

surtout après la traduction anglaise de son livre en 1966. Nos classifications ont plus changé en 40 ans que durant les deux siècles précédents. On attribue souvent ces changements à l'usage des comparaisons des séquences d'ADN assistées par ordinateur. Certes, dans les années 1960 ont été publiés les premiers articles dans lesquels on construisait des arbres sur la base de la comparaison de séquences protéiques ou d'ADN. Certes, dans la décennie suivante, les ordinateurs sont devenus accessibles à beaucoup de laboratoires. Mais cela reste une erreur historique. Les premiers articles de ce qui n'était pas encore nommé la « systématique moléculaire » étaient dépourvus d'objectifs classificatoires. Et l'on n'a pas attendu l'émergence de la systématique moléculaire pour invalider les grades de « poissons », « reptiles » [au sens ancien du terme] et autres « invertébrés ». La révolution hennigienne a commencé avant l'ADN et s'est faite parallèlement au développement des études moléculaires.

« Phylogénétique » ne se rapporte pas aux gènes

La mémoire que nous devons à Hennig a ainsi pâti d'une double malchance. Non seulement Hennig a révolutionné une discipline politiquement inaudible au demi-siècle du tout-ADN et de la toute-puissance de la biomédecine moléculaire, mais son mérite s'est retrouvé dilué dans un bouleversement technologique privilégié par la technophilie de nos sociétés de consommation, oubliées du fait que toute vérité ne vient pas de l'ADN et qu'un ordinateur n'invente pas des idées tout seul. Comble du malentendu, la classification phylogénétique revient sur le devant de la scène non pas par la prise de conscience de l'importance de la systématique, mais par celle de l'importance de la biodiversité, qui n'est qu'un objet d'étude de la systématique, entre autres disciplines. Nombre de livres de vulgarisation et de discours politiques bien intentionnés à l'égard de la systématique occultent pourtant les noms des disciplines comme taxinomie ou systématique pour les noyer dans le

terme biodiversité, mélangeant disciplines et objets d'étude.

La phylogénétique ne revient pas sur le devant de la scène parce qu'on reconnaît le coup de génie de Hennig et le fabuleux cahier des charges fixé par Darwin, mais parce qu'on se fourvoie sur l'étymologie du terme. L'expression « arbre phylogénétique » ne signifie pas « arbre fondé sur la comparaison des gènes » ! Comme nous sortons d'un demi-siècle de biologie centrée sur la génétique, on entend « gène » dans « phylogénétique ». Mais Hennig ne travaillait pas sur les gènes. Et lorsqu'il écrivait son livre, la structure chimique du support matériel de l'hérédité était encore inconnue. « Phylogénétique » est l'adjectif se rapportant à « phylogénie », qui vient du grec *phulon* (lignée) et *genesis* (genèse) : l'arbre qui raconte la genèse des lignées.

Pour autant, ne nions pas l'apport des phylogénies moléculaires à nos classifications modernes. Si ces dernières ont tant changé, c'est aussi grâce aux phylogénies moléculaires. Mais Hennig n'a pas de rapport avec celles-ci, lesquelles ignorent en général ce qu'elles doivent à Hennig, jusqu'au cœur de leurs algorithmes.

La systématique est la science des classifications qui dit sur quel organisme travaille le biologiste et comment nommer organes et organismes en même temps qu'elle les replace dans l'histoire du vivant. Pour qu'elle puisse prospérer à nouveau et servir les causes importantes pour lesquelles on la sollicite, il est important qu'elle se fonde sur une culture phylogénétique étendue. Elle ne doit ignorer ni l'héritage hennigien ni les techniques actuelles, et organiser un dialogue entre anatomie comparée et systématique moléculaire. Cette dernière, de même, se doit de revenir à des questions d'homologie et de classification et de modifier son schéma théorique des micro-organismes. La systématique, enfin, doit redevenir une science reconnue avec ses objectifs propres : ordonner le monde vivant et nous le rendre intelligible. C'est-à-dire créer les conditions pour que, tout simplement, nous puissions en parler. Alors seulement nous aurons pris toute la mesure de l'héritage de Hennig. Bon anniversaire, Monsieur Hennig ! ■

■ L'AUTEUR



Guillaume LECOINTRE est professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, où il dirige le Département Systématique et évolution.

■ À ÉCOUTER

Jeudi 5 septembre, Guillaume Lecointre reviendra sur l'importance des travaux de Willi Hennig dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com

■ BIBLIOGRAPHIE

G. Lecointre et H. Le Guyader, **Classification phylogénétique du vivant**, Belin, tomes 1 [3^e rééd. en 2006] et 2, 2013.

F. Girès (sous la dir.), **L'empire des sciences... naturelles**, ASEISTE, 2013.

Q. Wheeler et al., **Heed the father of cladistics**, *Nature*, vol. 496, pp. 295-296, 2013.

Ch. Darwin (trad. Th. Hoquet), **L'origine des espèces** (1859), Seuil, 2013.

Dossier **Systématique : réorganiser le vivant**, *Biofutur* n° 328, janvier 2012.

S. Tillier (dir.), **Systématique, ordonner le vivant**, *Rapport sur les sciences et les techniques de l'Académie des sciences* n° 11, Tech&Doc, 2000.

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

En cette rentrée, faites-vous une opinion sur de grandes questions de société avec la nouvelle collection *InfoGraphie* et ne manquez pas toutes les dernières nouveautés !
Bonne rentrée.

Requins

De la préhistoire à nos jours

Gilles Cuny, Illustrations d'Alain Beneteau

Les requins ? Ils sont presque à égalité avec les dinosaures dans l'imaginaire collectif. Ce livre original, illustré de 200 reconstitutions et photographies, écrit par LE spécialiste français des requins, est riche en informations scientifiques, en sensations et en surprises.

Éditions Belin 2013

224 pages – 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-5423-7



Réf. 005423

Incertitudes sur le climat

Katia et Guy Laval

Les prévisions en matière de climat comportent une part d'incertitude, exploitée par les « climatosceptiques ». Rédigé par deux physiciens hors pair, cet ouvrage fait un point précis sur ce sujet majeur afin que chacun se forge un point de vue clair sur le réchauffement climatique à l'œuvre et la nécessité d'agir.

Éditions Belin 2013

272 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7011-7485-3



Réf. 007485

Nouveauté

InfoGraphie, une collection d'ouvrages résolument graphiques, pour se faire son opinion sur de grandes questions de société !

Le cannabis ?

Marina Julienne

Qui sont les consommateurs de cannabis ? Quels sont ses effets sur la santé ? Le cannabis peut-il aussi soigner ? Comment aider les jeunes à arrêter ? Qui sont les trafiquants de cannabis ? Etc. Voici une synthèse sur le cannabis, riche en infographies, en chiffres clés et en avis d'experts !

Éditions Belin 2013

80 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7011-6380-2



Réf. 006380

La biodiversité ?

Lise Barnéoud

Depuis combien de temps les espèces disparaissent-elles ? Combien de terres sauvages sont-elles chaque année englouties sous l'asphalte ? Reste-t-il encore de la nature « sauvage » ? Etc. Voici une synthèse riche en infographies, en chiffres clés et en avis d'experts, sur un sujet clé du XXI^e siècle.

Éditions Belin 2013

80 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7011-5692-7



Réf. 005692

La procréation assistée ?

Lise Barnéoud

Qui peut y recourir, en France et dans le monde ? Est-ce une solution pour éviter de transmettre une maladie génétique ? Comment débattre des problèmes éthiques et sociaux soulevés ? Etc. Voici un livre riche en infographies, en chiffres clés et en avis d'experts, pour comprendre les enjeux d'une avancée médicale majeure.

Éditions Belin 2013

80 pages – 19 euros – ISBN 978-2-7011-6144-0



Réf. 006144

En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Éditions
Le Pommier

Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Higgs. Le boson manquant

Sean Carroll

Ce livre conte l'histoire de la plus fascinante aventure scientifique de notre temps : la quête du boson de Higgs. La découverte de cette particule élémentaire en juillet 2012 a secoué le monde, tant pour son étrangeté que pour la démesure des moyens déployés. Cosmologiste et vulgarisateur de renom, l'auteur détaille la genèse du projet, mais aussi les rivalités, les doutes et les intuitions géniales de ses acteurs.

Éditions Belin-Pour la Science 2013
400 pages – 22 euros – ISBN 978-2-7011-7685-7



Réf. 007685

LHC : le boson de Higgs

Michel Davier

Le LHC, le plus grand accélérateur de particules du monde, l'instrument scientifique le plus complexe jamais construit, a permis la mise en évidence du mythique boson de Higgs, une particule d'un type nouveau prévue par la théorie, mais qui n'avait encore jamais pu être observée. Quelles en sont les conséquences ? La théorie doit-elle être révisée ?

Éditions Le Pommier 2013
396 pages – 13 euros – ISBN 978-2-7465-0677-0



Réf. 090677*

Les sens trompés

Nouveauté



Réf. 075111

Patrick Verstichel

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans le magazine *Cerveau & Psycho*. L'auteur, médecin clinicien, nous propose des « enquêtes médicales » sur des cas cliniques parfois difficiles à élucider !

Éditions Belin-Pour la Science 2013
160 pages – 25 euros – ISBN 978-2-8424-5111-0

Les mécanismes du sommeil

Sylvie Royant-Parola (dir.)
Joëlle Adrien, Claude Gronfier

Que se passe-t-il quand nous dormons ? Quand nous rêvons ? Que savons-nous du sommeil, de ses cycles, de ses troubles, de ses modifications par notre mode de vie ?

Éditions Le Pommier 2013
192 pages – 10 euros – ISBN 978-2-7465-0676-3



Réf. 090676*

À LIRE AUSSI...

Les premiers outils

Pascal Picq
et Hélène Roche

Éditions Le Pommier 2013
192 pages – 10 euros
ISBN 978-2-7465-0673-2



Réf. 090673*

Enquête sur les créationnismes

Olivier Brosseau,
Cyrille Baudouin

Éditions Belin 2013
336 pages – 21,50 euros
ISBN 978-2-7011-5795-5



Réf. 005795

Nous, les mammifères

Jean-Louis
Hartenberger

Éditions Le Pommier 2013
240 pages – 21 euros
ISBN 978-2-7465-0663-3



Réf. 090663*

Répondre du vivant

Roland Schaefer

Éditions Le Pommier 2013
256 pages – 21 euros
ISBN 978-2-7465-0667-1



Réf. 090667*

Pour commander ces ouvrages

renvoyez le bon de commande ci-dessous

ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie

[sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr]

BON DE COMMANDE

à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande les livres présentés dans la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)	+	€
Total à régler	=	€

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

C.P. : | | | | | Ville : _____

Pays : _____ Tél. : | | | | | | | | | |

Pour le suivi client (facultatif)

E-mail : | | | | | | | | | | @ | | | | | | | | | |

Pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscules).

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ par carte bancaire

Numéro | | | | | | | | | |

Date d'expiration | | | | |

Cryptogramme | | | | |

Signature obligatoire

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐.

LOGIQUE & CALCUL

Au-delà de la loi de Moore ?

La loi de Moore est un cas de loi exponentielle empirique. Certains pensent que des lois de ce type déterminent notre avenir et sont une clef pour comprendre le passé.

Jean-Paul DELAHAYE

La formulation la plus courante de la loi de Moore indique que la puissance des dispositifs informatiques (pour un coût donné) double tous les 18 mois. Elle est assez bien vérifiée depuis plus de 40 ans, mais on annonce aujourd'hui que sa fin est proche. Depuis sa formulation dans les années 1960, il y a toujours eu des sceptiques pour mettre en doute sa validité. A-t-on aujourd'hui de meilleures raisons de penser qu'elle s'épuise et que nous vivons la fin d'une fantastique période qui a vu augmenter d'un facteur un million au moins les performances des technologies numériques (capacité de stockage, puissance de calcul, vitesse de transmission) ?

Les conséquences économiques d'une rupture de la loi seraient graves, tant l'industrie électronique est habituée à ce taux d'accroissement qui lui sert de base pour programmer son développement et décider de ses investissements, au point qu'on a dit de la loi de Moore qu'elle était une prophétie autoréalisatrice. Un ralentissement du progrès perturberait gravement le secteur, en faisant baisser le taux de renouvellement des PC et autres matériels électroniques – ce qui a peut-être déjà commencé.

On affirme aussi que la particularité de l'économie des ordinateurs n'est pas dans l'existence d'une telle loi exponentielle qui en décrit la dynamique, mais seulement dans le temps de doublement (18 mois) très court que l'on y observe. Une étude portant sur des dizaines de technologies montre que des variantes de la loi de Moore y ont

cours, avec des taux de croissance plus bas, mais des dynamiques exponentielles similaires. Il y aurait donc une loi générale affirmant l'existence d'une augmentation exponentielle des performances ou, ce qui revient au même, une décroissance exponentielle des coûts. Cette loi concernerait tous les secteurs économiques fondés sur des développements techniques.

Il est capital de mieux comprendre ces versions généralisées de la loi de Moore dont dépend l'avenir de notre monde. À côté des prévisions de science-fiction que certains tirent, une étrange variante de la loi de Moore apparaît à l'œuvre en biologie et concerne cette fois la complexité des êtres vivants. Même si elle est très discutée, les arguments présentés par Alexei Sharov en sa faveur sont assez soigneusement formulés. Ils conduisent à soutenir l'idée d'une croissance de type exponentiel de la complexité biologique et suggèrent une origine extraterrestre de la vie sur la Terre, idée ancienne déjà défendue par Francis Crick, l'un des découvreurs de la structure de l'ADN. Nous y reviendrons, mais auparavant, voyons ce que dit la loi de Moore et quelle a été sa validité passée.

En 1958, l'Américain Jack Kilby invente, ce qui lui vaudra de partager le prix Nobel de physique en 2000, le premier circuit intégré (on dit aussi puce électronique), qui est rapidement mis en production. Il s'agit d'un dispositif où sont reliés, sur une plaque, plusieurs composants élémentaires, essentiellement des transistors.

Le nombre de transistors qu'on réussit à placer sur une puce électronique augmente

avec régularité dès son invention. C'est en observant cette variation rapide et obstinée que Gordon Moore, l'un des fondateurs de la société *Intel*, formule l'énoncé initial de sa loi.

Diverses formulations

En 1965, il affirme qu'il y a chaque année un doublement de densité des transistors sur les puces et qu'il se prolongera au moins dix ans (voir la figure 1). En 1975, il ajuste sa loi et prévoit alors un doublement de densité tous les deux ans seulement, lui aussi annoncé comme devant se poursuivre une décennie. Traduite pour parler non plus de la densité des transistors sur une puce, dont l'utilisateur se moque un peu, la loi de Moore sous une forme plus vague, mais plus générale et donc plus intéressante, est l'affirmation suivante :

Tous les 18 mois, pour un prix donné, la puissance des dispositifs informatiques double.

La loi concerne aussi bien la capacité de stockage que la puissance de calcul ou la vitesse de transmission de l'information numérique. Puisqu'il y a 60 mois en cinq ans, le petit calcul $2^{60/18} = 10,08$ montre que cette affirmation générale équivaut à l'affirmation plus frappante encore que les performances informatiques sont multipliées par dix tous les cinq ans, et donc par 100 tous les dix ans, et par un million en 30 ans. Ces chiffres étonnants semblent irréels.

Considérons d'abord le nombre de transistors présents dans un microprocesseur. Nous sommes passés de 2 300 transistors en 1971 pour la puce *Intel-4004* à