle* (Harvard University Press, 2005), que certains biologistes aient trop souvent propension à transformer la théorie de l'évolution en "religion séculière" capable de tout expliquer, y compris les phénomènes moraux et religieux. Ils suscitent en retour des vagues récurrentes d'anti-darwinisme. Et l'on peut regretter qu'un évolutionnisme parfois sommaire se soit offert depuis un siècle et demi à servir de base "scientifique" aux sciences humaines et sociales.

Mais peut-on se contenter de le déplorer ou d'en sourire? Cette thèse doit être réinscrite dans une histoire profonde si l'on veut comprendre son succès. Elle est en effet, de longue date, connue des philosophes. Et c'est probablement parce qu'il s'agit d'une thèse philosophique qu'elle irrite à ce point les protagonistes d'un débat dont les uns voudraient se contenter de la science pour penser et les autres de la religion pour vivre.

Sans doute faudrait-il chercher les origines de cette thèse jusque dans *De Natura Deorum* de Cicéron (106 av. J.-C. — 43 av. J.-C.), et la retrouverait-on au XVII<sup>e</sup> siècle dans les œuvres de Nicolas Malebranche (1638-1715). Je me contenterai de remonter à Isaac Newton (1643-1727). On se souvient que dans le "Scholie general" des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687), ayant exposé son système de la gravitation universelle, il concluait par ces lignes surprenantes: "Cet arrange-

8. Titulaire d'un Ph.D. en mathématiques (Université de Chicago) et d'un Ph.D. en philosophie (Université de l'Illinois Chicago), William A. Dembski est actuellement professeur de "philosophie" au Southwestern Baptist Theological Seminary à Fort Worth (Texas).

9. "Unintelligent Evolution", Conceptual Foundations of Science, Baylor University, Waco, Texas, conférence à l'American Academy of Religion meeting, le 22 novembre 2004.

10. Le livre de Jacques Monod (1910-1976) reste une cible constante des "Iders" — *Le hasard et la nécessité*, Editions du Seuil, Paris, 1970.

11. Traduction française, Stephen Jay Gould, *Et Dieu dit: "Que Darwin soit!"*, préface de D. Lecourt, Editions du Seuil, collection science ouverte, Paris, 2000.

12. Yvon Quiniou, "La mort scientifique de Dieu", in *Le Nouvel Observateur* hors série, *La Bible contre Darwin*, décembre 2005/janvier 2006, pp. 38-41.

ment aussi extraordinaire du Soleil, des planètes et des comètes n'a pu avoir pour source que le dessein et la seigneurie d'un être intelligent et puissant ”.

Newtonien parmi les newtoniens, David Hume (1711-1776) explore le fond philosophique de la question dans l'ouvrage posthume qu'il a toujours considéré comme le plus important (et le plus réussi) qu'il ait écrit, les *Dialogues sur la religion naturelle* (publiés en 1779). Au centre de la discussion se trouve précisément la notion de “ dessein intelligent ” donnant lieu à une critique sceptique dévastatrice de l'idée de finalité dans l'ordre naturel. Causalité inversée, la finalité n'est inscrite dans la nature que pour mieux attribuer à Dieu le schéma par lequel nous aimerions pouvoir expliquer l'action humaine : celui d'une connaissance rationnelle qui ordonnerait des moyens à employer en fonction d'une fin préalablement décidée. Démarche anthropomorphique fallacieuse qui procède par analogies, use et abuse du vocabulaire mécanique, voire machinique, sans s'interroger sur la réalité de l'action humaine, et même sur la forme particulière qu'elle revêt lorsqu'il s'agit de construire des machines. Essais, erreurs, approximations, simplifications, délires et rêves... ne sont pas pris en compte.

L'idée d'un dessein intelligent, insiste Hume, semble s'imposer comme une évidence à l'observation, elle suscite un sentiment d'enthousiasme parmi les plus instruits de ses contemporains, volontiers théistes, mais, à l'usage, elle n'apparaît jamais fondée dans son objet, mais plutôt dans les attentes du sujet dont le souci est d'apporter une garantie intangible à l'ordre moral dont il souhaite le règne dans la société.

Emmanuel Kant (1724-1804) retient à sa manière la leçon de Hume. Il impute lui aussi au sujet le sentiment que nous éprouvons face à ce qui nous apparaît un “ dessein intelligent ”. Et il est conduit à lier tout spécialement l'idée de dessein à la structure du vivant. Les êtres organisés, nous contraignent, par le rapport qui y règne entre le tout et les parties, à les penser comme “ fins naturelles ”. “ Un produit organisé de la nature est un produit dans lequel tout est fin et réciproquement aussi moyen. Rien en lui n'est gratuit, sans fin, imputable à un mécanisme naturel aveugle ”, écrit-il dans la *Critique de la faculté de juger*.

L'analogie avec la montre lui sert à accentuer la différence entre finalité artificielle et finalité naturelle : certes, dans une montre, “ une partie est l'instrument du mouvement des autres ”, mais un rouage ne produit pas un autre rouage, une partie est là pour une autre partie, mais non par cette autre partie. Pas plus qu'une montre ne saurait produire une autre montre. Les êtres organisés, s'organisant eux-mêmes, sollicitent de la raison un jugement “ réfléchissant ” bien différent du jugement de connaissance (“ déterminant ”).

Dissociant les deux termes de l'analogie classique entre l'œil et le télescope, Kant précède Darwin qui écrit dans *L'Origine des Espèces* : “ La comparaison entre l'œil et

le télescope se présente naturellement à l'esprit. Nous savons que ce dernier instrument a été perfectionné par les efforts continus et prolongés des plus hautes intelligences humaines, et nous en concluons naturellement que l'œil a dû se former par un procédé analogue. Mais cette conception n'est-elle pas présomptueuse ? Avons-nous le droit de supposer que le Créateur met en jeu des forces intelligentes analogues à celles de l'homme ? Ne pouvons-nous admettre qu'il ait pu former ainsi un instrument optique vivant, aussi supérieur à un appareil de verre que les œuvres du Créateur sont supérieures à celles de l'homme ? ”.

La plupart des tenants actuels de l'ID ignorent (délibérément ?) ces discussions philosophiques qui permettent de saisir toute la complexité de la question du finalisme. Pour eux, si un penseur a anticipé leur théorie, c'est William Paley qu'ils ont fait rééditer récemment !

Suffit-il cependant, pour s'opposer à l'ampleur de l'adhésion qu'elle suscite jusque parmi les biologistes, de dénoncer, comme l'a tenté avec brio Christian de Duve, une régression épistémologique flagrante puisque Darwin sur le *Beagle* avait pris fermement ses distances à l'égard de Paley ? Chacun ressent que la question est plus profonde. Ce n'est pas en définitive d'une vérité scientifique sur le monde qu'il s'agit, mais de la représentation que nous pouvons nous faire de la condition et de l'existence humaines.

Hume avait raison de faire remarquer l'“ enthousiasme ” dont se trouvait “ naturellement ” porteuse l'idée d'un dessein intelligent qui se réaliserait dans la nature. Mais pourquoi cet enthousiasme, si manifeste et si puissant encore aujourd'hui ? Parce que l'ID apporte une “ preuve scientifique ” de l'existence de Dieu – du Dieu de la Bible à tout le moins ? Parce que la religion se trouverait ainsi justifiée par l'effort humain de connaissance et, en retour, la science comme sacralisée par le sens ultime, enfin découvert, de ses résultats ?

Mais Darwin avait raison avec Hume et Kant : n'y a-t-il pas quelque outrecuidance à attribuer à Dieu une intelligence transposée de la nôtre ? Et n'est-ce pas une vision très particulière de l'être humain qui se trouve ainsi magnifiée ? *Intelligent design* : c'est le type humain de l'ingénieur, du décideur, ou plus généralement de l'agent rationnel qui se trouve divinisé. Et si l'on fait de ce type un idéal, on risque d'en venir à oublier que la pensée humaine déborde toujours l'intelligence – la capacité d'enchaîner des raisonnements – que l'action, avec ses tâtonnements, ses emballements, ses échecs et les émotions qui les accompagnent, précède l'intelligence. Philosophique, la question de l'ID n'est pas seulement épistémologique, elle est fondamentalement morale et politique ■

13. “ Aux origines de la vie ”, entretien sur l'évolution, Darwin, le dessein intelligent et la science par Dominique Meeus et David Pestieau, le 23 septembre 2006 : [http://www.ecoledemocratie.org/article.php?id\\_article=333](http://www.ecoledemocratie.org/article.php?id_article=333)

# Génétique, évolution et développement : la nouvelle synthèse

Entretien de **Alain Prochiantz**<sup>1</sup> par **Paul Caro**<sup>2</sup>

1. Membre de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France, directeur de l'UMR "Développement et évolution du système nerveux" au Collège de France.
2. Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS.

**N**ous avons célébré en 2009 le deux centième anniversaire de la naissance de Darwin et le cent cinquantième de la publication de *L'Origine des Espèces*. Cela m'incite à vous poser la question de l'importance aujourd'hui, pour un chercheur, de l'œuvre de Darwin ?

Une réponse très générale serait que tout biologiste peut replacer son travail dans une perspective évolutive et donc dans le cadre de la théorie de l'évolution. Plus spécifiquement, est-il nécessaire d'avoir lu Darwin

pour être biologiste ? De toute évidence non, faute de quoi nombre d'entre nous, peut-être même certains évolutionnistes n'auraient pas leur place dans les laboratoires. Or, ce sont d'excellents chercheurs. *L'Origine*, *La Descendance de l'Homme* ou les nombreux autres écrits de Darwin, en particulier ses monographies détaillées, ne sont pas nos livres de chevet.

Ce paradoxe tient sans doute au fait que cette théorie est sous-jacente à la plupart des travaux en biologie, qu'elle les habite pour ainsi dire. L'objet d'une science n'est pas, en effet, cet objet physique que nous étudions (telle molécule, telle voie de signalisation, tel organisme,...), mais l'objet et le corpus théorique qui l'accompagne. Or, dans ce corpus, la théorie de l'évolution, telle qu'elle fut proposée par Darwin et telle qu'elle s'est transformée depuis, joue un rôle central.

*Mais l'idée d'évolution n'est pas née avec Darwin et si vous dites qu'elle s'est transformée, cela ne relativise-t-il pas un peu l'importance de Darwin ?*

Certes, l'évolutionnisme n'est pas né avec Darwin et s'il ne fallait citer qu'un nom, celui de Lamarck, son aîné d'une génération, aujourd'hui redécouvert à tra-



vers l'importance accordée à l'épigénétique, serait sans doute en premier ligne. Mais *L'Origine* a constitué une étape fondamentale, qui fait de Darwin le père de la théorie de l'évolution. Cette étape a consisté à proposer un mécanisme reposant sur la sélection d'individus sur la base de petites variations des caractères portés par ceux-ci. Ces petites variations pouvant, dans un milieu donné, conférer un avantage sélectif se traduisant par un plus grand nombre de descendants. Ce fut un point décisif.

*Vous dites aussi que cette théorie s'est transformée.*

Oui et heureusement, sinon ce ne serait pas une théorie mais un dogme. Elle a même été le lieu de discussions acharnées, de controverses. Par exemple entre ceux qui proposaient que la création de nouvelles espèces résultait de l'accumulation, sur de très longues périodes de temps, de ces petites variations, en cela fidèles au "*Natura non facit saltum*" de Darwin lui-même, et les "saltationistes" qui proposent — Stephen J. Gould aura porté cet étendard — que la création de nouvelles espèces peut demander de tels sauts évolutifs. Gould d'ailleurs dans son dernier livre *La Structure de la*

*théorie de l'évolution*, propose aussi que la compétition n'implique pas seulement les individus, mais aussi les espèces. Cela ne remet pas en cause le statut scientifique de la théorie de Darwin, je dirais même que ce statut sort renforcé de ces controverses. Qui voudrait d'une théorie morte ?

*J'aimerais revenir sur ce point brièvement avec vous à la fin de l'entretien, mais avant cela puis-je vous demander en quoi vos travaux participent à cette théorie de l'évolution, ou y contribuent ?*

Avant de répondre, si je le peux, à cette question et pour l'introduire, j'aimerais attirer votre attention sur un enrichissement récent de la théorie de l'évolution. Il s'agit, à travers la découverte des gènes de développement, de cette discipline Evo/Devo pour évolution et développement, qui permet à travers la génétique de faire un lien entre ces deux processus.

*Gènes de développement ?*

Excusez-moi. Ce sont des gènes, pour faire simple et aller vite, qui sont responsables du plan de l'organisme,

de son organisation spatiale et temporelle. Les mutations affectant ces gènes sont souvent mortelles. Elles se traduisent en effet en modifications morphogénétiques spectaculaires pouvant aller jusqu'à changer le plan des organismes. Par exemple, une mutation du gène *Antennapedia* chez la mouche *Drosophila*, induit la transformation des antennes – organes de l'olfaction –, en pattes ! Ces gènes ont d'autres fonctions, en particulier chez l'adulte, mais ils furent découverts sur la base de ces mutations monstrueuses. Vous comprendrez aisément qu'ils permettent de faire un lien entre évolution et développement puisqu'un monstre est, somme toute, une forme vivante nouvelle. D'ailleurs, l'existence de ces mutations monstrueuses du plan de l'organisme plaide pour l'hypothèse "saltationniste". J'ajouterai que la conservation de ces gènes au cours de l'évolution, entre les Arthropodes et les Mammifères par exemple, constitue à sa façon, une "preuve" de l'évolution.

#### *Mais pour en revenir à vos travaux ?*

Ces gènes encodent des facteurs de transcription, c'est-à-dire des protéines présentes dans le noyau des cellules et qui y régulent l'expression d'autres gènes, et par là contrôlent les programmes de développement. De nouveau, vous m'excuserez je l'espère si je suis obligé de simplifier. Or ce que mon laboratoire a proposé, il y a déjà plusieurs années, est que ces facteurs de transcription sont capables de voyager d'une cellule à l'autre. Il sont sécrétés et internalisés. Dans la mesure où ces facteurs sont aussi des marqueurs de position (ici on fait une antenne et là une patte), ce passage entre cellules correspondrait, dans notre hypothèse, à une forme parcimonieuse de passage d'information de position entre deux cellules.

#### *Parcimonieuse ?*

Oui parcimonieuse, parce que ce passage court-circuite les systèmes classiques du type ligand et récepteur. Ce qui ne veut pas dire qu'on peut s'en passer aujourd'hui, mais permet de proposer ce mécanisme qui aurait précédé, au cours de l'évolution, l'apparition des systèmes classiques de transduction du signal. Il aurait ainsi constitué le premier mode de passage d'information positionnelle entre cellules d'un même organisme. Vous voyez immédiatement la couleur "évolutive" de cette hypothèse. D'ailleurs c'est parce que ces facteurs de transcription sont présents chez les plantes et chez les animaux que nous pouvons aussi proposer que ce mode de signalisation a existé avant la séparation entre les deux règnes de la nature. Là encore la dimension évolutive s'introduit dans le raisonnement.

#### *Et chez les unicellulaires ?*

C'est une excellente question. Ces facteurs existent chez les unicellulaires et nous n'excluons pas que ce passage intercellulaire ait, là aussi, une fonction. En fait nous caressons l'idée que, chez certaines algues vertes unicellulaires, un tel échange permette aux deux types de gamètes de se reconnaître avant de fusionner au cours de la conjugaison et de la formation du zygote. C'est en tout cas ce que j'ai proposé au cours du colloque organisé par notre Académie, en juin 2009, en honneur de Darwin.

#### *Et où en êtes-vous ?*

Je préfère ne pas trop m'étendre ici sur nos travaux puisque les lecteurs intéressés pourront consulter les publications. Mais comme il s'agit d'évolution, je voudrais simplement dire que nos résultats récents permettent d'entrevoir un rôle de ce transfert intercellulaire dans l'évolution du système nerveux et aussi, bien entendu, dans son développement, y compris son développement tardif. Des fonctions chez l'adulte ne sont pas, non plus, sans fondements expérimentaux. Pour cet aspect aussi, je renvoie aux travaux de mes collègues du laboratoire et de nos collaborateurs d'autres laboratoires.

#### *Si vous le voulez bien, j'aimerais revenir à des considérations plus générales portant sur le créationnisme et les controverses qui accompagnent ce mouvement, en particulier aux États-Unis d'Amérique, mais pas seulement, puisque ce mouvement tente de prendre pied en Europe. À quoi attribuez-vous ce phénomène ?*

Je ne me sens pas capable de répondre en quelques mots à une question très complexe, à la fois historique, sociologique et politique. Il me semble évident, et je m'en déssole, m'en indigne aussi parfois, que nous vivons une période où les sciences font l'objet de multiples attaques. La biologie est en première ligne, mais la chimie, puisque vous êtes chimiste, ou la physique, n'échappent pas à ces attaques. Il ne s'agit pas de nier les problèmes quand ils se posent réellement, mais de conserver une attitude aussi rationnelle que possible. Il est en tout cas triste de constater que des responsables (si j'ose dire) politiques espèrent prospérer en exploitant ce filon, comme le montrent certains débats sur les organismes génétiquement modifiés. Seule une éducation scientifique plus poussée, y compris pour nos décideurs, pourra renverser durablement cette tendance. En revanche, je crois qu'il y a un point sur lequel on peut développer un peu, qui est celui des arguments des créationnistes quand ils remettent en cause le statut scientifique de la théorie de l'évolution.

#### *En effet, on entend souvent dire que le créationnisme, c'est-à-dire la vision biblique de la création du monde,*



*est une hypothèse, mais que c'est aussi le cas de la théorie de l'évolution, donc que ces deux hypothèses doivent être enseignées sur un pied d'égalité.*

Oui c'est l'argument principal des créationnistes devant les tribunaux aux États-Unis d'Amérique. Cela doit nous amener à défendre le caractère scientifique de la théorie de l'évolution, et ce sans faiblesse. Pour en revenir au début de notre entretien, il faut comprendre que le fait que la théorie de l'évolution soit un objet de controverses entre scientifiques, n'est pas à retenir contre elle. Bien au contraire, une théorie scientifique, répétons-le, n'est pas un dogme et la preuve de sa scientificité est bien qu'elle évolue au fil des expériences qu'elle induit. On assiste parfois même à des révolutions scientifiques qui remettent en cause des pans entiers d'une théorie. Cela ne risque pas d'arriver à l'ancien testament qui est à prendre ou à laisser. À laisser en ce qui me concerne, sauf pour une lecture poétique, mais c'est un autre sujet. Les découvertes de la génétique, génétique des populations, génétique du développement, les expériences de comparaison de séquences, de voies de signalisation, en fait la presque totalité des expériences en biologie, enrichissent la théorie de l'évolution et confirment son caractère heuristique.

*Mais alors d'où viennent que les créationnistes prétendent, pour certains de bonne foi, qu'il s'agit toujours d'une hypothèse ?*

Du fait, très probablement qu'il s'agit d'une science historique. Bien entendu, on ne peut pas d'un coup de baguette magique revenir à il y a 8 millions d'années et refaire expérimentalement le chemin inverse pour démontrer que nous sommes des proches cousins des chimpanzés. C'est impossible, il n'y a pas de

marque arrière. Pour nous en tenir à l'*Homo sapiens* et au chimpanzé, les preuves résident dans la comparaison des anatomies, des génomes, etc., et dans le positionnement des deux espèces, pour tous les caractères étudiés, par rapport à d'autres espèces, en particulier des groupes externes de primates (gorilles et gibbons ou macaques, par exemple). Par la démonstration aussi que les différences entre les génomes concernent des éléments régulateurs ou des gènes de structure qui jouent un rôle important dans le développement, morphologique en particulier. Malheureusement, ces preuves sont trop souvent apportées par les malformations congénitales dramatiques qui accompagnent ces mutations.

*Mais il en est de même du développement et personne ne remet en cause la scientificité de cette discipline ?*

Les deux questions sont très proches, car je ne peux pas, en effet, prendre un animal et le faire revenir en arrière pour voir comment il se serait développé dans des circonstances différentes (nutrition différente, environnement sensoriel enrichi, etc..) ou après modification d'un élément génétique. En revanche il est possible d'expérimenter sur des portées consanguines ou de fabriquer des animaux transgéniques et de suivre leur développement. Ces expériences de transgénèse permettent même de créer des formes nouvelles. C'est là une première ébauche d'évolution expérimentale qui apporte un autre type de preuves à la théorie de l'évolution qui je le répète constitue le cadre de référence de toute la biologie.

*Evo/Devo ?*

Oui Evo/Devo! ■

# Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable

**L'**Académie présente sur son site Internet une nouvelle rubrique destinée au public, intitulée “Libres points de vue d'Académiciens”, afin de répondre à des questions concernant des sujets de science et de société.

À l'approche de la Conférence de Copenhague sur le changement climatique en décembre 2009, le premier sujet abordé concerne l'environnement et le développement durable.

L'Académie a demandé à une trentaine de membres, spécialistes des domaines en jeu, d'exprimer, en toute indépendance, leurs points de vue sur les évolutions du climat, les océans, les énergies, la biodiversité, la démographie et les répercussions sur l'eau, l'alimentation et la santé.

Le dossier “Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable” (81 pages) — dont le Rédacteur en chef est Madame Dominique Meyer, Membre de l'Académie des sciences — a été mis en ligne le 25 novembre 2009. En voici le sommaire :

## I — Les évolutions du climat

I-1 Peut-on expliquer simplement ce qu'est l'effet de serre ? Comment en mesure-t-on les conséquences ? Quelles sont-elles en France ?  
Hervé Le Treut, Michel Petit

I-2 La question se pose pour certains de savoir s'il y a une modification du climat due aux activités humaines. Si oui, par quoi se traduit-elle ?  
Marie-Lise Chanin, Vincent Courtillot et Jean-Louis Le Mouël, Hervé Le Treut, Claude Lorius, Michel Petit

I-3 En France, comment verrions-nous, dans notre vie quotidienne, les effets éventuels d'un réchauffement climatique ?  
Jean-Claude André, Jean-Louis Le Mouël et Vincent Courtillot, Michel Petit

I-4 La Terre a-t-elle connu, dans le passé, des modifications importantes de température ?  
Jean Dercourt

I-5 La France a vécu dans le passé des événements climatiques extrêmes avec pour conséquences des pollutions. Que peut-on faire pour en diminuer les impacts ?

Henri Décamps

I-6 Quelle est la crédibilité des modèles mathématiques pour prévoir les changements climatiques éventuels et leurs conséquences ?

Roger Temam, Jacques Villain

## II- Environnement et océans

II-1 La hausse du niveau des mers et ses conséquences sur certaines régions côtières basses et peuplées du globe sont souvent citées. Qu'en est-il exactement pour les littoraux de la France ?

Anny Cazenave

II-2 L'acidification des océans est-elle réelle ? Menacerait-elle la vie marine ?

Anny Cazenave, Bernard Kloareg

## III- Environnement et énergies

III-1 En France, les émissions de gaz à effet de serre ont considérablement diminué avec notre parc de centrales électronucléaires. Comment peut-on améliorer encore les performances et la sécurité de ce parc et de son cycle de combustibles ?

Robert Guillaumont, Bernard Tissot

III-2 Faut-il utiliser des biocarburants, les mélanger avec les carburants fossiles ? Quels en sont les avantages et les inconvénients ?

Sébastien Candé, Bernard Tissot

III-3 Quel sera pour la France l'apport des éoliennes ?

Bernard Tissot

III-4 a) En Europe : peut-on donner un calendrier de l'utilisation du gaz naturel et du pétrole dans les prochaines décennies ?

b) Certaines des nations ayant de fortes réserves de charbon s'impliquent dans la capture des fumées et le stockage du gaz carbonique. Comment ? Quel rôle l'Europe va-t-elle jouer ?

Bernard Tissot, Sébastien Candé

III-5 Tous les grands pays font des progrès constants vers la mise au point de l'énergie photovoltaïque. La France peut-elle accroître son rôle dans ce domaine ?

Marc Fontecave, Jacques Friedel, Antoine Labeyrie, Didier Roux

III-6 Que pourrions-nous faire en France de plus

pour résoudre les problèmes énergétiques et déployer leurs solutions à l'échelle industrielle, soit seuls, soit dans un cadre européen ?

Robert Daustray, Jean-Marie Tarascon, Bernard Tissot

## IV — Environnement, démographie, eau, alimentation, santé

IV-1 Quelles vont être les conséquences dans le monde des évolutions démographiques respectives par grandes zones continentales ?

La France peut-elle jouer un rôle positif ?

Henri Léridon

IV-2 L'augmentation de la population mondiale aura pour première conséquence un déficit croissant en eau et une altération parfois importante de l'environnement. Comment va-t-on faire face à ces problèmes ?

Roland Douce, Henri Léridon et Ghislain de Marsily

IV-3 En France, y aura-t-il un déficit en eau dans les deux décennies à venir et, si oui, comment résoudra-t-on ce problème, différent de région en région ? Quelles seront les conséquences pour l'industrie agroalimentaire de la France ?

Ghislain de Marsily

IV-4 Que peut-on dire des conséquences sur la santé des divers problèmes liés au changement climatique ?

Bernard Meunier, Maxime Schwartz, Alain-Jacques Valleron

## V — Environnement, biodiversité

V-1 Quelles sont précisément les menaces que les modifications de l'environnement font peser sur la biodiversité ? Peut-on citer des faits déjà survenus en France ?

Henri Décamps, Jean-Dominique Lebreton, Yvon Le Maho, Maurice Tubiana ■

Une conférence franco-allemande sur le thème “ L'imagination et l'intuition dans les sciences ”, co-organisée par l'Académie des sciences, l'Académie des sciences morales et politiques, et la Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, a eu lieu les 7 et 8 novembre 2008 à la Fondation Simone et Cino Del Duca à Paris. Cette conférence inter-académique représente pratiquement la première du genre dans le domaine de l'histoire des sciences et de l'épistémologie. Les orateurs, scientifiques et/ou historiens et philosophes des sciences qui ont été sollicités, Roger Balian (Paris), Patrick Bruno (Grenoble/Halle), Pierre Buser (Paris), Martin Carrier (Bielefeld), Claude Debru (Paris), Stanislas Dehaene (Paris), Anne Fagot-Largault (Paris), Etienne Ghys (Lyon), Marc Jeannerod (Lyon), Yves Jeannin (Paris), Jean-Pierre Kahane (Paris), Andreas Kleinert (Halle), Eberhard Knobloch (Berlin), Pierre Léna (Paris), Yves Meyer (Paris), Walter Michaeli (Aix la Chapelle), Hans-Jörg Rheinberger (Berlin), Bertrand Saint-Sernin (Paris), ont envisagé de nombreux aspects dans l'ensemble du spectre des sciences, des mathématiques à la médecine et à l'ingénierie, de l'histoire au présent.

Outre la grande richesse et la variété des matériaux discutés au cours du colloque, une impression d'ensemble a prévalu : l'importance réelle de facteurs individuels (l'imagination, l'intuition) dans le cours particulier du progrès scientifique, et donc la difficulté de prévoir et de planifier avec précision le contenu même de ce progrès. Il n'est pas dénué de sens que le colloque ait été ouvert et clôturé par deux neurophysiologistes. Pierre Buser a cherché, au début du colloque, à répondre à la question : “où se cache l'inconscient dans la découverte ?”, et a mis en lumière le rôle d'une “ intuition inconsciente ”, d'ailleurs souligné par de nombreux mathématiciens. Dans la conférence terminale, Stanislas Dehaene a montré par des études d'imagerie cérébrale l'existence de représentations intuitives du nombre et de l'espace chez les primates et les jeunes enfants, enracinant ainsi la capacité mathématique dans la phylogenèse et l'ontogenèse. Autre représentant des neurosciences, Marc Jeannerod a montré l'inscription de l'imagination, au sens des représentations mentales, dans l'activité cérébrale telle qu'elle peut être mise en évidence aujourd'hui, et a proposé l'interprétation selon laquelle la simulation par le cerveau de l'action correspondante est le fondement de l'image mentale.

Les mathématiciens Étienne Ghys, Jean-Pierre Kahane, Eberhard Knobloch, Yves Meyer, ont envisagé des aspects très divers de l'imagination et de l'intuition mathématiques. Étienne Ghys a comparé l'ensemble des

# L'imagination dans les

Par **Pierre Buser**<sup>1</sup> et **Claude Debru**<sup>2</sup>

1. Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'université Pierre et Marie Curie.
2. Correspondant de l'Académie des sciences, professeur à l'École normale supérieure.

mathématiques à l'Internet, et a tiré de cette comparaison une analogie entre l'intuition du mathématicien, guidée par les questions qui l'intéressent, et les algorithmes de recherche utilisés par des moteurs de recherche comme Google. Il a proposé une analogie entre la connectivité de Google et la connectivité de l'ensemble des domaines mathématiques, insistant pour finir sur le fait que la connectivité de Google est très inférieure à la connectivité interne du cerveau humain. Eberhard Knobloch a analysé comment la créativité mathématique s'exprime dans la transgression des limites et des restrictions, le travail avec des concepts apparemment dépourvus de sens, nombres imaginaires, séries divergentes, espaces à  $n$  dimensions. L'exemple des géométries non-euclidiennes, celui de la solution du problème de Bâle par Euler (sommation des nombres carrés réciproques) montrent comment les mathématiciens ont dépassé leurs interdits. Yves Meyer, partant de l'intérêt de Goethe pour les cristaux et de la difficulté de ce dernier à poursuivre longtemps les développements des mathématiciens sur la cristallographie, a montré comment ces derniers ont construit de nouvelles structures intellectuelles inspirées par la beauté autant que par la rigueur. Prenant l'exemple des “pavages de Penrose” avec des “quasicristaux”, dont l'existence est bâtie par le raisonnement et non par l'ordinateur, il montre que de telles structures ont été ultérieurement découvertes dans la nature et également comme motifs artistiques sur les murs d'une madrasa à Boukhara en Ouzbékistan. Jean-Pierre Kahane commente un aphorisme de Condorcet, selon lequel les nombres et les figures parlent plus qu'on ne le croit à l'imagination des enfants, et qu'ils sont un bon

# et l'intuition sciences

Albrecht Dürer, Chevêche, 1508.



moyen de l'exercer sans l'égarer. C'est l'occasion pour lui de citer Evariste Galois, de critiquer le "socle commun de compétences et de connaissances", de signaler l'intérêt de "laboratoires de mathématiques" et, en guise de travaux pratiques, de passer à Platon et son nombre extraordinaire, 5040, divisible par tous de 1 à 12 sauf par 11, à la décomposition en facteurs premiers et au rôle de Théétète comme mathématicien prodige.

Pierre Léna a analysé comment, en astronomie, la réalité a souvent dépassé ce que l'imagination avait conçu, ou ce que des observations inattendues avaient entraîné. Prenant l'exemple de la remarquable fécondité de l'expérience des trous d'Young en astronomie et en physique, il a illustré la manière dont l'imagination et l'intuition ont été stimulées par ce concept expérimental, et comment une expérience connue depuis longtemps a conduit à des développements importants en astronomie.

Andreas Kleinert a examiné comment certaines recherches en électricité au début du dix-neuvième siècle ont été inspirées par l'étude de sculptures antiques représentant la mythologie. Le multiplicateur de Schweigger a constitué un premier galvanomètre, condition pour l'étude des phénomènes électromagnétiques. Étudiant l'œuvre du physicien Ernst Mach d'un point de vue plus philosophique, Gereon Wolters a établi une distinction entre le positivisme issu de l'universalisme des Lumières et le romantisme mettant l'accent sur l'intuition et l'imagination du chercheur individuel. Mach, expérimentateur de génie à l'imagination fertile, peut être vu aussi bien comme un représentant du positivisme issu des Lumières, pourfendeur des absolus, que comme un adepte d'éléments intuitifs dans la connaissance, rapprochant psychologie et physique, éloigné des tendances ultérieures de la formalisation et de l'algorithmique.

Roger Balian a montré comment la physique quantique, dans son formalisme, est porteuse du caractère contre-intuitif et même réellement contradictoire des vérités auxquelles elle parvient. Le paradoxe GHZ (Greenberger, Horne et Zeilinger), qui a trait à un système de trois particules corrélées, est un exemple de ce défi à la logique ordinaire. La logique de la mécanique quantique, tout comme ses probabilités, obéissent à des règles nouvelles, choquantes pour l'entendement commun. Patrick Bruno a étudié la découverte de la magnétorésistance géante par Albert Fert et Peter Grünberg (les deux prix Nobel de physique 2007) et a expliqué par l'étude des carnets de laboratoire, que cette découverte, qui doit beaucoup à l'imagination (une qualité fondamentale du physicien selon Albert Fert), trouvait ses sources dans des travaux pionniers des deux découvreurs dans les années soixante. Yves Jeannin a analysé comment le développement des conceptions chimiques a été déterminé, de diverses manières, par l'imagination des chimistes. La théorie du phlogistique, fruit de cette imagination, a été infirmée par Lavoisier. La découverte des gaz rares dans l'air est un exemple remarquable de l'alliance de la logique et de l'intuition. Les recherches qui ont mené aux caténanes, molécules à l'allure de chaînes, relèvent de processus imaginatifs. Le projet de synthèse du nylon et l'anticipation de ses applications dans la vie courante et de ses développements industriels est un autre exemple de l'impact de l'imagination et de l'intuition.

Pour Walter Michaeli, qui a pris ses exemples dans le design et l'ingénierie, les ingénieurs sont mus par des visions qu'ils transforment en objets techniques, sans avoir toujours une anticipation claire des implications de ce qu'ils inventaient (les frères Wright pour l'aviation, Rudolf Diesel pour le moteur qui porte son nom, inventé pour se substituer aux machines à vapeur). Aujourd'hui, les ingénieurs doivent effectuer des compromis nombreux et variés entre des exigences diverses, leurs idées, les spécifications qui leurs sont imposées, les contraintes financières.

Hans-Jörg Rheinberger a développé les conditions expérimentales de l'approche de l'inconnu, tout particulièrement en biologie moléculaire, en montrant la richesse heuristique des "systèmes expérimentaux" (ainsi qu'il les a baptisés). L'histoire de la biologie moléculaire montre bien comment ces "systèmes expérimentaux" évoluent dans le temps dans une certaine continuité matérielle, tout en permettant de nouvelles et majeures conceptualisations. Claude Debru, prenant l'exemple des recherches de Claude Bernard sur l'action du curare, qui ont abouti à la fois à des conceptualisations majeures et à des imaginations dépourvues de fondement, a analysé comment imagination et raisonnement coopèrent dans la démarche expérimentale, et quels nouvelles procédures

expérimentales (comme l'intoxication partielle de la grenouille) produisent des phénomènes nouveaux sans que l'interprétation de ces phénomènes corresponde nécessairement à celle qui en serait tirée dans une connaissance plus évoluée. Anne Fagot-Largeault a examiné l'œuvre de Charles Nicolle (prix Nobel de médecine 1928) sur l'étiologie des maladies infectieuses, ainsi que sur les facteurs biologiques, qu'ils soient de groupes, individuels, ou subjectifs, de l'invention scientifique. Deux ouvrages de Charles Nicolle, *Le destin des maladies infectieuses*, et *Biologie de l'invention*, ont été mis à profit pour montrer l'irrationalité profonde, au regard de la raison humaine, des procédés utilisés par les micro-organismes pour se reproduire, et donc des procédés utilisés par l'homme pour empêcher leur prolifération. La faculté imaginative développée par les biologistes est comme une "mutation" de l'esprit.

Martin Carrier a développé les points de vue de l'épistémologie la plus récente, mettant l'accent sur la sous-détermination des théories par les faits. La logique "hypothético-déductive" s'accompagne d'une libération de la créativité qui va avec une difficulté croissante se saisir empiriquement des entités et processus théoriques, posant d'une manière nouvelle le problème de la confirmation. Bertrand Saint-Sernin s'est posé le problème de la communication des esprits, ainsi que celui de l'interaction entre esprits créatifs. Il a remarqué que de profonds changements caractérisent à cet égard la science contemporaine par rapport à la science classique. Le rôle de l'imagination s'est accru. La nature de l'interaction entre les esprits a changé, la science étant devenue affaire collective, la communication à distance et la confiance entre scientifiques jouant un rôle croissant.

Le colloque, excellemment organisé par l'Académie des sciences, s'est déroulé dans une atmosphère de très grande cordialité et de coopération, et a donné lieu à des échanges aussi instructifs qu'amicaux. Il a réellement permis de confronter des points de vue souvent opposés. Ceux en particulier sur l'importance respective de l'intuition, travail de recherche du savant solitaire et celle au contraire des études en équipes, aux cadres bien entendu plus rationnels et organisés. L'imagination, cet autre volet de l'esprit créateur, a été largement décrite, expliquée et analysée, que ce soit entre philosophes, chez les mathématiciens, les chimistes ou les biologistes. On retient enfin l'analyse de certaines problématiques actuelles de la physique et de l'astrophysique, qui a permis d'aborder ce qui actuellement constitue des champs auxquels peut encore se heurter notre sens commun du rationnel.

Ce colloque donne lieu à un ouvrage paru en décembre 2009 : Pierre Buser, Claude Debru et Andreas Kleinert. *L'Imagination et l'Intuition dans les Sciences*, Éditions Hermann, Paris ■

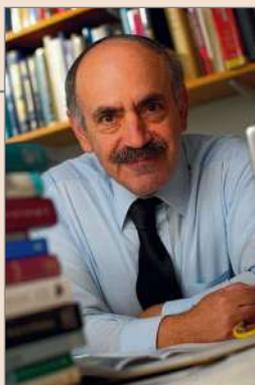
# La Grande Médaille de l'Académie des sciences

**L**a Grande Médaille est une distinction attribuée chaque année, en alternance dans les disciplines relevant de chacune des divisions de l'Académie, à un savant français ou étranger ayant contribué au développement de la science de façon décisive, tant par l'originalité de ses recherches personnelles que par le rayonnement international et l'influence stimulante qu'il aura eu en créant une véritable école de recherche. Les travaux conduits auront concerné un domaine important de la recherche fondamentale et apporté un éclairage nouveau et une compréhension plus grande à la discipline abordée.

## Lauréat 2009 : Robert A. Weinberg

Robert Weinberg, professeur de biologie au Massachusetts Institute of Technology (MIT à Cambridge, est un pionnier de la cancérologie moléculaire et cellulaire. Il est l'un des quelques scientifiques qui ont le plus contribué aux immenses progrès réalisés au cours des 30 dernières années dans notre compréhension de l'origine du cancer. Ses travaux ont grandement participé à améliorer la classification des tumeurs, le diagnostic des cancers et la mise au point de thérapies ciblées, donc plus efficaces et moins toxiques que les traitements classiques.

Après avoir démontré que le caractère tumoral d'une cellule maligne est inscrit dans son génome, Robert Weinberg a identifié en 1982 le premier oncogène humain. En clonant et en séquençant ce gène, le gène *ras*, à partir des cellules humaines d'un cancer de la vessie, il a montré, chez les vertébrés, l'existence de gènes, dits proto-oncogènes, qui peuvent devenir oncogènes à la suite



de simples mutations ponctuelles. Il a également identifié l'oncogène *neu* (ou *ErbB2* ou *HER2*) codant un récepteur membranaire, aujourd'hui cible de traitements chez certaines femmes atteintes de cancer du sein. En 1986, Robert Weinberg a cloné le premier gène humain "suppresseur de tumeur", le gène *Rb* ; il a décrit les premières mutations inactivant ce gène dans le rétinoblastome. Il

a aussi caractérisé le gène humain de la télomérase, une enzyme qui préserve l'extrémité des chromosomes : le maintien anormal en activité de cette enzyme dans les cellules tumorales leur confère la capacité de multiplication illimitée.

En 1999, il a montré que la transformation tumorale de cellules humaines est un processus multi-étapes, qui nécessite la perturbation d'au moins cinq voies de régulation. Au Whitehead Institute for Biomedical Research, qu'il a co-fondé au MIT, Robert Weinberg poursuit aujourd'hui des recherches de pointe sur le pouvoir invasif des cellules tumorales et la dissémination des métastases ; avec son équipe, il a déjà découvert plusieurs facteurs jouant un rôle-clé dans cette phase. Au cours de sa carrière, Robert Weinberg a formé nombre de chercheurs et de médecins, et il a beaucoup œuvré pour la compréhension du cancer par le grand public.

Il a reçu de très nombreux prix prestigieux. Signalons qu'il est Docteur *Honoris Causa* de l'Université Paris-Descartes, depuis 2008.

La Grande Médaille de l'Académie des sciences a été remise à Robert Weinberg sous la coupole de l'Institut de France en séance solennelle, le mardi 24 octobre 2009 ■

# Le Grand Prix Émile Jungfleisch



Le Grand Prix Émile Jungfleisch a été remis à Laurent Meijer en séance solennelle le mardi 13 octobre 2009 sous la coupole de l'Institut de France.

**L**e Prix Émile Jungfleisch, Grand Prix de l'Académie des sciences depuis 2008, est destiné à récompenser un scientifique ayant effectué des travaux dans un laboratoire français et à son équipe dans le domaine de la chimie organique et/ou de la biochimie. Ce Prix peut exceptionnellement être partagé. Un tiers du montant est destiné au responsable de l'équipe et les deux tiers restants serviront à promouvoir le travail de l'équipe.

## Lauréat 2009 : Laurent Meijer

Laurent Meijer, 56 ans, directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), dirige le groupe "Phosphorylation de protéines et pathologies humaines" à la station biologique de Roscoff (Finistère). Ses travaux sur les invertébrés marins (arénicole, oursin, étoile de mer) l'ont conduit à la découverte de molécules potentiellement de grand intérêt thérapeutique.

De l'université de Lille, où il a fait ses études, à la station biologique de Roscoff, en passant par les laboratoires

les plus prestigieux des côtes Est et Ouest des États-Unis, Laurent Meijer a étudié le cycle cellulaire des invertébrés marins. En 1988, il a détecté et caractérisé une enzyme de la famille des kinases, CDK1, activée lorsque les cellules entrent en phase M de division. Il se consacre alors à l'étude de ces protéines kinases, régulateurs essentiels de la multiplication, mais aussi de la mort cellulaire.

Comprenant l'importance, en biologie et en pathologie, du complexe formé par CDK1 avec la cycline B (complexe MPF, pour "M-phase Promoting Factor"), il

isole et caractérise de nombreux composés biologiques inhibiteurs des kinases. Avec son équipe et divers collaborateurs, il obtient la cristallisation de plusieurs couples inhibiteur/kinase. Certains inhibiteurs sont actuellement en phase d'essais pré cliniques ou cliniques (ros-covotine) pour leurs activités anticancéreuses. D'autres présentent un intérêt dans d'autres pathologies, comme la polykystose rénale, la maladie d'Alzheimer ou les accidents vasculaires cérébraux.

Avec le montant du Prix, Laurent Meijer s'attachera à développer un modèle cellulaire original de la maladie d'Alzheimer ■

# Le Prix Microsoft de la Royal Society et de l'Académie des sciences



Le Prix Microsoft, doté de 250 000 euros a été remis à Peer Bork le mardi 17 novembre 2009 à l'Académie des sciences, à Paris, en présence de personnalités de la Royal Society et de Microsoft Research.

**L**e Prix Microsoft de la Royal Society et de l'Académie des sciences, créé en 2006, est un Prix qui distingue et récompense un scientifique ayant contribué de façon majeure aux avancées de la science par l'utilisation de méthodes informatiques, par des travaux dans le domaine des sciences biologiques ou des sciences physiques, mathématiques et ingénierie incluses. Le Prix est ouvert aux scientifiques et aux ingénieurs de toute nationalité résidant en Europe depuis au moins 12 mois avant leur candidature. Le jury est composé de Membres de la Royal Society et de l'Académie des sciences.

## Lauréat 2009/Peer Bork

Peer Bork, 46 ans, de nationalité allemande, directeur de recherche à l'European Molecular Biology Laboratory (EMBL) à Heidelberg (Allemagne), est récompensé pour ses contributions essentielles à la bioinformatique et ses applications en biologie de l'évolution et en médecine.

Ses recherches actuelles portent sur la caractérisation de l'environnement microbien du corps humain et son impact sur la santé de l'hôte.

Peer Bork, l'un des pionniers de la bio-informatique, a étudié des aspects très variés du domaine tels que l'analyse et l'annotation des séquences d'ADN et de protéines, l'analyse des familles de gènes et de protéines, la phylogénèse, la

connaissance des génomes et de métagénomes, la prédiction d'interactions entre protéines, etc. Il est à l'origine de solutions alliant créativité et rigueur scientifique, pour appliquer l'état de l'art de la bio-informatique à l'exploitation des gigantesques volumes de données issues de la biologie à grande échelle. Les promesses de ses recherches sur la nature du microbiome humain portent en germe une nouvelle manière de traiter les maladies.

D'une manière générale, les recherches de Peer Bork représentent un bel exemple du rôle central que joue la science informatique pour relever quelques uns des défis scientifiques mondiaux les plus complexes ■

# Longévité de l'information numérique

Rapport du groupe PSN (pérennité des supports numériques) commun à l'Académie des sciences et à l'Académie des technologies

*Membres du groupe :*

*Erich Spitz, Académie des sciences et Académie des technologies, président*

*Jean-Charles Hourcade, Académie des technologies*

*Franck Laloë, LKB/ENS, rapporteur*

*Éditions EDP Sciences*

**P**ourquoi s'intéresser à la préservation à long terme de l'information numérique, alors que les capacités de stockage n'ont jamais été aussi vastes et bon marché ? C'est que nos sociétés produisent des masses toujours plus grandes d'informations, alors même que la durée de vie des supports numériques disponibles pour la conserver n'a jamais été aussi courte. En effet, si le stockage ou la sauvegarde à court terme ne posent pas de problème particulier, archiver de cette façon sur des décennies ou un siècle pose un tout autre problème, du fait que les supports numériques n'ont qu'une durée de vie de 5 ou 10 ans environ. L'évolution de ces supports étant difficile à prévoir, seul un suivi constant des données et leur migration perpétuelle permettent d'en assurer l'archivage, avec un coût d'organisation important.

Si ce problème est correctement abordé dans quelques organismes publics spécialisés, il est très largement ignoré du grand public ainsi que de la majorité des institutions ou entreprises. Beaucoup d'information

personnelle, médicale, scientifique, technique, administrative, etc., est ainsi en réel danger de disparition.

Devant ce constat, l'Académie des sciences et l'Académie des technologies ont créé un groupe de travail commun, avec l'ambition de faire le point sur le sujet.

Le présent rapport se donne un périmètre précis en se concentrant sur la fraction de l'information qui garde sa valeur à long terme : documents soit personnels (souvenirs familiaux, données médicales, etc.), soit publics (données scientifiques acquises lors d'expériences uniques, etc.). Les stratégies possibles sont discutées et les différents supports de stockage utilisables sont passés en revue, avec une brève discussion de leurs qualités et limitations respectives. Le rapport évalue également la possible généralisation de la stratégie active à l'ensemble des besoins de la société. Enfin sont étudiés les disques optiques numériques enregistrables, pour lesquels une série de mesures alarmantes ont été effectuées récemment. Les auteurs proposent quelques pistes qui pourraient conduire à des disques enregistrables de bien meilleure longévité et ils émettent quatre recommandations de nature à faire prendre conscience de ce problème général et des voies possibles pour le résoudre ■

# Élection de dix-huit Associés étrangers, en séance, le 8 décembre 2009

## Section de mathématique :

**David L. Donoho**, né en 1957 aux États-Unis est Professeur à l'université de Stanford, département de statistique.

**Vladimir Drinfeld**, né en 1954 en Ukraine est Professeur à l'université de Chicago, département de mathématiques. Médaille Fieds en 1990.

## Section de physique :

**Curtis G. Callan**, né en 1942 aux États-Unis, est Directeur du centre de physique théorique à l'université de Princeton.

**Anton Zeilinger**, né en 1945 en Autriche, est Professeur de physique expérimentale à l'université de Vienne et Directeur scientifique de l'institut d'optique quantique et d'information quantique de Vienne.

## Section des sciences mécaniques et informatiques :

**Ingrid Daubechies**, née en 1954 en Belgique, naturalisée américaine en 1996, est Professeur à l'université de Princeton, département de mathématiques et programme de mathématiques appliquées et computationnelles.

**John Raymond Willis**, né en 1940 au Royaume-Uni, est Professeur émérite de mécanique théorique à l'université de Cambridge, département de mathématiques et de physique appliquées (Royaume-Uni).

## Section des sciences de l'univers :

**Giovanni Bignami**, né en 1944 en Italie, est Professeur à l'Istituto Universitario Studi Superiori à Pavie.

**Umberto Cordani**, né en 1938 en Italie, est Professeur émérite à l'Institut des géosciences de l'université de Sao Paulo (Brésil).

## Section de chimie :

**Thomas W. Ebbesen**, né en 1954 en Norvège, est Professeur à l'université de Strasbourg, directeur de l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires, Directeur du centre international de recherche aux frontières de la chimie.

**Georges M. Whitesides**, né en 1939 aux États-Unis, est Professeur à l'université de Harvard, département de chimie et chimie-biologie (États-Unis).

## Section de biologie intégrative :

**Joanne Chory** : née en 1955 aux États-Unis, est Professeur à l'université de Californie à San Diego et Directrice du laboratoire de biologie des plantes au Salk Institute for Biological Studies à La Jolla (États-Unis).

**Miguel A. L. Nicolelis**, né en 1961 au Brésil, est Professeur de neurosciences au Duke University Medical Center (États-Unis) et à l'Institut international de neurosciences à Natal (Brésil).

## Section de biologie moléculaire et cellulaire, génomique :

**Christiane Nüsslein-Volhard**, née en 1942 en Allemagne, est Directeur du département de génétique au Max-Planck-Institute for Developmental Biology à Tübingen (Allemagne).

**Robert A. Weinberg**, né en 1942 aux États-Unis, est Professeur de biologie au Massachusetts Institute of Technology à Cambridge (États-Unis). Grande médaille de l'Académie des sciences en 2009.

## Section de biologie humaine et sciences médicales :

**Roy M. Anderson**, né en 1947 au Royaume-Uni, est Professeur à l'Imperial College of London, département d'épidémiologie des maladies infectieuses de la Faculté de médecine (Royaume-Uni).

**Mary-Claire King**, née en 1946 aux États-Unis, est Professeur à l'université de Washington, département de génétique médicale et département des sciences du génome à Seattle (États-Unis).

## Intersection des applications des sciences :

**Mustapha Besbes**, né en 1941 en Tunisie, Professeur émérite à l'École d'ingénieurs de Tunis.

**Léonard P. Guarente**, né en 1952 aux États-Unis, est Professeur de biologie au Massachusetts Institute of Technology, département de biologie à Cambridge (États-Unis) ■

# Remise des Prix de " La main à la pâte "

**L**uc Chatel, ministre de l'Éducation nationale, porte-parole du Gouvernement, remettra, mardi 2 février à 16 h 30, les Prix de " **La main à la pâte** " décernés sous l'égide de l'Académie des sciences, et en présence d'Hélène Carrère d'Encausse, Secrétaire perpétuel de l'Académie française.

Pour la première fois cette année, deux prix récompenseront des travaux réalisés au collège: le prix " **Que faire dans le monde?...un métier** "\*, et le prix " **Sciences et langue française au collège** "\*, attribué conjointement par l'Académie française et l'Académie des sciences.

L'opération " **La main à la pâte** ", lancée en 1996 à

l'initiative de Georges Charpak, Prix Nobel de physique, Pierre Léna et Yves Quéré, tous trois membres de l'Académie des sciences, vise à promouvoir l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école primaire. Fondée sur la démarche d'investigation, cette pédagogie, concrète et attractive, développe la curiosité et la créativité, le sens de l'observation, le goût pour l'expérience et l'esprit critique chez les enfants.

Depuis la rentrée 2006, sous l'impulsion de l'Académie des sciences et l'Académie des technologies, la rénovation de l'enseignement de ces disciplines se prolonge au collège, en classes de 6<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup>, par l'expérimentation Enseignement intégré de science et technologie.

## Palmarès 2009

### Prix " Science et langue française au collège "

- Collège Jean-Jacques Soulier de Montluçon (Allier).

### Prix " Que faire dans le monde ? ...un métier "

- Collège Emile Zola de Fouquières-lez-Lens (Pas-de-Calais).
- Collège André Malraux de Saint Jean de la Ruelle (Loiret).

### Prix " Écoles primaires "

#### Premiers prix ex-aequo

- École Paul Langevin de Raismes-Vicoigne (Nord).
- École d'Evires (Haute-Savoie).
- École maternelle Jules Vallès à Saint Germain-lès-Arpajon (Essonne).

#### Seconds prix ex-aequo

- École Paul Bert à Besançon (Doubs).
- École maternelle Jean Feidt de Toul (Meurthe-et-Moselle).
- École Jules Ferry à Chappes (Puy-de-Dôme).

- École Jean Jaurès à Gerzat (Puy-de-Dôme).
- École maternelle Les Géraniums à Colmar (Haut-Rhin).

#### Mention spéciale

- École Raphaël Cipolin de Pointe-à-Pitre (Guadeloupe).

### Prix " Mémoires professionnels "

#### Prix ex-aequo

- Maeva Walehiane et Bénédicte Levesque, IUFM de Grenoble.
- Ophélie Toussaint, IUFM de Lorraine.

#### Mention

- Laurence Fischer, IUFM de Versailles.

### Prix " CAFIPEMF\* "

#### Mention

- Myriam Vercoutère, professeur des écoles, maître formateur à l'école d'application Jean Jaurès au Bourget (Seine-Saint-Denis).

\* Ce prix récompense le mémoire d'un(e) lauréat(e) du certificat d'aptitude aux fonctions d'instituteur ou de professeur des écoles maître formateur ■