LA COULEUR DES IDÉES

SYLVAIN CHARLAT



L'ÉVOLUTION SANS GÊNE

AUX ORIGINES DE NOS ORIGINES

SEUIL

L'évolution sans gêne

SYLVAIN CHARLAT

L'évolution sans gêne

Aux origines de nos origines

ÉDITIONS DU SEUIL
*57, rue Gaston-Tessier, Paris XIX^e^*

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité
de Jean-Marc Lévy-Leblond
dans la collection « La Couleur des idées »,
créée par Jean-Luc Giribone, Jean-Pierre Dupuy
et Jean-Claude Guillebaud.

ISBN 978-2-02-15733-29

© Éditions du Seuil, mars 2025

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.seuil.com

Préambule

D'où venons-nous ?

De cette interrogation ancestrale est née au XIX^e^ siècle une proposition lumineuse : la théorie de l'évolution. Elle saisit, derrière l'être, le processus ; derrière le présent, la dynamique de l'histoire. Charles Darwin, et bien d'autres dans son sillage, en a posé les fondements : des hypothèses, des modèles, mais si intimes du réel, si profondément donneurs de sens, qu'ils tiennent bon, et offrent à la biologie son plus solide point d'ancrage.

L'idée est simple, modeste devant la grandeur de l'explication qu'elle engendre. Supposons seulement l'existence d'entités capables de générer leurs semblables ; en d'autres termes, de se reproduire. Pour parvenir à les imaginer, nommons-les *individus*. Supposons aussi que dans ce processus de reproduction surviennent parfois des erreurs transmissibles à la descendance, et nommons-les *mutations*. Coexistent alors de multiples lignées, semblables mais différentes, distinctes dans le temps présent mais reliées par une ascendance commune, formant comme une arborescence enracinée dans le passé. Nombre d'entre elles rencontrent un jour un obstacle, un environnement défavorable, et s'éteignent. D'autres au contraire tracent leur chemin. Mais quelles sont les lignées survivantes ? Forment-elles un échantillon aléatoire de cette diversité émergente ? Ou au contraire un sous-ensemble biaisé vers des qualités particulières, offrant une plus grande stabilité et une reproduction plus efficace ? Cette simple question donne naissance à la géniale intuition darwinienne : sur la base de différences héritables,

la nature opère aveuglément une sélection des propriétés les plus adaptées aux contingences du moment. De leur accumulation, au cours des générations successives, émerge peu à peu ce singulier couplage entre *structure* et *fonction*, fondateur du raisonnement biologique : affinées au fil du temps par la sélection naturelle, ces propriétés ne sont plus laissées au hasard. Sans être le fruit d'une quelconque intention, elles tiennent des rôles complémentaires, et essentiels à la persistance dynamique du système intégré que dorénavant elles composent : ces structures ont des fonctions.

Ce que nous percevons, tout au fond, cette sensation même d'être au monde, c'est encore cette sève qui coule dans les branches de l'arbre du vivant : reproduction, mutation et donc évolution. Des bactéries aux petits pois, en passant bien sûr par *Homo sapiens*, nous voici les manifestations innombrables et enchevêtrées d'un concours de circonstances fait de hasard et de nécessité[1]. Nécessité de vivre, puisque c'est ce que nous faisons, ou plutôt ce qui nous fait, ce que notre histoire nous a donné en héritage. Et nous voici, « sur les épaules de Darwin[2] », en mesure de penser ce processus et de le parcourir à rebours, sous le prisme d'un champ scientifique : celui de la biologie évolutive.

Raconter cette discipline, pas à pas, présenter les rouages de cette pensée, partager les joies de l'esprit qu'elle inspire, et peut-être les joies du cœur, est la première ambition de ce livre. Mais il en est une autre : celle de pousser le raisonnement jusqu'à son terme, vers les origines de nos origines. Pour bien la saisir, revenons deux paragraphes en arrière : *Supposons seulement l'existence d'entités capables d'engendrer leurs semblables…* Et considérons les implications du premier verbe : « *Supposons…* » Sans mettre en doute la validité du raisonnement, notons qu'il y a là une boîte noire, qui pourrait se révéler boîte de Pandore. Car si, à la réflexion, ces entités n'ont rien de simple, c'est

1. Jacques Monod, *Le Hasard et la Nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, Seuil, 1970.

2. La référence à l'émission de Jean-Claude Ameisen sur France Inter, diffusée entre 2010 et 2022, est explicite. Combien d'heures précieuses, passées en sa bienveillante compagnie, à « voir plus loin, à travers l'espace et le temps », à apprivoiser l'étrangeté du monde…

que leur existence, leur émergence, demande à son tour explication. Ce raisonnement nous mène à une bifurcation, un choix entre deux hypothèses de travail.

La première reste pleinement fidèle à la description de l'évolution résumée ci-dessus : elle demande à d'autres théories de décrire d'autres processus à même de donner naissance à ces entités réplicatives premières, et d'établir ainsi les conditions d'existence de la sélection naturelle. Processus physiques et chimiques, cela va sans dire, mais surtout, processus *non* darwiniens puisque, précisément, ils les précèdent. Cette hypothèse suppose, en d'autres termes, qu'à partir d'un certain stade, en un certain instant, un changement qualitatif a donné lieu à l'existence d'entités capables d'une évolution comparable à celle des organismes actuels. Elle a eu ma préférence aussi longtemps que j'ai ignoré les détails de ce problème, et le diable qui s'y cachait. Sans déjà nous y attarder dans ce court préambule, notons simplement que nombre d'analyses viennent souligner le caractère hautement improbable de cette proposition, nous invitant à explorer d'autres voies.

La seconde hypothèse est légèrement impertinente. Disons, un brin sans-gêne. Elle donne son sens premier au titre de ce livre, puisqu'elle implique de questionner la formulation même du principe de sélection naturelle. Non pas de remettre en cause sa validité en tant qu'explication de l'évolution biologique, mais de pointer son incapacité à saisir la nécessaire continuité du processus qu'elle vise à décrire. Si les entités darwiniennes ne sont pas apparues soudainement, à un instant *t*, c'est qu'une formulation plus générale du principe de sélection naturelle doit être recherchée : une explication plus graduelle, à la fois physique et biologique ; une véritable *articulation* entre ces disciplines et ces systèmes de pensée. Voici ce que je cherche, ce que nous cherchons, avec mes compagnons de route, dans nos laboratoires, sur un coin de table, ou sous la douche. Et je m'émerveille de la difficulté de la question, et de sa capacité à révéler une fragilité du modèle dominant, une tache aveugle de la biologie évolutive. Raconter cette quête, la partager avec le plus grand nombre, est la seconde ambition de ce livre.

Exposons à nouveau la nature paradoxale du problème posé. Dans sa forme actuelle, la théorie de l'évolution repose sur l'existence

d'objets *déjà* biologiques, capables de se reproduire et de connaître des changements héritables ; des objets trop élaborés pour n'être pas envisagés eux-mêmes comme des aboutissements de dynamiques darwiniennes plus élémentaires, et de leur pouvoir de complexification. En bref, l'évolution par sélection naturelle apparaît comme une condition nécessaire de… l'évolution par sélection naturelle ! Encore une fois, reconnaître ce paradoxe n'implique pas de retirer à Darwin ce qui lui appartient : une explication solide et cohérente de l'évolution biologique. Mais elle vient imposer la nécessité de son extension vers une reformulation plus générale. Il s'agit d'imaginer une évolution plus graduelle, qui n'aurait d'abord été darwinienne que de façon très rudimentaire, très « marginale » pour reprendre un terme introduit par Peter Godfrey-Smith[1]. Une évolution que nous ne savons pas encore concevoir, puisque privée de ses concepts cœurs. Une évolution sans individus, et sans gènes, libérée d'un carcan trop étroit pour la contenir tout entière. Une évolution sans entraves.

1. Peter Godfrey-Smith, *Darwinian Populations and Natural Selection*, New York, Oxford University Press, 2009.

I

L'évolution

Premiers pas

Commençons, non par l'épineux problème du commencement, celui des origines, mais par le présent, par la biodiversité d'aujourd'hui. Observons-la, à l'instar du jeune Charles Darwin embarqué à bord du *Beagle* pour un voyage autour du monde, entre 1831 et 1836, en tant que naturaliste de Sa Majesté. Décrivons-la, pour ensuite en chercher l'explication la plus vraisemblable, et poser ainsi les premières pierres de la théorie de l'évolution.

Nous constatons des différences. Certains êtres vivants marchent debout, d'autres grimpent aux arbres. Certains habitent la terre ferme, d'autres nagent. D'autres encore se nourrissent de lumière, et d'autres, innombrables, forment une diversité microscopique qui échappe à nos sens. Mais nous constatons aussi des ressemblances. Nos pieds sont des mains taillées pour la marche. Notre structure vertébrale est à peu de choses près celle d'un poisson. Moins apparent, plus technique, mais tout aussi tangible, notre collagène, la structure même de nos tissus, est partagé par l'ensemble du monde animal, des éponges aux éléphants. Plus profond, plus intérieur, notre appareil respiratoire intracellulaire est commun à l'ensemble des **eucaryotes**[1]. Plus loin encore, notre organisation cellulaire, notre **génome**, les composants

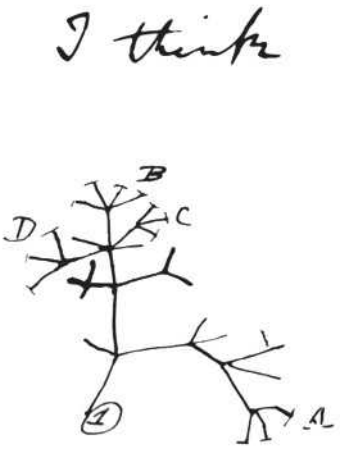
1. Les termes techniques comme celui-ci sont indiqués en gras lors de leur première occurrence, pour signaler qu'ils sont définis dans le glossaire placé à la fin du livre.

moléculaires qui permettent la production de nos **protéines**, est partagée par l'ensemble du monde vivant connu à ce jour.

Darwin, sur son bateau, à partir d'observations accessibles en son temps, a su anticiper ce tableau. D'île en île, de continent en continent, les schémas de ressemblances et différences qu'il a méthodiquement relevés l'ont mené vers l'hypothèse d'une cause unique, d'un seul et même processus qui pourrait expliquer le vivant dans toute sa diversité : l'évolution. En juillet 1837, quelques mois après son retour, il griffonne, laisse couler l'encre de ses pensées : *I think*. Mais les mots se muent en images. Sur la page 36 de son désormais célèbre « carnet B », émerge un petit schéma, qui deviendra une véritable icône des évolutionnistes. A, B, C, D : les tortues, pinsons et pangolins sont devenus les supports d'une abstraction plus vaste, d'un modèle. Ces ressemblances et ces différences, leur agencement dans l'espace (à travers la géographie) et dans le temps (à travers les couches géologiques) peuvent s'expliquer sous l'hypothèse d'une histoire commune, qu'il dessine comme une arborescence. Et plus loin, au bout de cette idée, se trouve une abstraction plus grande encore, un nombre : 1. L'unité. L'hypothèse d'une seule origine, et de son buissonnement. Les avancées futures n'ont fait que remplir les cases laissées vides. Nous savons aujourd'hui que la **divergence** n'est pas le seul processus à l'œuvre (puisque des branches peuvent fusionner aussi, par **symbiose**) mais cette représentation tient bon dans sa logique la plus profonde : une seule origine et une diversification à travers l'espace et le temps. Voici donc posé le principe fondateur de la théorie de l'évolution : l'ascendance commune.

Mais Darwin ne s'arrête pas là. Pour trouver à cette hypothèse, celle de l'évolution, un fondement causal, il cherche un mécanisme, une explication. À une autre échelle, à l'intérieur des **espèces**, il remarque à nouveau des différences et des ressemblances, mais cette fois entre individus, et note qu'elles sont héritables, qu'elles traversent les générations. Il observe que l'être humain a su à loisir choisir des caractères d'intérêt chez les plantes cultivées et les animaux d'élevage, générant ainsi des lignées très dissemblables. Il sait, par sa lecture de l'économiste Malthus, qu'à chaque génération naissent d'innombrables

organismes, alors que peu d'entre eux survivent. Il sait aussi, par sa lecture du géologue Lyell, que de petites causes peuvent produire, sur le temps long, de grands effets. Il agence ces idées et en forge une explication aussi élégante que solide : une découverte, celle de la **sélection naturelle**. Supposons que certains caractères soient, dans un contexte donné, plus favorables que d'autres à la survie et la fécondité. D'une génération à la suivante, par le biais de l'**hérédité**, ces caractères devraient devenir plus fréquents dans la **population**, et d'autant plus si les ressources limitées exacerbent les variations du succès reproducteur. À terme, ils devraient supplanter les formes moins favorables, et envahir la population. En bref, en réalisant que la main aveugle de la nature opère un tri analogue à celui exercé par les humains sur des animaux et plantes d'intérêt, Darwin tient une explication simple et plausible de l'évolution. Et les implications de cette proposition sont plus vastes encore : non seulement elle saisit ce qui meut le vivant à travers les âges, mais élucide aussi l'apparente finalité des structures qui le constituent. La sélection naturelle, en favorisant, pas à pas, ce qui fait vivre plutôt que mourir, permet de comprendre pourquoi un œil semble *fait pour voir* : ainsi s'est-il construit progressivement, parce qu'il *permettait* de voir, ou plutôt de mieux voir, et donc à son porteur de mieux survivre.



Une icône darwinienne. Un petit schéma griffonné, et surtout un déroulement théorique des implications du principe de diversification par divergence : une possible origine unique…

C'est en 1838 que Darwin connaît ce second *eurêka*, soit vingt et un ans avant la publication de *L'Origine des espèces*, l'ouvrage où ces idées seront enfin révélées au grand jour et qui connaîtra le succès que l'on sait. Comme l'a si bien raconté Jean-Claude Ameisen dans son livre *Dans la lumière et les ombres. Darwin et le bouleversement du*

monde[1], il y a derrière cette longue attente le perfectionnisme et la prudence d'un sage, mais aussi la culpabilité d'un homme conscient du cataclysme philosophique et religieux dont il se rend responsable ; un homme qui verse des larmes sur la peine infligée à Emma, sa très pieuse épouse. « C'est comme confesser un meurtre », écrit-il en 1844 à son ami le botaniste Joseph Dalton Hooker, et l'on devine de quel irrévocable meurtre il s'agit… Et il y a, derrière la décision de publier enfin ces travaux en 1859, une des plus célèbres convergences intellectuelles de l'histoire des sciences. Car en février 1858, des idées étonnamment similaires germaient sous la forme d'une vision nocturne dans l'esprit fiévreux du naturaliste Alfred Russel Wallace, atteint de paludisme alors qu'il étudiait la faune tropicale de l'archipel des Moluques. Wallace saisit pleinement l'importance de cette découverte et en fait part à Darwin, dont la réputation était déjà établie, dans un court essai qu'il lui adresse au mois de juin. Darwin est bien évidemment interloqué et aiguillonné par un désir de primauté qui mettra rapidement fin à ses atermoiements. En gentleman, il laisse à d'autres le soin de présenter conjointement l'article de Wallace et un court résumé de ses propres travaux devant la Société linnéenne de Londres, à peine deux semaines après la réception de ce courrier décisif. Une année et demie s'écoulera avant que Darwin finalise enfin son livre monument, qui ne laissera aucun doute quant à l'antériorité de sa découverte et la maturité de ses réflexions, que Wallace a d'ailleurs reconnues avec respect et sans amertume. À la lumière de cette saga, la théorie *darwinienne* semble finalement bien nommée : les grandes découvertes flottent toujours un peu dans l'air du temps avant de prendre forme, mais c'est précisément cette forme qui en fait la valeur.

1. Jean-Claude Ameisen, *Dans la lumière et les ombres. Darwin et le bouleversement du monde*, 2008, Paris, Points, « Points. Sciences », 2014.

L'hérédité : de la génétique à l'ADN

La question du mécanisme de l'hérédité, et avec elle celle de l'origine des variations donnant prise à la sélection naturelle, est un terrain que Darwin laisse en friche. Il y a bien ce moine, du nom de Gregor Mendel, qui échafaude depuis 1854, dans le jardin de son abbaye, une folle théorie selon laquelle les caractères héréditaires reposeraient sur la transmission par le père et la mère, le mâle et la femelle, de mystérieuses « particules ». Maintenues intactes à travers les générations, celles-ci pourraient, après avoir été réunies dans un nouvel individu, se trouver à nouveau séparées dans sa descendance. La question de savoir si Darwin a eu connaissance de cette théorie, publiée en 1866, n'a pas été tranchée par les historiens. Quoi qu'il en soit, personne n'a su à cette époque en percevoir le génie visionnaire. L'émergence et l'essor de la **génétique**, ainsi baptisée par William Bateson, devront attendre la fameuse *redécouverte* des lois de Mendel au tout début du XX^e^ siècle. De multiples expériences de croisements impliquant diverses espèces de plantes convergent alors pour indiquer que des éléments bien réels, mais de nature inconnue, sont effectivement transmis par les deux parents sans jamais fusionner. En 1909, Wilhelm Johannsen les nomme **gènes**, et l'on s'éloignera peu à peu de l'hypothèse qui avait cours jusqu'alors, selon laquelle l'hérédité procéderait plutôt d'une forme de mélange des caractères des deux parents.

C'est à cette période qu'une petite mouche, la **drosophile**, fait son entrée dans cette grande histoire. Sous le prisme de la génétique naissante, et sous les rayons X, on constate l'apparition soudaine et radicale de nouveaux caractères : des pattes à la place des antennes, des paires d'ailes supplémentaires. Ainsi naît le concept de **mutation**. Il nourrit les fantasmes des *comics* de l'époque et occupe aujourd'hui encore une place de choix au palmarès des concepts scientifiques adorés et malmenés. Mais ces impressionnantes mutations font aussi leur effet parmi les spécialistes et viennent bousculer l'image, très attachée à la théorie darwinienne, d'une évolution graduelle. S'ensuit une période de confusion, un profond malentendu. Des contradictions internes, la science en rencontre tous les jours, mais rarement d'une

telle portée. En opposant ainsi le **gradualisme** au **mutationnisme**, cet épisode isole pour de longues décennies deux idées, deux ingrédients majeurs de l'évolution, dont l'avenir révélera qu'ils sont pourtant complémentaires : la mutation et la sélection naturelle.

Pour tirer cette affaire au clair, il a fallu que les mathématiques s'en mêlent. Dans les années 1930, notamment autour des travaux de Ronald Fisher, Sewall Wright et J. B. S. Haldane, se dessine une compréhension plus générale des processus évolutifs. La mutation génère des changements majeurs alors que le darwinisme suppose une évolution graduelle ? Qu'à cela ne tienne, on comprend à cette époque que la combinaison de nombreuses variations génétiques discontinues (ou discrètes, au sens mathématique du terme) peut générer une continuité des **phénotypes** : des différences graduelles entre les propriétés des individus. En bref, la mutation propose et la sélection naturelle dispose. Il s'agira, rien de moins, d'une réconciliation entre la génétique, science dominante de l'époque, et le darwinisme, théorie qu'il a presque fallu dépoussiérer après cet épisode d'incompréhension mutuelle. À travers la **génétique quantitative** et la **génétique des populations**, dont ces auteurs ont jeté les bases, sont ainsi posés les fondements théoriques de la grande « synthèse moderne de l'évolution ». Elle tire ce nom (aujourd'hui un peu désuet) du livre éponyme de Julian Huxley, publié en 1942, cinq ans après *Genetics and the Origin of Species* de Theodore Dobzhansky, autre pièce maîtresse de cet édifice. De multiples disciplines, de la génétique à la paléontologie, se trouvent alors réunies en un ensemble cohérent, que l'on dénomme encore de nos jours **théorie synthétique de l'évolution**.

Cerise sur le gâteau : en 1953, la découverte par James Watson, Francis Crick, et Rosalind Franklin de la structure en double hélice de l'**ADN**, et du principe de sa **réplication**, vient offrir un fondement physique, chimique, à la génétique qui était jusqu'alors *phénoménologique*, en ce sens qu'elle étudiait le *phénomène* de l'hérédité sans en avoir ouvert la boîte noire. La suite ne fait que confirmer la pertinence de ce chemin, ou plus précisément de cette immense voie rapide qu'est devenue la biologie, forte de ses fondements moléculaires et cellulaires. Bientôt, on perce les mystères de la production des protéines, ces « machines à tout faire » du vivant, « encodées » dans l'ADN *via* un processus dit « de **traduction** »

dont le caractère algorithmique me laisse encore pantois. Je vois là l'une de ces découvertes grisantes qui pourraient nous faire oublier qu'il n'y a, derrière la nature, aucun concepteur, aucun code secret à décrypter, mais seulement des phénomènes, des enchaînements de causes et d'effets, et des descriptions à *inventer* pour en rendre compte.

Le code génétique : une invention sous contraintes



Voici quelques images de François Jacob, exposant en 1965 dans l'émission télévisée *Visa pour l'avenir*, et avec une passion communicative, une découverte magistrale récente, la pierre de Rosette du vivant : le **code génétique**. Il parle avec justesse d'une avancée majeure de la connaissance humaine.

Question : comment expliquer la production des « machines moléculaires » que constituent les protéines (des assemblages séquentiels de « briques élémentaires », les **acides aminés**, dont quelques-uns des 20 types sont symbolisés sur le tableau de droite par des formes géométriques) ; comment, donc, expliquer la formation des protéines à partir des gènes, composés de séquences d'ADN « écrites » dans un « alphabet » de seulement 4 « lettres » (les nucléotides) ? (Notons que sur deux des images, comme dans les **ARN** messagers dont nous reparlerons, le nucléotide U remplace le T de l'ADN).

Avec un alphabet de 4 lettres, on peut écrire seulement 4 mots de 1 lettre, 16 mots de 2 lettres (c'est encore insuffisant, il en faudrait au moins 20 pour que chaque acide aminé corresponde à une combinaison unique), et 64 mots de 3 lettres. Ainsi, 3 est la bonne réponse, et certains mots seront synonymes. En des termes plus précis et plus techniques, certains **codons** (composés de 3 nucléotides), même s'ils sont différents, induiront la présence du même acide aminé à cette position de la protéine. À ce « petit problème de combinatoire », la nature a « trouvé » la même « solution » que nous. C'est ce que François Jacob raconte dans ce précieux petit film archivé par l'Institut national de l'audiovisuel.

Dans le passage ci-dessus, on pourra juger l'usage des guillemets plus abusif encore que dans le reste du livre. Notons pourtant qu'ils n'entourent

que les termes métaphoriques, qu'il convient d'identifier comme tels sous peine de glisser dans une simplification ambiguë. C'est que les métaphores sont légion dans le monde de la biologie moléculaire, et à vrai dire dans le monde de la biologie en général : tellement utiles, tellement porteuses de sens ! Mais peu à peu, et parce que nous aimons aussi les textes lisibles, nous oublions les guillemets, et insidieusement, les métaphores prennent des airs de vérité. Car comment résister, devant le code génétique, devant la splendeur de ce modèle explicatif, à « la tentation de la vérité », à cette illusion d'avoir trouvé *la* seule et unique explication du phénomène étudié ? En deux mots : la vraie ? Comment tenir bon la barre épistémologique et garder à l'esprit l'inéluctable distinction entre « le mot » et « la chose nommée » ? Voici à mon sens un exercice intellectuel difficile mais sain et nécessaire : si bien ficelés soient-ils, les énoncés scientifiques (ne) sont (que) des modèles, c'est-à-dire des idées, des inventions. Mais des inventions d'une grande élégance qui justifient leur titre de *connaissance* : par un serment fondateur, prêté au nom de la raison, elles se soumettront toujours à l'expérience. Alors d'accord, à strictement parler, le code génétique est une vue de l'esprit ; mais élaborée sous si haute contrainte du réel que certains jours de paresse ou de nostalgie, je crois le voir briller quelque part aux côtés de Platon, dans le monde perdu mais rassurant des vérités éternelles.

C'est l'ère de la génétique moléculaire. Le concept d'hérédité se trouve alors réduit à quatre lettres – A, T, C, G – et cette transition réductionniste, du *phénomène* vers le *mécanisme*, laisse orphelines d'autres composantes de l'hérédité. Ces dernières reviendront un peu plus tard frapper à notre porte (notamment sous le mot-valise d'**épigénétique**) mais les voici pour un temps évincées du raisonnement évolutionniste. Et plus la puissance explicative de ce « modèle réduit » s'avère manifeste, plus la restriction conceptuelle passe inaperçue. Elle devient un impensé, dont nous verrons au chapitre 3 qu'il n'est pas sans poser quelque difficulté à la biologie moderne.

Mutation, dérive et sélection

Profitons pour l'heure du splendide paysage qui défile. Le gène au cœur de l'hérédité. L'ADN au cœur du gène. La mutation au cœur de l'ADN. Le schéma fondamental de l'évolution devient limpide,