

BIBLIOGRAPHIE

B. Zygelman,
**A First Introduction
to Quantum Computing
and Information**,
Springer, 2018.

P. Senellart et al.,
**High-performance
semiconductor quantum-
dot single-photon
sources**, *Nature
Nanotechnology*, vol. 12,
pp. 1026-1039, 2017.

M. A. Nielsen et I. L. Chuang,
**Quantum Computation
and Quantum Information**,
Cambridge University
Press, 2010.

D. Mermin, **Calculs
et algorithmes quantiques**,
EDP Sciences
et CNRS Éditions, 2010.

développer l'ordinateur quantique, les simulateurs, les communications et les capteurs quantiques, tout en maintenant un effort de recherche fondamentale. Cet investissement financier n'est finalement pas énorme, si l'on songe que la somme va se répartir sur l'ensemble de la communauté européenne. L'attribution des financements est démocratique, ce qui a du bon, mais cela empêche de concentrer l'investissement dans les projets les plus avancés. Personnellement, pour le moment, j'ai demandé dans ce cadre le financement de deux projets de recherche, mais je n'ai rien obtenu... Je n'ai pas été assez convaincante.

Il semble donc que la cavalerie européenne arrive, sans trop se presser... Comment cela se passe-t-il ailleurs ?

Je connais par exemple le cas des Chinois. En 2017, ils ont déjà secoué la communauté quantique internationale en mettant en œuvre une communication quantique depuis un satellite, alors que l'idée de faire cela avait été poussée en Europe, notamment par Anton Zeilinger, de l'université de Vienne. Les Chinois déploient déjà un réseau de communications quantiques sur des milliers de kilomètres. Au fil de nos progrès sur les sources de photons uniques, qui nous ont permis de relancer les travaux sur l'ordinateur optique, des équipes chinoises se sont engouffrées dans cette filière. Elles avancent extrêmement vite, sont fortes, ont de gros effectifs et n'ont apparemment pas de limites aux moyens qu'elles peuvent demander... Depuis peu, le chef de l'une de ces équipes explique dans les conférences que la Chine va démontrer l'avantage d'un ordinateur quantique par rapport aux plus gros calculateurs classiques grâce la technologie optique. Clairement, les Chinois ont mis un grand coup d'accélérateur sur les technologies quantiques.

Pour autant, l'ordinateur quantique est-il un objectif réaliste ? Pensez-vous que l'on arrivera

à intriquer des millions de qubits et que l'on saura maintenir la cohérence quantique assez longtemps pour effectuer de gros calculs ? Certains physiciens éminents, le Prix Nobel Serge Haroche notamment, ont déjà avancé l'idée que cela pourrait rester une utopie...

Comme tous les physiciens qui travaillent à maîtriser les effets quantiques subtils – l'intrication, la décohérence – pour rendre possible le calcul quantique, je vois l'énormité des obstacles à franchir et ils m'intimident. Quand j'y pense, j'ignore ce qui va se passer. Mais ça, c'est de la pensée linéaire, alors que nous sommes, avec tout ce qui est technologique, dans un domaine non linéaire, où l'on avance par des ruptures, comme l'illustrent les progrès permis par nos nouvelles sources de photons uniques.

Vos confrères pensent-ils comme vous ?

En 2015, j'ai participé aux États-Unis à un séminaire de réflexion sur la construction des futurs réseaux quantiques, où étaient invités des physiciens développant comme moi les composants quantiques, des théoriciens des réseaux quantiques et des gens des grandes entreprises de télécommunication, qui ont vécu la révolution de l'Internet à haut débit. Quand ils nous ont entendus rivaliser de prudence en évoquant nos difficultés pour avancer, leur message a été : « Mais arrêtez de vous prendre la tête ! Vous verrez. » De fait, même si l'on m'avait dit il y a dix ans que mon domaine ressemblerait à ce qu'il est aujourd'hui, je n'y aurais pas cru. Si l'on se rappelle où en étaient les télécommunications dans les années 1960, quand des opératrices connectaient les gens à l'aide de fiches dans des standards téléphoniques, est-ce que quelqu'un de cette époque aurait cru qu'aujourd'hui nous aurions tous à la main un petit ordinateur supercommunicant, capable de télécharger sans contact des films en quelques secondes, de synchroniser son horloge, de se connecter à un réseau mondial appelé Internet, de faire calculer à distance un trajet, de payer, etc. ?

Nous pouvons donc croire aux ordinateurs quantiques ?

Comment dire ? Le chemin que nous avons suivi pour aller du stade où nous en étions à l'époque des communications par sémaphores, au XVIII^e siècle, à celles de notre quotidien a aussi été une succession de promesses faites, d'échecs à les satisfaire, puis d'inventions d'alternatives ouvrant sur de nombreuses possibilités auparavant insoupçonnées. J'ai l'impression que dans la quête de l'ordinateur quantique, la même chose se passe... à un rythme effréné. ■

Propos recueillis
par François Savatier

**Les équipes chinoises
avancent très vite pour
démontrer l'avantage de
l'ordinateur quantique**

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

Depuis que, il y a cent soixante ans, Darwin a posé les bases de la théorie de l'évolution, celle-ci n'a cessé d'évoluer. Au départ construite à partir de descriptions de zoologie, botanique et paléontologie, elle s'est peu à peu rapprochée de la génétique, de l'embryologie et, plus récemment, de la génomique, de l'épigénétique et même de l'écologie. Chaque discipline a ouvert de nouveaux horizons, révélant un matériel génétique très dynamique, bien plus qu'on ne le pensait. Brassage génétique, dérive aléatoire, transfert de gènes, transposons, contrôle épigénétique, influence de l'environnement... dessinent le nouveau visage de la théorie de l'évolution.

Le nouveau visage de la théorie de l'évolution

L'ESSENTIEL

> Au milieu du xx^e siècle, les résultats majeurs de la génétique ont servi à bâtir un cadre conceptuel explicatif de l'évolution biologique telle que décrite par la zoologie, la botanique et la paléontologie : la théorie synthétique de l'évolution.

> Au fur et à mesure des avancées, en particulier avec

l'émergence de la biologie moléculaire, ce cadre s'est considérablement enrichi.

> Depuis une dizaine d'années, certains biologistes souhaitent une « synthèse évolutive étendue ». L'intégration de nouvelles disciplines comme l'évo-dévo ou l'épigénétique paraît amplement justifiée.

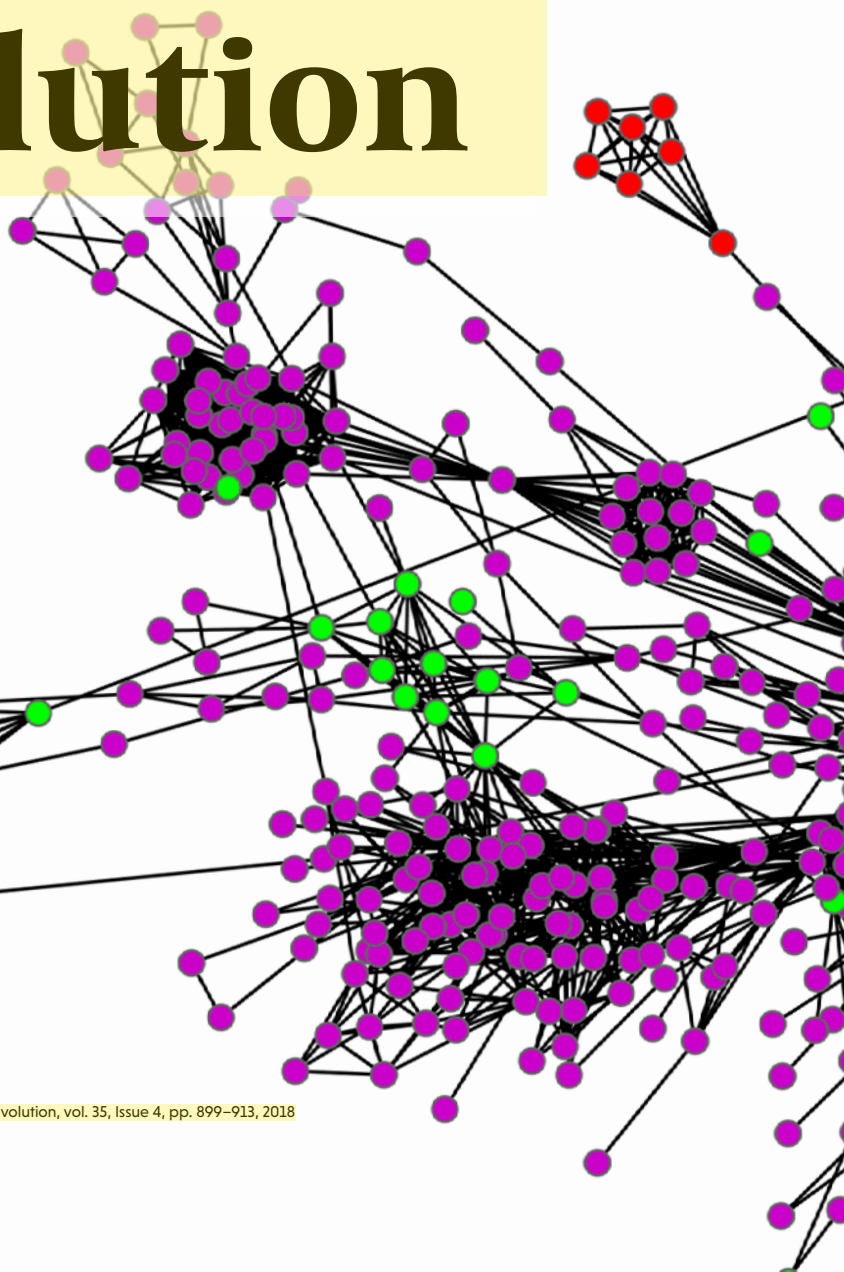
L'AUTEUR



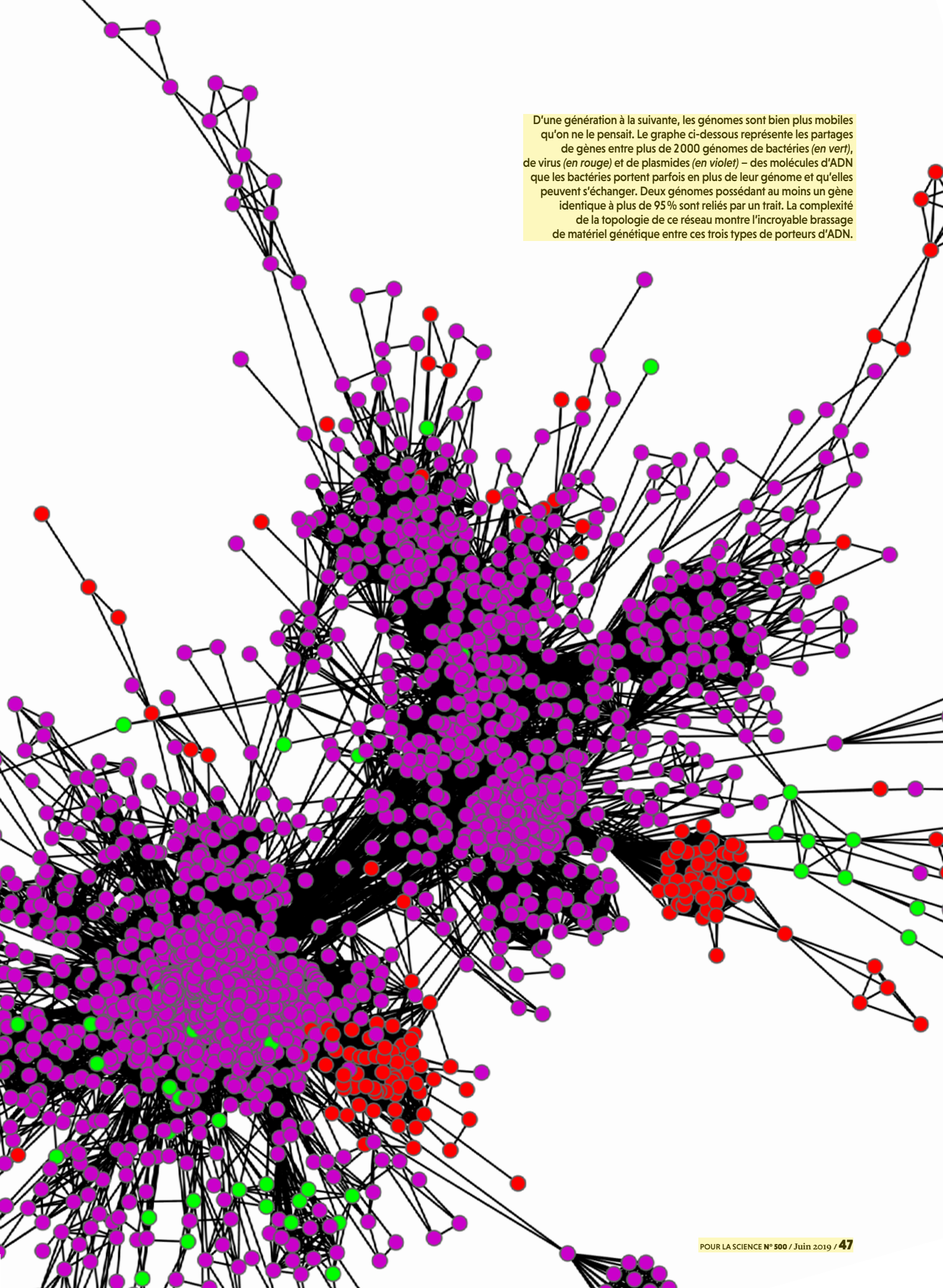
HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie évolutive à Sorbonne Université, à Paris

Les mutations de la théorie de l'évolution

La théorie de l'évolution ne cesse d'évoluer depuis sa première formulation par Darwin, en 1859. Aujourd'hui, on s'aperçoit que d'un organisme à un autre, d'une génération à la suivante, le matériel génétique varie d'une façon que l'on ne soupçonnait pas il y a peu. Gigantesque Lego où tout est modulaire, il donne prise à la sélection naturelle... ou non.



D'une génération à la suivante, les génomes sont bien plus mobiles qu'on ne le pensait. Le graphe ci-dessous représente les partages de gènes entre plus de 2000 génomes de bactéries (en vert), de virus (en rouge) et de plasmides (en violet) – des molécules d'ADN que les bactéries portent parfois en plus de leur génome et qu'elles peuvent s'échanger. Deux génomes possédant au moins un gène identique à plus de 95% sont reliés par un trait. La complexité de la topologie de ce réseau montre l'incroyable brassage de matériel génétique entre ces trois types de porteurs d'ADN.



« Rien n'a de sens en biologie, si ce n'est à la lumière de l'évolution », en version originale: *Nothing in Biology Makes Sense*

Except in the Light of Evolution. C'est par cet essai au titre devenu célèbre qu'en 1973, le généticien américain Theodosius Dobzhansky, un des fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution, a répondu aux attaques créationnistes de l'époque. Plus de quarante ans plus tard, cette phrase est plus que jamais d'actualité. Comme la génétique, la théorie de l'évolution a envahi toutes les disciplines de la biologie, des plus anciennes, comme la classification, aux plus récentes, comme la génomique; décrypter un génome ne peut se faire que par les outils issus de la biologie évolutive. Enfin, de nombreuses applications, que ce soit en génétique humaine ou en lutte biologique, en découlent.

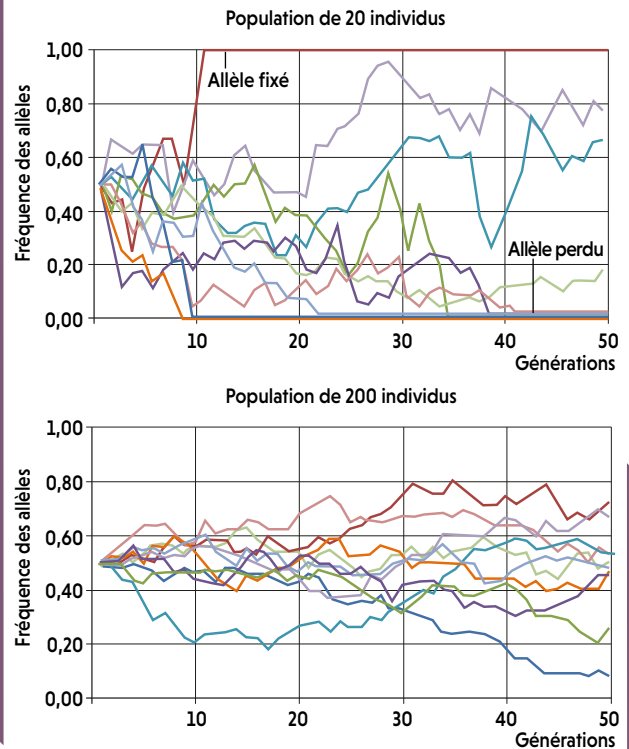
Notre vision de la théorie de l'évolution, cependant, a elle-même bien évolué ces dernières décennies, et Dobzhansky serait sans doute surpris. Le génome est beaucoup plus fluide qu'on ne le pensait: il subit au fil des générations bien plus de modifications que de simples mutations ponctuelles. Même la sélection naturelle est tombée de son piédestal: elle n'est plus le seul moteur de l'évolution, comme la théorie synthétique de l'évolution le postulait. Aujourd'hui, l'évolution est plutôt vue comme un processus multifactoriel ayant pour matière première l'étonnante plasticité du matériel génétique.

COMMENT CLASSER LE VIVANT ?

Pourtant, la théorie synthétique de l'évolution que Dobzhansky a contribué à élaborer avait déjà effectué une sérieuse avancée en accordant la théorie de l'évolution de Charles Darwin avec la génétique naissante. Darwin avait été le premier à répondre clairement, en 1859, dans *De l'origine des espèces*, aux deux questions fondamentales que se posaient les premiers transformistes tels que les philosophes Pierre Moreau de Maupertuis et Denis Diderot au XVIII^e siècle, puis le naturaliste Jean-Baptiste Lamarck à l'aube du XIX^e: quelle logique doit-on suivre pour établir une véritable classification naturelle des organismes vivants? Quels processus sont à la source de la transformation des organismes vivants? À la première, Darwin avait répondu par le principe de descendance avec modification: *descendance* des caractères héréditaires, qui sont transmis de génération en génération, et *modification* de ces caractères, qui peuvent acquérir un nouvel état, lui aussi héréditaire. Ce principe a pour corollaire l'existence d'une «généalogie» des espèces: la classification naturelle doit être le reflet de cette histoire, de ces apparentements que l'on fait émerger en décelant des caractères homologues, c'est-à-dire hérités d'un ancêtre commun.

LA PART ALÉATOIRE

On a longtemps cru que seule la sélection naturelle entraînait la fixation d'un allèle – un variant d'un gène – dans une population. La découverte de mutations neutres, sans effet particulier, mais elles aussi fixées, a remis en lumière la dérive génétique, proposée dès 1931, mais oubliée ensuite: par hasard, un allèle peut persister et s'installer dans une population. Un allèle neutre a besoin d'un nombre de générations égal à quatre fois l'effectif efficace (le nombre d'individus en âge de se reproduire) pour se fixer. En conséquence, plus la population est petite, plus il se fixe vite (voir la simulation ci-dessous). C'est ce qui se passe lors d'un effet fondateur, c'est-à-dire l'individualisation d'une petite population, par exemple après migration ou lors d'un goulot d'étranglement, quand une population se réduit considérablement après une épidémie.



Conjointement avec le naturaliste britannique Alfred Wallace, Darwin avait aussi proposé la sélection naturelle comme processus majeur de l'évolution: dans une même espèce, certains individus ont une plus grande descendance que d'autres, et donc leurs caractères sont plus (ou moins) représentés à la génération suivante, suivant les conditions de vie. En quelque sorte, l'environnement opère un tri parmi la diversité d'une même espèce. Darwin insistait sur le fait que la sélection naturelle n'était certainement pas le seul mécanisme de l'évolution. Toutefois, à une époque où la biologie était encore balbutiante, il ne pouvait guère aller plus loin. L'avancée déterminante a été réalisée lorsque les concepts majeurs de la génétique de la première moitié du XX^e siècle ont rejoint les déjà riches descriptions de la zoologie, de la botanique et de la paléontologie.