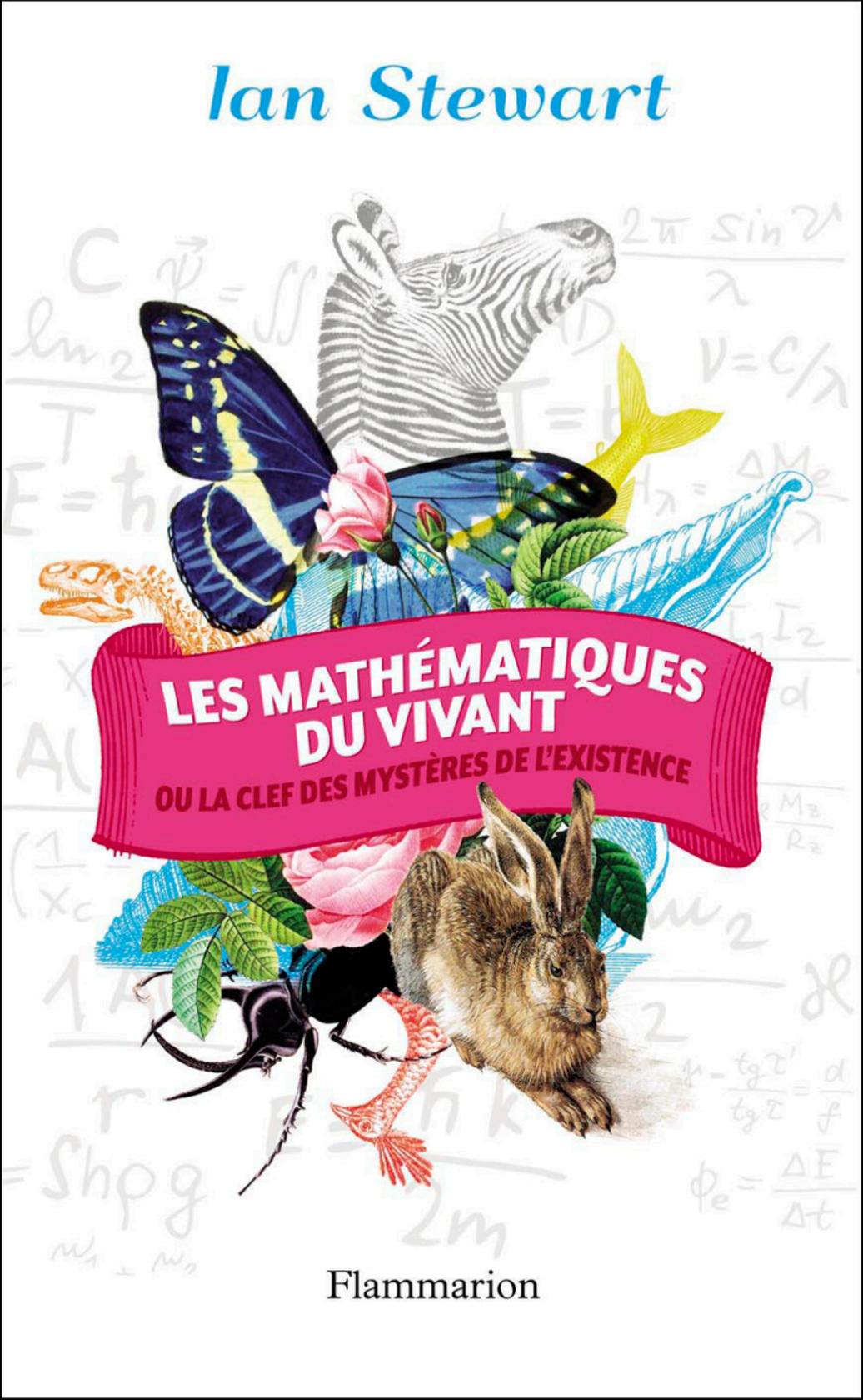


Ian Stewart



**LES MATHÉMATIQUES  
DU VIVANT**

**OU LA CLEF DES MYSTÈRES DE L'EXISTENCE**

Flammarion



**L**a biologie a connu cinq révolutions : le microscope, la classification de Linné, la théorie de l'évolution, les découvertes du gène et de la structure de l'ADN. Une sixième révolution est en marche : on la doit aux mathématiques. Qu'il s'agisse du Projet génome humain, de la biochimie de la cellule ou des processus qui régulent le développement des organismes, la biologie, grâce aux mathématiques, n'a jamais été aussi près d'élucider les mystères du vivant.

Avec un enthousiasme communicatif, Ian Stewart décrit les passerelles qui existent entre la théorie des graphes et la classification des êtres vivants, la géométrie en dimension quatre et la forme des virus, la théorie des nœuds et la structure des brins d'ADN, la théorie des jeux et les stratégies de reproduction, la théorie du chaos et la dynamique des populations, les automates cellulaires... et la définition de la vie.

Pour Ian Stewart, la biologie est le grand territoire à conquérir du XXI<sup>e</sup> siècle, et les mathématiques le moteur de nos avancées les plus spectaculaires.

**Ian Stewart** (né en 1945), lauréat du prix Faraday en 1995 et membre de la Royal Society depuis 2001, est directeur du Mathematics Awareness Centre de Warwick (Royaume-Uni). Il est notamment l'auteur aux éditions Flammarion de *Dieu joue-t-il aux dés ?* (1992), de *Mon cabinet de curiosités mathématiques* (2009) et de *La Chasse aux trésors mathématiques* (2010).

Traduit de l'anglais  
par Olivier Courcelle

Flammarion

LES MATHÉMATIQUES  
DU VIVANT

DU MÊME AUTEUR

- Ah, les beaux groupes*, Belin, 1982  
*Les Fractals*, Belin, 1982  
*Oh catastrophe*, Belin, 1982  
*Les Mathématiques*, Pour la science, 1989  
*Dieu joue-t-il aux dés ? Les mathématiques du chaos*, Flammarion, 1992 ; rééd. coll. « Champs », 1998, 2013  
*Visions géométriques*, Pour la science, 1994  
*La nature et les Nombres*, Hachette, 1998 ; rééd. coll. « Pluriel », 2000  
*L'Univers des nombres*, Pour la science, 2000  
*La Science du Disque-monde* (avec T. Pratchett, J. Cohen), Atalante, 2007  
*Ta moitié est plus grande que la mienne ! Comment couper équitablement un gâteau, et 19 autres énigmes mathématiques*, Dunod, 2007  
*La Science du Disque-monde II. Le globe* (avec T. Pratchett, J. Cohen), Atalante, 2009  
*Mon cabinet de curiosités mathématiques*, Flammarion, 2009 ; rééd. coll. « Champs », 2013  
*La Chasse aux trésors mathématiques*, Flammarion, 2010  
*Arpenter l'infini. Une histoire des mathématiques*, Dunod, 2010  
*Les Divagations mathématiques de Ian Stewart*, Dunod, 2011

Ian Stewart

LES MATHÉMATIQUES  
DU VIVANT

ou La clef des mystères de l'existence

*Traduit de l'anglais par Olivier Courcelle*

Flammarion

Copyright © Joat Enterprises, 2011.

Tous droits réservés.

L'ouvrage original a paru sous le titre *Mathematics of Life. Unlocking the  
Secrets of Existence* aux éditions Profile Books.

Traduction © Flammarion, 2013.

ISBN : 978-2-0812-8674-0

## Préface

Science et techniques ont toujours progressé de concert : les premiers hommes enregistraient les phases de la Lune par des entailles sur des os ; ceux d'aujourd'hui traquent le boson de Higgs à l'aide du Grand collisionneur de hadrons. Le calcul différentiel d'Isaac Newton a permis de décrire la marche des cieux avant d'être développé et appliqué avec bonheur à des domaines aussi divers que la chaleur, la lumière, le son, la mécanique des fluides, puis la relativité et la théorie quantique. La pensée mathématique s'est peu à peu inscrite au cœur de la physique.

Jusqu'à il y a peu, les sciences de la vie n'étaient guère touchées par cette évolution. Les mathématiques y jouaient au mieux un rôle accessoire. Elles n'étaient utilisées que pour procéder à des calculs banals ou pour tester certaines propriétés statistiques dans des ensembles de données. Elles ne contribuaient ni à la conceptualisation ni à la compréhension de la discipline. Elles n'inspiraient ni de grandes théories ni de grandes expériences. Dans la plupart des cas, leur absence aurait pu passer inaperçue.

La situation aujourd'hui est radicalement différente. Les progrès de la biologie soulèvent une multitude de questions profondes qui ne trouveront pas de réponses sans un attirail mathématique conséquent. C'est un domaine en pleine effervescence. Les problèmes issus des sciences naturelles stimulent

la création de mathématiques entièrement neuves, spécifiquement conçues pour les processus vivants. Les mathématiciens et les biologistes unissent leurs forces pour tenter de répondre à certaines des questions les plus difficiles jamais abordées par l'humanité – dont la nature et l'origine de la vie elle-même.

La biologie est le grand territoire à conquérir des mathématiques du XXI<sup>e</sup> siècle.

L'objet de ce livre est de mesurer le chemin parcouru et de présenter la riche variété des passerelles jetées entre les mathématiques et la biologie, qu'elles regardent le Projet génome humain, la structure des virus, l'organisation de la cellule ou la forme et le comportement d'organismes entiers en interaction dans l'écosystème global. Le lecteur verra aussi comment les mathématiques éclairent d'un jour nouveau les difficiles problèmes posés par la théorie de l'évolution, un domaine où les processus se déroulent sur une durée trop longue pour pouvoir être directement observés et qui repose sur des traces infimes laissées par des événements ayant eu lieu il y a des centaines de millions d'années.

La biologie traitait à ses débuts des plantes et des animaux. Elle est ensuite descendue au niveau de la cellule, puis à celui de la grosse molécule. Pour respecter ce cheminement dans l'étude scientifique du grand mystère de la vie, nous partirons de l'échelle humaine, la plus familière, et suivrons la voie historique du « toujours plus petit » jusqu'à atteindre la « molécule de la vie » : l'ADN.

Le premier tiers du livre se concentrera donc principalement sur la biologie. Nous verrons pourtant déjà, par l'étude historique de la géométrie des plantes, menée de l'époque victorienne à nos jours, que les sciences naturelles peuvent inspirer de belles questions mathématiques. Une fois ce contexte biologique établi, les mathématiques prendront le devant de la scène. Nous parcourrons alors une route inverse, du niveau atomique jusqu'à l'échelle humaine, incluant le

monde de l'herbe, des arbres, des moutons, des vaches, des chats, des chiens...

Les mathématiques abordées emprunteront à de nombreuses spécialités : les probabilités, les systèmes dynamiques, la théorie du chaos, les symétries, la théorie des graphes, la mécanique, l'élasticité... sans oublier la théorie des nœuds. Elles permettront d'éclairer des problématiques biologiques de première importance : structure et fonction des molécules qui orchestrent les processus complexes de la vie, agencements des virus, jeux de l'évolution (encore à l'œuvre aujourd'hui) conduisant à la prodigieuse diversité des formes d'existence, fonctionnement du cerveau et du système nerveux, dynamique des écosystèmes, etc. Certains chapitres porteront même sur la nature de la vie, voire sur ses éventuelles manifestations extraterrestres...

L'interaction entre les mathématiques et la biologie compte parmi les foyers les plus actifs de la science actuelle. De grands progrès ont d'ores et déjà été accomplis, et en peu de temps. Seul l'avenir nous dira jusqu'où ils pourront nous mener. Une chose est sûre : le voyage sera passionnant.

Ian Stewart  
Coventry, sept. 2010



## Mathématiques et biologie

Après avoir longtemps été inséparable de l'observation des plantes et des animaux, la biologie a connu cinq grandes révolutions qui, toutes, ont bouleversé notre conception du vivant.

Une sixième est en marche.

Voici les cinq premières : invention du microscope, classification systématique des êtres vivants, théorie de l'évolution, découverte du gène et découverte de la structure de l'ADN. Passons-les rapidement en revue avant de nous arrêter sur la dernière, qui demandera sans doute plus d'explications.

### *Le microscope*

La première révolution résulte de l'invention du microscope, il y a trois cents ans. En palliant les faiblesses de l'œil nu, ce nouvel instrument nous a permis d'accéder à la stupéfiante complexité de la vie à petite échelle.

Le microscope nous a d'abord révélé que les êtres vivants sont constitués de cellules – un certain nombre de molécules enveloppées dans une membrane perméable. Certains organismes sont composés d'une unique cellule, ce qui n'ôte rien à leur complication : la cellule est en effet un système chimique à part entière. D'autres organismes sont constitués

d'un nombre considérable de cellules : notre corps en contient environ soixante-quinze mille milliards. Chaque cellule est une petite machine biologique dotée d'un mécanisme génétique propre qui la pousse à se reproduire ou à mourir. Il existe plus de deux cents types de cellules : musculaires, nerveuses, sanguines, etc.

La découverte des cellules a suivi de très près l'invention du microscope : dès lors qu'un organisme peut être observé sous un fort grossissement, il est impossible de passer à côté.

### *La classification*

La deuxième révolution remonte à la parution en 1735 du *Systema Naturae* de Charles Linné, médecin, botaniste et zoologue suédois. Voici, traduit du latin, le titre complet de cette œuvre majeure : « Système de la nature, en trois règnes de la nature, divisés en classes, ordres, genres et espèces, avec les caractères, les différences, les synonymes et les localisations. » Passionné par la nature, Linné avait décidé de la cataloguer. Entièrement. La première édition de son inventaire compte onze pages ; la treizième et dernière, plus de trois mille. Linné ne prétendait pas révéler une loi cachée de la nature, mais essayait simplement d'organiser de manière structurée et systématique tout ce qui existait. Son choix se porta sur une classification à cinq niveaux de hiérarchie : règne, classe, ordre, genre et espèce. Au premier niveau venaient le règne animal, le règne végétal et le règne minéral. Il fonda la taxinomie, cette science qui vise précisément à la classification des êtres vivants en différents groupes.

La classification de Linné a connu de nombreuses modifications avec le temps : les minéraux ont été éliminés et d'autres changements ont concerné les plantes et les animaux. Plusieurs systèmes alternatifs ont été récemment préconisés, mais aucun n'a encore fait l'unanimité. Linné avait pris conscience de l'importance cruciale pour la science d'une

classification systématique des êtres vivants et a suivi son idée jusqu'au bout. Il fit çà et là quelques erreurs, par exemple en classant tout d'abord les baleines parmi les poissons, lesquelles ne gagnèrent leur statut de mammifères qu'à la dixième édition du *Systema Naturae*, en 1758, grâce à l'intervention d'un ami ichtyologiste.

La particularité la plus célèbre du système de Linné reste probablement la « nomenclature binomiale », qui consiste à utiliser les expressions *Homo sapiens*, *Felis catus*, *Turdus merula* ou *Quercus robur* pour désigner telle espèce d'homme, de chat, de merle ou de chêne<sup>1</sup>. La classification permet sans doute de briller à bon compte en parsemant sa conversation de mots latins, mais surtout de distinguer clairement et logiquement tous les êtres existants. Une dénomination commune telle que « merle » manque de précision. S'agit-il du merle noir, du merle à ailes grises, du merle des Nilgiris, du merle de l'Himalaya ou de l'une des vingt-six espèces de merles qui vivent aux Amériques ? Le *Turdus merula* de Linné désigne le merle noir sans aucun risque de confusion.

### *La théorie de l'évolution*

La troisième révolution a longtemps couvé sous la cendre avant de se répandre comme une traînée de poudre en 1859, date à laquelle Darwin publia *De l'origine des espèces*. Ce livre, qui a connu six éditions revues par l'auteur, est généralement considéré comme l'une des plus grandes productions scientifiques de tous les temps, au même titre que celles de Galilée, Copernic, Newton et Einstein en physique. Darwin ne propose rien de moins qu'une nouvelle explication à la diversité de la vie.

Les savants comme le grand public pensaient à l'époque que Dieu avait créé chaque espèce séparément, en même

1. Le chat domestique est plus précisément le *Felis sylvestris catus*, mais sa dénomination binomiale reste *Felis catus*.

temps que l'univers tout entier. Cette perspective imposait donc un caractère statique à la notion d'espèce : un mouton avait toujours été mouton et resterait toujours mouton ; un chien avait toujours été chien et resterait toujours chien. En étudiant attentivement un certain nombre de données factuelles, souvent recueillies au cours de ses propres voyages, Darwin se rendit pourtant compte que cette vision traditionnelle ne tenait pas.

Les colombophiles savaient que la reproduction contrôlée permet de donner naissance à des types de pigeons voyageurs très spécifiques. De même pour les vaches, les chiens et tous les animaux domestiques. Mais une intervention humaine était indispensable. Les animaux ne se transformaient pas « de leur propre gré » : il fallait qu'ils soient choisis avec soin – *sélectionnés* – par quelqu'un qui avait un objectif en tête. Darwin comprit que la nature pouvait en principe opérer des variations du même ordre par le biais de la compétition pour les ressources : en période difficile, les animaux les plus aptes à survivre atteindraient l'âge de la reproduction et donneraient naissance à une génération légèrement mieux adaptée à l'environnement.

Darwin sentit que les variations ainsi produites seraient beaucoup moins marquées que celles obtenues par des éleveurs humains, mais qu'elles pourraient aboutir sur la durée à des individus très nettement différents, tant dans la forme que dans le comportement. Son expérience en géologie lui avait donné une conscience aigüe du long terme. Il savait que la Terre existait depuis très longtemps et que les changements les plus insignifiants pouvaient en s'accumulant produire un résultat tangible.

Darwin utilisa l'expression « sélection naturelle » pour désigner le processus qu'il avait mis au jour. On préfère aujourd'hui le terme « évolution », même si Darwin ne l'a jamais utilisé. Les preuves en faveur de la théorie de l'évolution sont aujourd'hui si nombreuses et proviennent de tant de sources indépendantes que la biologie ne se concevrait plus sans elle. Tous

les biologistes ou presque (et la plupart des scientifiques, indépendamment de leur domaine de recherche) sont convaincus qu'elle explique la prodigieuse diversité des espèces actuellement observée. Ce qui n'empêche pas qu'il reste beaucoup à comprendre sur son mode de fonctionnement.

### *La génétique*

La quatrième révolution résulte de la découverte du gène par Gregor Mendel, un travail resté sans écho pendant les cinquante années qui suivirent sa publication, en 1865.

Les qualités observables des organismes telles que la couleur, la taille, la texture ou la forme sont appelées des « caractères » (ou des caractéristiques, des traits). Si divers raisonnements avaient conduit Darwin à penser que ces caractères se transmettaient de parents à descendants, il ignorait tout des mécanismes qui assuraient cet héritage. Pas plus qu'il ne savait que l'hérédité était déjà un objet d'étude quand il rédigeait *De l'origine des espèces*. Ses propres travaux en eussent été substantiellement transformés.

Pendant sept ans, vers 1860, Gregor Mendel, un moine autrichien originaire de Moravie, croisa des plants de pois – 29 000 pieds ! – et compta les occurrences des caractères que présentait chaque génération. Les pois étaient-ils jaunes ou verts ? Lisses ou ridés ? De curieuses régularités numériques apparurent. Mendel se persuada rapidement qu'un organisme vivant abritait des « facteurs » qui déterminaient, d'une façon ou d'une autre, de nombreuses propriétés dudit organisme. Ces facteurs, aujourd'hui appelés gènes, sont hérités des générations précédentes et se groupent par paires chez les espèces sexuées : l'un vient du « père » (l'organe mâle de la plante), l'autre de la « mère » (l'organe femelle). Chaque facteur peut se présenter sous diverses formes. C'est le mélange aléatoire de ces alternatives génétiques, de ces

« allèles », qui produit les lois mathématiques remarquées par Mendel.

À l'origine, on ne savait rien de la réalité physique de ces facteurs. Leur existence était simplement déduite des proportions de plantes qui affichaient telle combinaison de telles particularités au fil des générations.

### *La structure de l'ADN*

La cinquième révolution fut reconnue plus rapidement que la quatrième. Comme la première, elle résulta de l'invention d'une nouvelle technologie expérimentale – en l'occurrence, la diffractométrie de rayons X. Les biologistes ont alors disposé d'un « microscope » capable de leur dévoiler les positions individuelles des atomes dans une molécule et ils ont ainsi pu déterminer la structure de molécules complexes très importantes en biologie.

Dans les années 1950, Francis Crick et James Watson commencèrent à s'intéresser à une molécule trouvée dans la quasi-totalité des êtres vivants : l'acide désoxyribonucléique, aujourd'hui plus connu par le sigle ADN. Crick était anglais. Il avait reçu une formation en physique mais s'était ennuyé lors de la préparation de sa thèse sur la viscosité de l'eau portée à haute température et avait opté pour la biochimie en 1947. Watson était américain. Il avait d'abord étudié la zoologie et s'était intéressé à un type de virus qui infecte les bactéries, les bactériophages (ou mangeurs de bactéries). Son grand objectif était de comprendre la nature physique du gène, c'est-à-dire sa structure moléculaire.

On savait alors que les gènes étaient localisés dans la cellule sur des chromosomes et qu'ils étaient principalement constitués de protéines et d'ADN. Les biologistes pensaient que les organismes pouvaient se reproduire parce que les gènes étaient essentiellement des protéines capables de se répliquer.

L'ADN, quant à lui, était considéré comme un « bête tétranucléotide », un échafaudage qui se contentait d'assurer la cohésion des protéines.

Quelques indices laissaient pourtant déjà présager que l'ADN pourrait prendre une part plus active à la formation des gènes, ce qui suscitait immédiatement la question de sa structure : à quoi ressemble une molécule d'ADN ? Comment les atomes qui la composent sont-ils arrangés ?

Watson et Crick finirent par travailler ensemble. Leur analyse de l'ADN s'inscrivait à la suite de certaines expériences importantes sur la diffraction des rayons X, menées notamment par Maurice Wilkins et Rosalind Franklin. En se concentrant sur quelques points clefs, ils commencèrent à construire des modèles – au sens très littéral du terme puisqu'ils assemblaient des morceaux de carton ou de métal pour représenter les molécules simples dont on savait qu'elles entraient dans la composition de l'ADN. Cet exercice les conduisit à proposer la structure en double hélice désormais célèbre : l'ADN est formé de deux brins, à la manière de deux escaliers en colimaçon entrelacés. Chaque brin (chaque escalier) porte une série de bases de quatre types possible : adénine (A), cytosine (C), guanine (G) et thymine (T). Ces bases vont toujours par deux : un A sur un brin est toujours relié à un T sur l'autre, un C toujours à un G.

Crick et Watson publièrent leurs travaux dans la revue *Nature* en 1953. L'article commence ainsi : « Nous proposons une structure pour le sel de l'acide désoxyribose nucléique (ADN). Cette structure présente des nouvelles caractéristiques qui sont d'un intérêt biologique considérable » ; et précise vers la fin : « Il n'a pas échappé à notre attention que l'appariement spécifique des bases que nous avons proposé [A avec T, C avec G] suggère immédiatement un mécanisme possible de [réplication] pour le matériel génétique »<sup>1</sup>.

1. J. D. Watson, F. H. Crick, « Molecular structure of nucleic acids : a structure for desoxyribose nucleic acid », *Nature*, 171, 1953, p. 737-738 ; « Dossier scientifique », in J. D. Watson, *La Double Hélice*, éd. É. Beaulieu, trad. H. Joël, Hachette, 1984, p. 233-237.

L'idée sur laquelle ils se fondent ici est très simple : la séquence des bases de l'un des deux brins détermine la structure entière. Il suffit de permuter A par T et C par G dans la séquence du premier brin pour obtenir la séquence du second. Si l'ADN était découpé le long des deux brins, chacun d'entre eux posséderait l'« information » nécessaire pour reconstruire l'autre. Il ne resterait alors qu'à fabriquer deux brins complémentaires et à les assembler de nouveau par paires pour obtenir deux copies parfaites de l'original.

La structure de l'ADN proposée par Crick et Watson, toute bricolée qu'elle fût, se révéla correcte. De même que le mécanisme de répllication, de nature tellement spéculative qu'ils n'avaient voulu courir aucun risque en le détaillant dans leur article. L'achèvement de la duplication passe de fait par des processus complexes dont l'étude sera à venir.

L'attention en biologie se focalisa alors brutalement sur l'étude de la structure de composés cruciaux : ADN, protéines et autres molécules associées. Les laboratoires universitaires se séparèrent des botanistes, des zoologues et des taxinomistes – quiconque travaillait avec des *animaux entiers* était définitivement *has been*. L'avenir appartenait aux molécules. Et ce fut leur avènement. La biologie prit un virage définitif. Crick et Watson avaient découvert « le secret de la vie », pour reprendre l'expression que Crick avait claironnée à l'Eagle, un pub sur Benet Street, à Cambridge, quelques jours avant de trouver la structure correcte.

De nombreux progrès importants ont suivi la percée de Crick et Watson. Les détails scientifiques ont beaucoup évolué, mais pas le point de vue lui-même. Ces nouvelles avancées, pourtant, aussi spectaculaires soient-elles, ne constituent pas de véritables révolutions. Dans le cadre du Projet génome humain, par exemple, on a réussi à lister la séquence génétique complète d'un être humain – trois milliards d'unités d'information génétique<sup>1</sup>. Les conséquences de ce

1. La date dépend de ce que l'on entend par « complet ». Une séquence « brute » fut publiée en 2000, une ébauche de séquence dite complète en 2003. La séquence pour le dernier chromosome, le chromosome 1, fut

résultat sont révolutionnaires, ne serait-ce que pour les voies entièrement nouvelles qu'il ouvre au traitement de certaines maladies. La biologie est aujourd'hui la plus excitante des sciences. Elle est riche de promesses en médecine ou en agriculture et laisse aussi espérer une compréhension profonde de la nature de la vie. Mais tout cela est clairement lié à la découverte de la structure de l'ADN.



Voici donc exposées mes cinq révolutions.

Compte tenu du temps qu'il a fallu pour apprécier ces découvertes à leur juste valeur (notamment celle de Mendel), un demi-siècle grosso modo s'est écoulé entre chacune d'entre elles ; pour la troisième, il a même fallu patienter une centaine d'années. La cinquième s'est produite il y a tout juste cinquante ans. Sachant que le monde évolue toujours plus rapidement, la sixième révolution en biologie ne devrait plus tarder. Je pense en réalité qu'elle s'est déjà produite. La vie n'est pas seulement une question de biochimie. De nombreuses autres disciplines scientifiques participent à son explication. Ce qui les unit toutes et dégage de nouveaux horizons ? La sixième révolution : les mathématiques.



Certes, les mathématiques ne datent pas d'hier : il y a 4 000 ans, les Babyloniens résolvaient déjà les équations du second degré et les biologistes eux-mêmes utilisent des techniques mathématiques, principalement statistiques, depuis plus d'un siècle. Il peut donc paraître excessif d'employer dans notre contexte un terme aussi fort que révolution. Mais

---

publiée en mai 2006 dans *Nature*. Il existe certaines lacunes, de sorte qu'il n'est pas faux de dire que la tâche n'est pas achevée. Plusieurs milliers de lacunes connues, d'incohérences et d'erreurs sont actuellement traitées par une équipe de biologistes spécialisés.

c'est un état d'esprit mathématique, une manière de penser, qui intègre désormais la boîte à outils standard de la biologie. Et je ne parle pas seulement d'analyse de données, mais d'une méthode pour comprendre le vivant.

La nature et l'utilité des mathématiques sont souvent mal comprises. On les confond à tort avec les opérations sur les nombres apprises à l'école, c'est-à-dire l'arithmétique. En y adjoignant l'algèbre, la trigonométrie, la géométrie et divers concepts plus modernes comme les matrices, les connaissances scolaires ne représenteront encore qu'une infime partie du monde mathématique. Pas plus du dixième de un pour cent... Et à maints égards, cette partie n'est guère représentative du tout. Les mathématiques enseignées à l'école sont un peu ce que l'exercice quotidien des gammes est à la vraie musique. Sans même parler de *composition* musicale... Les gens pensent souvent que tout a été inventé (ou découvert) en mathématiques depuis longtemps. De nouvelles mathématiques voient pourtant le jour à un rythme impressionnant. Les évaluer à un million de pages par an pécherait par excès de modestie, et il s'agit bien d'un million de pages de nouvelles idées, pas seulement de légères variations de calculs banals.

Les nombres sont à la base des mathématiques, comme les notes le sont à celle de la musique, mais les mathématiques englobent un monde nettement plus large : forme, logique, processus..., tout ce qui a une structure ou une régularité. On peut aussi y ajouter l'incertitude, ce qui paraît d'abord contradictoire, mais les pères fondateurs de la statistique ont découvert que même le hasard suivait des lois, que des événements aléatoires obéissaient à certaines règles, en moyenne et sur des échantillons importants. Les mathématiques utilisées actuellement en biologie sont aussi diverses que nouvelles. La plupart datent de moins de cinquante ans ; certaines ont été élaborées la semaine dernière. Elles vont de la théorie des nœuds à la théorie des jeux, des équations différentielles aux



