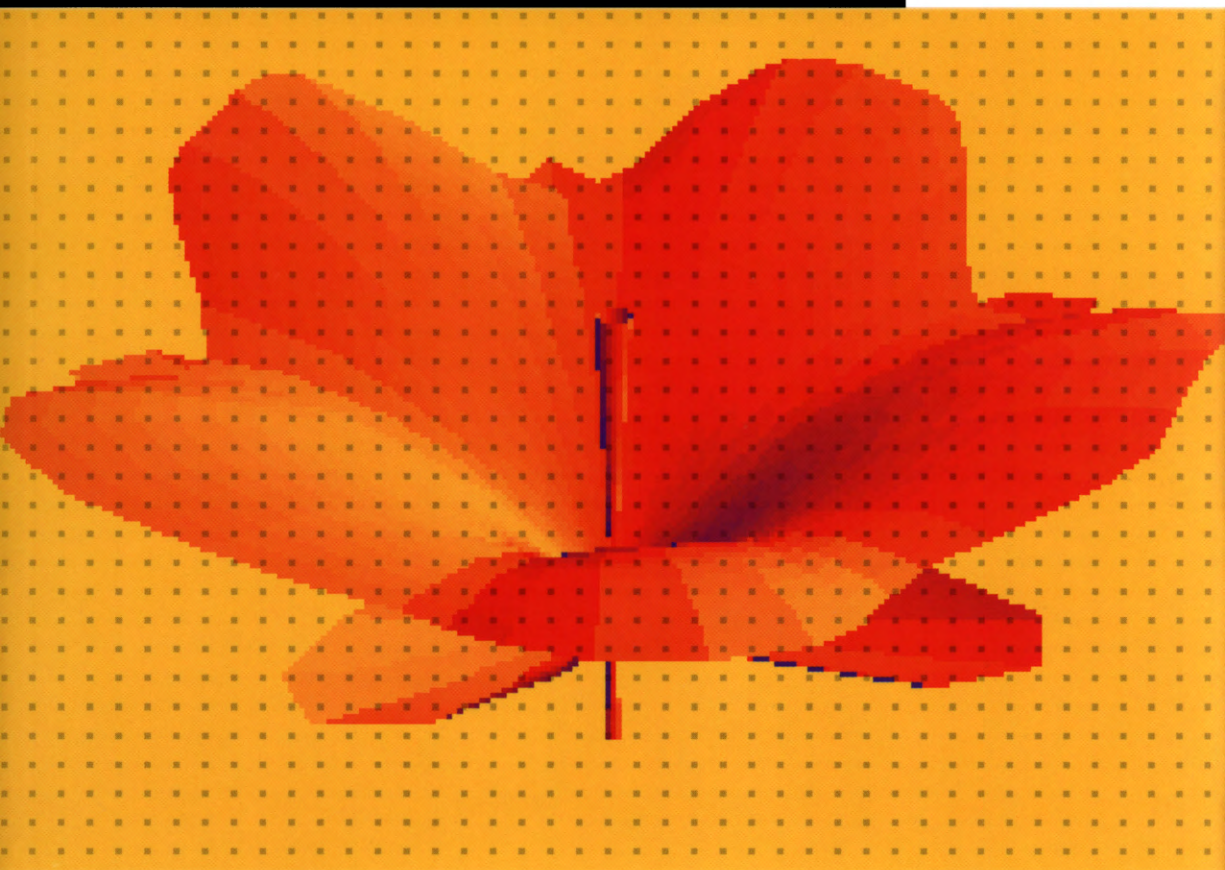


Des fleurs pour **SCHRÖDINGER**

La **relativité d'échelle**
et ses applications



Jean CHALINE
Laurent NOTTALE
Pierre GROU



Des fleurs pour Schrödinger

Des fleurs pour Schrödinger

**La relativité d'échelle
et ses applications**

**Laurent Nottale
Jean Chaline
Pierre Grou**

**avec la participation
d'Ivan Brissaud**



Des mêmes auteurs

Laurent Nottale

Fractal Space-Time and Microphysics: Towards a Theory of Scale Relativity, World Scientific, Singapour, 1993.

La Relativité dans tous ses états. Au-delà de l'espace-temps, Hachette, Paris, 1998.

Jean Chaline

Les Horloges du vivant. Un nouveau stade de la théorie de l'évolution ? Hachette Littératures, Paris, 1999.

Un million de générations. Aux sources de l'humanité, Seuil, Paris, 2000.

Les Merveilles de l'évolution (avec la collaboration de D. Marchand), Éditions universitaires de Dijon, 2002.

Le Monde des fractales. La géométrie cachée de la nature (avec la collaboration de J. Dubois), Ellipses, Paris, 2006.

Quoi de neuf depuis Darwin? La théorie de l'évolution des espèces dans tous ses états, Ellipses, Paris, 2006.

Pierre Grou

L'Aventure économique, L'Harmattan, Paris, 1987.

Unification de la pensée et mondialisation économique. L'Harmattan, Paris, 1997.

Les Grands Défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle (éd. P. Bourgeois et P. Grou), Ellipses, Paris, 2007.

Laurent Nottale, Jean Chaline et Pierre Grou

Les Arbres de l'évolution, Hachette Littératures, Paris, 2000.

ISBN 978-2-7298-5182-8

©Ellipses Édition Marketing S.A., 2009

32, rue Bague 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Les auteurs

Laurent Nottale, astrophysicien, est directeur de recherche au CNRS à l'Observatoire de Paris-Meudon. Après des recherches sur la cosmologie et les lentilles gravitationnelles, il a élaboré depuis 1980 la théorie de la relativité d'échelle, objet de ce livre.

Jean Chaline, paléontologue, spécialiste de l'évolution des espèces, est directeur de recherche émérite au CNRS, où il a dirigé le laboratoire CNRS des Biogéosciences de l'université de Bourgogne. Directeur d'études honoraire à l'École pratique des hautes études, il a aussi assuré la direction du laboratoire de Paléobiodiversité et Préhistoire.

Pierre Grou, est professeur d'économie à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. Il est également sociologue.

Avant-propos

Préambules

Lors d'un séminaire consacré aux « théories de l'évolution », organisé par Pierre Grou à l'université de Saint-Quentin-en-Yvelines, en janvier 1995, de nombreux exposés ont montré les limites de plusieurs théories scientifiques en cours. Manifestement il fallait aller plus loin, les théories ambiantes n'étaient pas satisfaisantes

Lors du déjeuner qui a suivi, nous avons réfléchi à l'existence de points ou de caractéristiques communes aux trois domaines « Univers, Vie et Sociétés », apparemment très différents. Nous avons constaté que ces trois grands systèmes évoluent, qu'ils sont sujets à des ruptures et sont hiérarchisés, c'est-à-dire qu'ils sont structurés en niveaux d'organisation de plus en plus complexes, depuis les niveaux les plus bas jusqu'aux plus élevés. L'espace et les répartitions spatiales y ont un statut spécifique (diffusion, extension). En outre, leur analyse montre la possibilité d'une certaine « prédictibilité, mais à caractère indéterministe », c'est-à-dire la possibilité de prévoir l'existence de structures. Nous avons alors constitué un groupe de recherche pour travailler sur cette problématique dans une approche pluridisciplinaire, osant rapprocher la paléontologie de l'astrophysique et de la socio-économie... Et les résultats sont là, qui montrent la richesse d'une telle démarche.

Post-regard sur Les Arbres de l'évolution : un livre pluridisciplinaire...

Cette réflexion commune a abouti à plusieurs publications et à la rédaction d'un livre, *Les Arbres de l'évolution*, paru en 2000. Là, nous avons esquissé, après l'exposé de la nouvelle théorie de la relativité d'échelle, un premier bilan analytique de l'histoire des trois systèmes et nous en avons tiré un certain nombre de conclusions sous un aspect exclusivement événementiel et empirique. En paléontologie, il apparut que les événements chronologiques des clades bien datés des groupes connus avec assez de détails se répartissaient avec une très grande précision, selon une loi « log-périodique ». Autrement dit, l'arbre de la vie peut

être analysé comme les arbres végétaux, structurés de manière fractale, mais dans le temps au lieu de l'espace. Nous avons alors montré que ce modèle de lois log-périodiques s'appliquait également à l'évolution économique sur de grandes échelles de temps.

D'une approche théorique empirique à une théorie globale de la relativité d'échelle

Aujourd'hui nous voulons dépasser le côté descriptif empirique du livre précédent, même s'il permet déjà des prédictions. Car « *Prédire n'est pas expliquer* », disait avec raison René Thom. C'est pourquoi nous aborderons une approche théorique généralisée de la théorie de la *relativité d'échelle* développée par l'un d'entre nous (L. N.) depuis le début des années 1980, sous une forme tout d'abord « grand public », puis avec son « formalisme » pour les spécialistes.

Dans ce livre que nous dédions à Erwin Schrödinger, qui fut à la fois un des fondateurs de la mécanique quantique et un précurseur de la biologie moderne avec son livre *Qu'est-ce que la vie ?*, nous discuterons les lois d'échelle fractales de type *auto-similaire*, c'est-à-dire où un même motif se reproduit aux diverses échelles, mais aussi leurs généralisations (invariance d'échelle discrète, « covariance d'échelle », « dynamique d'échelle », dimensions fractales variables, etc.), qui permettent de décrire une plus grande complexité des structures en échelles rencontrées dans les systèmes naturels. Puis nous aborderons la question des lois du mouvement de tels systèmes structurés en échelle : la théorie de la relativité d'échelle démontre que ces lois peuvent prendre la forme d'équations du type Schrödinger, dont les solutions possèdent des propriétés statistiques de structuration et de morphogenèse.

Le livre a été découpé en trois parties : 1. la théorie de la relativité d'échelle et certaines de ses applications en sciences physiques (astrophysique, cosmologie, physique des hautes énergies, géosciences), par Laurent Nottale, 2. ses applications en biologie et, en paléontologie, à l'évolution des espèces, par Jean Chaline, et enfin, 3. ses applications en sciences humaines, par Pierre Grou. Des applications réalisées par Ivan Brissaud sont intégrées, sous la forme d'encadrés, dans les textes de Pierre Grou.

Remerciements

Nous remercions vivement Corinne Baud et Briec Bénézet, qui ont accepté ce projet de livre qui présente, dix ans après *La relativité dans tous ses états* (Hachette 1998), la *théorie de la relativité d'échelle* pour le grand public, ainsi qu'une partie plus détaillée proposant une version plus spécialisée du formalisme de la théorie, ainsi que de nouvelles applications réalisées, ou potentielles, en sciences physiques, biogéosciences, biologie évolutive et structures des sociétés.

Les auteurs remercient chaleureusement Ivan Brissaud, ancien directeur de recherche au CNRS, qui a pu tester la loi log-périodique sur des exemples originaux d'évolution de quelques disciplines scientifiques et de systèmes économiques. Il a apporté ainsi, sous forme d'encadrés, une contribution originale à ce livre que nous tenons à souligner.

Jean Chaline remercie plus particulièrement et très chaleureusement ses collègues, Norbert Latruffe, professeur de biologie moléculaire et directeur de l'unité INSERM U866 de « Biochimie métabolique » et nutritionnelle à l'université de Bourgogne, Didier Marchand, maître de conférences en paléontologie à l'UMR 5563 des « Biogéosciences » de l'université de Bourgogne, Bertrand Martin-Garin, maître de conférence au laboratoire de géologie de l'université de Provence à Marseille dans l'EA 4229 des « Systèmes et des Réservoirs carbonatés » et Éric P. Verrecchia, professeur au « Laboratoire de géochimie de la biosphère » de l'Institut de géologie et de paléontologie de l'université de Lausanne (Suisse), ainsi qu'Anne Dambricourt-Malassé, chargée de recherche au CNRS au Muséum d'Histoire naturelle de Paris et Jean-Claude Guimberteau (chirurgien, directeur scientifique de l'Institut aquitain de la Main à Pessac) pour leurs figures inédites. Les corrections, les suggestions et aides de tous ces spécialistes ont beaucoup amélioré le texte des applications biologiques de la relativité d'échelle. Un très grand merci aussi à Anne Sorin pour sa mise en page du livre. Qu'ils en soient tous cordialement remerciés.

N.C.G.

Meudon, Dijon, Saint-Quentin-en-Yvelines

15 octobre 2009

Première partie

***La théorie de la relativité d'échelle
et ses applications en sciences
physiques***

1.1

Présentation générale

La théorie de la relativité d'échelle¹ est une généralisation moderne aux transformations d'échelle des théories de la relativité. Nous allons la présenter de manière générale dans ce chapitre et renvoyons le lecteur au chapitre 4 pour une présentation plus détaillée de son formalisme (voir la bibliographie pour un compte-rendu complet).

Introduction

Les théories de la relativité se sont développées, depuis maintenant plus de quatre siècles, à partir du premier énoncé de relativité du mouvement dû à Galilée autour de 1592. Giordano Bruno, pratiquement à la même époque, découvrait quant à lui la relativité de la position comme conséquence de la révolution copernicienne. En effet, celle-ci, en invalidant l'idée que la Terre soit le centre du monde, permit de concevoir un monde sans centre ni bord, où plus aucun point n'est privilégié pour définir l'origine du système de coordonnées. Il en est de même pour l'orientation des axes de ce système, qui ne peut être définie que de manière relative (c'est-à-dire par des différences angulaires).

De même, *il n'existe aucun mouvement absolu*, autrement dit, dans le repère entraîné avec le mouvement, il n'y a aucun mouvement. Dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Galilée en 1630 écrit :

Le mouvement est mouvement et agit comme mouvement pour autant qu'il est en rapport avec des choses qui en sont dépourvues. Pour toutes les choses qui y participent, [...] le mouvement est comme s'il n'était pas. [...] Le mouvement est comme rien.

Il érigea explicitement cette constatation en principe de relativité du mouvement :

Posons donc comme principe [...] que, quel que soit le mouvement que l'on attribue à la terre, il est nécessaire que, pour nous qui sommes les habitants d'icelle, et par conséquent participants de celui-là, il reste parfaitement imperceptible et comme n'étant pas...

1. Nottale, 1989, 1992, 1993, 1998.

On remarquera que l'énoncé galiléen va droit à l'essentiel et pointe directement, au niveau de la définition même qu'il en donne, l'aspect le plus profond de la relativité : *le mouvement n'existe pas de manière absolue*, autrement dit, dans le repère propre, entraîné avec le mouvement (« *pour les choses qui y participent* ») il n'y a aucun mouvement. Un même corps montre des mouvements différents dans des repères différents, et dans l'un de ces repères, le repère propre (celui du corps lui-même), tout mouvement disparaît. Il s'agit là d'un véritable principe de « *relativité-vacuité* », au sens de l'absence de toute existence propre du mouvement ou de la position. Il ne s'agit pas d'inexistence, ou de néant : mouvement ou position existent, mais pas de manière intrinsèque à l'objet, uniquement comme relation. Leur mode d'être est relatif. Il n'y a pas de mouvement *en soi*.

La *relativité du mouvement* trouva un nouvel élan au début du XX^e siècle avec les travaux de Poincaré et d'Einstein. Leur découverte qu'espace et temps ne pouvaient être séparés, mais sont chacun des projections (l'une tridimensionnelle, l'autre unidimensionnelle), d'un même espace-temps, a révolutionné la physique. Le mouvement lui-même se ramène alors à une rotation (dans l'espace-temps), si bien que ses effets peuvent être compris comme une généralisation à quatre dimensions des effets, bien connus, de changement d'orientation dans l'espace ordinaire tridimensionnel.

Avec la compréhension de la relativité de la gravitation, une nouvelle étape essentielle est franchie par Einstein en 1915. De même qu'un observateur, entraîné dans le mouvement rectiligne uniforme d'un véhicule, ne sent pas ce mouvement, un observateur en chute libre dans un champ de gravitation (c'est-à-dire en mouvement uniformément accéléré), ne sent plus son propre poids. Autrement dit, pour lui la gravitation a disparu, il est en *apesanteur*. Ainsi la gravitation elle-même n'est pas absolue, mais relative au choix de l'état de mouvement du système de référence. C'est ce qu'Einstein a réalisé en 1907, et qui l'a amené à poser le *principe d'équivalence locale* entre un champ de gravitation et un champ d'accélération. C'est ainsi que la théorie d'Einstein est à la fois théorie de la *relativité généralisée du mouvement*, puisqu'elle s'applique aussi aux mouvements accélérés, et *théorie relativiste de la gravitation* [voir une présentation plus détaillée chapitre 4].

Le *principe de relativité d'échelle* est une nouvelle extension du principe de relativité, appliqué cette fois non plus seulement à la position, à l'orientation et au mouvement, mais aussi aux changements d'échelle. Un tel concept s'impose également comme principe fondamental permettant de contraindre la description d'un *espace-temps non différentiable* : on entend

ici par non-différentiabilité l'impossibilité de définir une dérivée (c'est-à-dire la pente d'une courbe), donc une vitesse, au sens ordinaire, et non pas celle de différentier, qui repose sur la continuité de l'espace-temps, propriété essentielle que l'on conserve dans cette approche.

À l'origine de cette théorie, il y a donc une *généralisation de la description du continuum espace-temps*. Alors que la théorie standard suppose que celui-ci est au moins deux fois différentiable (c'est-à-dire que l'on peut définir des vitesses et des accélérations), on abandonne cette hypothèse, ce qui permet de prendre en compte, en plus des espaces-temps courbes ordinaires, des espaces-temps fractals. En effet, on peut montrer qu'un espace continu mais non différentiable *dépend explicitement de l'échelle de résolution* à laquelle on le considère (dépendance qui va jusqu'à la divergence quand l'échelle tend vers zéro). Autrement dit, un continuum non différentiable se caractérise par sa *géométrie fractale*.

Ce résultat essentiel (qui est un théorème mathématique) joue un rôle fondamental dans la théorie, car il permet de construire un outil de description qui transcende la non-différentiabilité. Celle-ci a été envisagée par de nombreux mathématiciens, physiciens et philosophes des sciences comme généralisation naturelle de la description de l'espace-temps, en particulier pour tenter de fonder la théorie quantique (Riemann, Einstein, Feynman, Bachelard, Buhl, Finkelstein). Mais aucune de ces tentatives n'a pu être développée, car il semblait évident qu'abandonner la différentiabilité, c'était abandonner le calcul différentiel, alors que toutes les équations de la physique sont, depuis Newton et Leibniz, des équations différentielles.

Le théorème qui relie continuité et non-différentiabilité à la fractalité (en un sens très général de divergence d'échelle) permet de dépasser cette limitation apparente. En théorie de la relativité d'échelle, on considère les diverses quantités physiques comme fonctions explicites de variables d'échelle internes, intrinsèques à la description, que nous avons appelé résolutions (plutôt qu'« incertitudes » ou « erreurs » bien qu'elles aient un statut du même type que des barres d'erreur ou des intervalles d'incertitude). Ce choix est motivé par la signification sous-tendue par de tels concepts : on abandonne l'idée qu'on pourrait connaître un système avec un intervalle de résolution (spatial ou temporel, par exemple) nul, au profit d'une conception où toute mesure ne peut être faite qu'à intervalle de résolution finie, aussi petit soit-il. Or la non-différentiabilité est précisément une propriété qui se manifeste à la limite des intervalles d'espace et de temps tendant vers zéro. En abandonnant l'idée qu'une telle limite ait un sens, et en remplaçant la description de la limite (qui définit les dérivées au sens ordinaire) par la manière dont la grandeur

considérée se conduit en tendant vers cette limite, on peut décrire des fonctions non différentiables par des équations différentielles.

En conséquence, la description physique d'un tel espace-temps continu et non différentiable n'implique pas pour autant l'abandon des équations différentielles, à condition que celles-ci agissent également sur les changements de résolution. Le formalisme mathématique consiste donc en un double calcul différentiel couplé, dans l'espace des échelles et dans l'espace-temps « ordinaire » (des positions et instants).

Première étape de construction de la théorie : lois de transformation d'échelle

En relativité d'échelle, les positions et les instants, considérés dans la théorie standard comme des points parfaits sans extension, sont vus maintenant comme structurés en échelle. Autrement dit, l'espace-temps de ces positions et instants structurés est *fractal* par définition. On dénie toute réalité physique au concept d'un instant t qui serait définissable avec un intervalle de résolution nulle $dt = 0$ (c'est-à-dire à résolution infinie). Un tel point de vue est en accord avec la mécanique quantique elle-même à travers les relations de Heisenberg, qui implique qu'une énergie infinie serait nécessaire pour faire une mesure de temps avec une incertitude nulle. Il en est de même de la position, dont la définition comme un point parfait de l'espace impliquerait la mise en œuvre d'une impulsion infinie.

La base de la nouvelle construction physico-mathématique consiste donc à considérer des « points » généralisés, dépendant explicitement de l'échelle considérée. Du point de vue expérimental, cela revient à considérer des coordonnées explicitement dépendantes de la résolution ϵ de l'appareil de mesure, $X = X(\epsilon)$. Du point de vue de la description théorique, le fondement de cette description depuis Newton et Leibniz consiste à considérer de petits éléments différentiels des variables : on considère alors celles-ci comme des fonctions explicites de ces éléments différentiels, $x = x(dx)$ pour l'espace et $t = t(dt)$ pour le temps.

La différence essentielle est que, dans le calcul différentiel ordinaire, on fait tendre les éléments différentiels vers zéro, *jusqu'à ce que cette limite soit atteinte*. Cette annulation des éléments différentiels interdit d'en faire des variables ordinaires. En relativité d'échelle, on fait toujours tendre ces éléments différentiels vers zéro, mais sans imposer d'aller à la limite nulle. Ce sont des éléments finis aussi petits que l'on veut qui deviennent ainsi des variables dimensionnées (des intervalles de longueur et de temps) caractérisant l'échelle relative. Autrement dit, au lieu de ne

considérer que ce qui se passe à la limite du point zéro, on décrit toute l'histoire de ce qui se passe en allant vers cette limite. Si cette limite peut être atteinte (cas de la différentiabilité), l'information sur celle-ci sera comprise dans la nouvelle description. Si elle ne peut pas l'être (cas nouveau de la non-différentiabilité), la description relativiste d'échelle fonctionne alors que la description du calcul différentiel ordinaire est mise en échec. Il s'agit donc d'une généralisation de la description qui contient le cas précédent comme limite, et ne peut donc en aucun cas apporter de contradiction.

Un tel cadre permet de résoudre de nombreux problèmes de la physique moderne. Il est tout à fait possible par exemple de rencontrer une fonction qui s'écrirait :

$$f(x, dx) = g(x) + dx + 1/dx$$

Du point de vue du calcul différentiel ordinaire, le deuxième terme disparaîtrait et le troisième serait infini, ce qui interdirait d'écrire une telle expression. Mais ici on la considère comme une fonction explicite de deux variables, x et dx , qui tend vers l'infini quand la deuxième variable dx tend vers zéro, ce qui devient parfaitement légitime. De plus si l'on considère le carré de cette fonction, on obtient :

$$f^2(x, dx) = [g^2(x) + 2] + 2g(x) dx + dx^2 + 2g(x)/dx + 1/dx^2$$

On constate ainsi que la partie finie de cette expression contient une constante supplémentaire égale à 2, qui vient du produit de deux termes qui, du point de vue standard, aurait été considéré comme non défini (0 fois l'infini). Autrement dit, des grandeurs physiques nouvelles « cachées » peuvent être générées par cette nouvelle approche. C'est effectivement le cas de propriétés fondamentales quantiques n'ayant aucune contrepartie classique, telles que l'énergie du vide ou le spin qui peuvent être construits de cette manière dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle¹.

Cette base de description étant établie, la première étape de construction de la théorie consiste à établir les lois de dépendance explicite des grandeurs physiques en fonction de ces variables d'échelle, qui satisfont au principe de relativité. En analogie avec les lois du mouvement, on considère que ces lois doivent être données par des équations différentielles, mais qui agissent dans l'espace des échelles.

Différents niveaux de descriptions de telles lois de transformation d'échelle sont alors physiquement possibles (voir quatrième partie) :

1. Célérier et Nottale, 2006.

invariance d'échelle, puis covariance d'échelle¹ qui inclue une relativité restreinte d'échelle, depuis l'autosimilarité la plus simple jusqu'à des lois d'échelle non linéaires (« *dynamique d'échelle* »). On retrouve ainsi les *lois fractales ordinaires* — dans lesquelles la dimension fractale est constante — comme cas les plus simples, mais aussi des *brisures de symétrie* de ces lois (mettant en œuvre des transitions entre régimes dépendant d'échelle et indépendant d'échelle), et de nombreuses généralisations où les dimensions fractales peuvent devenir variables.

Parmi les lois d'échelle obtenues dans ce cadre généralisé, certaines, comme les *lois log-périodiques*, ont été appelées à jouer un rôle particulier dans de nombreux domaines, de la physique à l'économie et des géosciences aux sciences de la vie. On obtient de telles lois comme solutions d'équations différentielles d'échelle du deuxième ordre, écrites de manière covariante : *c'est l'équivalent dans l'espace des échelles d'une équation d'onde dans l'espace ordinaire*.

À un niveau plus profond encore, il faut inclure les couplages échelle-mouvement (dans lesquels les variables d'échelle deviennent elles-mêmes des fonctions des coordonnées) qu'on identifie à des *transformations de jauge*.

Deuxième étape : mécanique quantique

Une fois établies les lois de dépendance d'échelle interne des « *points structurés* » d'un espace-temps fractal, il s'agit de construire les lois de déplacement de ces points, donc de trouver les équations du mouvement.

La deuxième étape consiste donc à décrire les effets induits sur la dynamique par les structures internes fractales des chemins possibles dans un espace-temps continu non différentiable. Ces effets transforment la mécanique classique en une mécanique de type quantique.

Pour ce faire, en analogie avec la relativité générale d'Einstein (voir formalisme : chapitre 4), on décrit les chemins comme géodésiques de l'espace-temps, c'est-à-dire comme les lignes les plus courtes (qui optimisent le temps propre). En fait on n'a pas à considérer que des particules existent, qui suivraient des géodésiques et possèderaient une masse et d'autres propriétés internes, car on peut identifier ce qu'on appelle particule (qui est aussi champ et onde) et ses propriétés (masse, spin, charges...) aux géodésiques elle-même de l'espace-temps fractal et à certaines de leurs caractéristiques géométriques.

1. Ce qui signifie une invariance de forme des lois d'échelle.

La *non-différentiabilité* implique trois conséquences principales :

1. Il existe une infinité de géodésiques là où une seule existait classiquement.

2. Chacune de ces géodésiques est une courbe fractale (c'est la dimension fractale 2 qui redonne strictement la mécanique quantique standard, mais la théorie est généralisable à d'autres valeurs). Ces deux propriétés impliquent une perte de déterminisme et une non-localité fondamentales de la description relativiste d'échelle, qui ne sont pas posées comme en mécanique quantique standard, mais qui se déduisent de la géométrie même. En effet, là où classiquement existait une vitesse bien déterminée : $v(t)$ sur une trajectoire unique, apparaît maintenant un champ de vitesse fractale qui remplit tout l'espace et dépend explicitement de l'échelle : $V(x, t, dt)$.

3. Il y a *irréversibilité au niveau infinitésimal*, c'est-à-dire *non-invariance* dans la réflexion de l'élément différentiel temporel $dt \rightarrow -dt$, si bien que le concept de vitesse se dédouble et devient descriptible par des nombres complexes. Un tel dédoublement est une conséquence directe de la méthode de base introduite en relativité d'échelle consistant à abandonner la limite $dt \rightarrow 0$ et donc à rendre explicite la dépendance des grandeurs physiques en fonction de dt , et ceci même dans le cas différentiable. Montrons le sur un exemple simple :

Considérons un mouvement accéléré décrit par $x = t^2$ et calculons sa vitesse suivant la nouvelle définition des éléments différentiels comme variables explicites. On peut le faire de deux manières, qui coïncident du point de vue du calcul différentiel ordinaire :

$$V_+(t, dt) = [x(t + dt) - x(t)]/dt = [(t + dt)^2 - t^2]/dt = 2t + dt$$

$$V_-(t, dt) = [x(t) - x(t - dt)]/dt = [t^2 - (t - dt)^2]/dt = 2t - dt$$

Ainsi, à la limite $dt \rightarrow 0$ ces deux vitesses coïncident évidemment et constituent une fonction unique, mais en tant que fonctions à deux variables t et dt , ce sont des fonctions différentes.

Plus généralement, dans le cas non différentiable, la vitesse, bien que non définie au sens ordinaire peut être redéfinie comme fonction fractale explicite de la résolution (fonction qui diverge quand l'intervalle de résolution tend vers zéro, ce qui manifeste la non-différentiabilité). Même ainsi il y a maintenant deux définitions de la vitesse au lieu d'une $V_+(x, t, dt)$ et $V_-(x, t, dt)$, qui se transforment l'une dans l'autre par la réflexion $dt \rightarrow -dt$.

En analogie avec la relativité généralisée du mouvement d'Einstein, ces trois effets sont alors combinés dans la construction d'une dérivée covariante, qui inclut, dans l'opération de dérivation même, les effets de la géométrie. La covariance signifie ici que, en terme de cet outil, les équations de la physique vont pouvoir garder, dans la nouvelle géométrie, la forme qu'elles avaient auparavant. Dans le cas de covariance forte, réalisée ici, cette forme des équations est la plus simple possible, celle du mouvement libre dans le vide. On écrit alors l'équation des géodésiques en fonction de cette dérivée covariante, sous forme d'une équation du mouvement inertiel (qui exprime simplement l'annulation de la dérivée de la vitesse).

Après un changement de variables qui définit la fonction d'onde comme manifestation du champ de vitesse complexe des géodésiques, cette équation s'intègre, dans le cas d'un espace fractal (sans que le temps lui-même soit fractal), sous forme d'une équation de Schrödinger (Nottale, 1993), l'équation fondamentale de la mécanique quantique non relativiste. Le point essentiel de ce résultat est que l'équation de Schrödinger se déduit donc de l'équation des géodésiques d'un espace fractal, dans un cadre purement géométrique.

Cette approche se généralise au cas d'un espace-temps fractal avec l'établissement de l'équation de Klein-Gordon¹. Ceci correspond à la mécanique quantique relativiste, dans laquelle des retours arrières temporels sont possibles le long des géodésiques (aux échelles de temps plus petites que l'échelle d'Einstein-Compton $\tau = \hbar/2mc^2$).

Puis la prise en compte d'autres effets plus subtils de la non-différentiabilité mène à la construction de spineurs et à la dérivation des équations de Dirac et de Pauli². Les postulats de Born (la densité de probabilité est donnée par le carré du module de la fonction d'onde) et de von Neumann (réduction du paquet d'onde) peuvent également être établis dans ce cadre. Ce sont ainsi les principaux outils et postulats de la mécanique quantique ainsi que ses équations fondamentales qui sont dérivés de principes premiers dans cette théorie³, alors qu'ils sont posés comme axiomes dans la théorie quantique actuelle.

1. Nottale, 1996a.

2. Célérier et Nottale, 2004, 2006.

3. Nottale et Célérier, 2007.

Troisième étape : mécanique quasi-quantique macroscopique

Mais il y a plus. Les diverses conditions qui sous-tendent la démonstration de l'équation de Schrödinger se déduisent, dans le cas de la mécanique quantique standard fondée sur la constante de Planck $\hbar$, de la non-différentiabilité du continuum spatio-temporel. Dans ce cas, on considère qu'il n'y a pas de limite inférieure à cette non-différentiabilité et à la fractalité qui s'en déduit. On obtient alors la mécanique quantique et ses propriétés les plus extrêmes, telles l'indiscernabilité des particules identiques (celles-ci se réduisant à la pure géométrie de familles infinies de géodésiques fractales, rien ne vient les distinguer) ou le paradoxe EPR (la complexité des géodésiques permet de décrire géométriquement des états intriqués).

Cependant ces mêmes conditions peuvent aussi être réalisées, non plus de manière parfaite, mais comme approximation ou comme « théorie effective » dans d'autres situations que celle de la physique atomique, nucléaire ou des particules, y compris dans des systèmes classiques macroscopiques¹. Le point essentiel est que la structure mathématique sous-tendant la construction des fonctions d'ondes et la dérivation de l'équation de Schrödinger ne dépend pas en fait de la constante microscopique de Planck, et est préservée pour une constante quelconque qui peut être une constante macroscopique d'auto-organisation du système considéré.

Rappelons en effet quelles sont ces conditions et montrons comment elles peuvent être généralisées :

1. *Infinité de géodésiques* : cette condition reste valable de manière approchée dans les situations classiques de diffusion, de chaos ou d'approximation fluide où un grand nombre de trajectoires est possible. Comme il s'agit alors de trajectoires suivies par des corps macroscopiques, et non plus de pures lignes géométriques (les géodésiques) à partir desquelles émergent les propriétés des « particules » comme dans l'application à la mécanique quantique standard, toutes les caractéristiques du quantique ne seront pas obtenues : en particulier, il n'y aura ni indiscernabilité ni paradoxe EPR.

1. Nottale, 1993, chap. 7.

2. *Dimension fractale 2 des trajectoires* : cette valeur de la dimension fractale est typique des processus markoviens où chaque déplacement élémentaire est indépendant des précédents et des suivants, comme dans le mouvement brownien. Des systèmes classiques chaotiques aux échelles de temps supérieures à leur horizon de prédictibilité, diffusifs, etc. peuvent être caractérisés par une telle dimension fractale des trajectoires à certaines échelles.

3. *Dédoublement de la vitesse* : comme on l'a vu plus haut, un tel dédoublement apparaît comme conséquence de la non-différentiabilité et de la dépendance explicite d'échelle, conditions qui peuvent être réalisées au moins de manière approximative à certaines échelles d'un système classique. Ceci nous amène à rajouter deux conditions supplémentaires pour voir apparaître un régime « *Schrödingerien* » dans le comportement d'un système classique :

4. La gamme d'échelle où les conditions précédentes sont réalisées doit être suffisamment grande. Dans l'application de la théorie à la mécanique quantique microscopique standard, la fractalité est sans limite inférieure ni supérieure. Les déplacements élémentaires sont décrits (voir Formalisme) comme somme d'une partie différentiable ou « classique », $dx = v dt$, et d'une partie nondifférentiable fluctuante $d\xi$ de moyenne nulle et telle que $\langle d\xi^2 \rangle = 2 \mathcal{D} dt$ où $\mathcal{D} = \hbar/2m$, ce qui correspond à la dimension fractale 2 de la condition (2). Dans l'application à des systèmes macroscopiques, cette relation n'est plus valable que sur une gamme d'échelle limitée. Du fait de la largeur (en échelles) des transitions entre régime fractal et non fractal, on estime qu'une gamme d'échelle de 10^4 à 10^5 sur lesquelles il y a invariance d'échelle est nécessaire. Une telle gamme d'échelles se rencontre couramment en astrophysique, en particulier dans les conditions de formation de structures — disques protoplanétaires, etc. — (ce qui explique le grand nombre d'applications de la théorie dans ce domaine) ou dans les systèmes vivants, plus difficilement au laboratoire.

5. Le dernier point est que la dynamique doit être newtonienne (une force donne une accélération). Ceci exclut le mouvement des petites particules browniennes dans un fluide, dont la dynamique est plutôt « de Langevin » (une force se traduit par une vitesse), mais s'applique, là encore, particulièrement bien au mouvement chaotique des planétésimaux dans un disque protoplanétaire.

Un des principaux intérêts de ce « *régime de Schrödinger macroscopique* » est qu'il fournit une nouvelle approche à la question de l'auto-organisation. On dit d'un système qu'il est auto-organisé s'il est capable d'organisation par lui-même, de manière spontanée. Or les lois de la mécanique quantique donnent des exemples d'une telle capacité d'auto-organisation. C'est ainsi que si l'on rapproche un proton et un électron, ceux-ci se combineront spontanément pour former un atome d'hydrogène (à température suffisamment basse) : c'est ce qui s'est passé dans l'univers primordial à l'époque de la « recombinaison ». Alors qu'un système classique évoluera en fonction des conditions initiales, un système quantique montrera souvent des solutions stationnaires stables dépendant des conditions aux limites (c'est-à-dire des conditions d'environnement).

Trois représentations équivalentes des mêmes équations sont possibles en relativité d'échelle.

1. La première, la plus radicale, est en terme d'équation des géodésiques portant sur leur champ de vitesse fractal, de partie classique ($V-iU$), décrit par des nombres complexes du fait du dédoublement fondamental induit par la dépendance d'échelle.
2. La deuxième est en terme d'équation de Schrödinger, portant sur une fonction d'onde complexe qui se déduit de ce champ de vitesse, et est définie par une densité de probabilité P et une phase θ .
3. La troisième est en termes d'équations de l'hydrodynamique (Euler et continuité), portant sur la densité de probabilité P (au lieu de la densité de matière ρ habituelle) et sur le champ de vitesse V . Dans ces équations, un terme d'énergie potentielle supplémentaire apparaît (le « potentiel quantique »), qui manifeste la géométrie fractale (en analogie avec le potentiel de gravitation newtonien qui manifeste la géométrie courbe en relativité générale). Un fait remarquable et d'importance potentielle en biologie est que si l'on inverse le signe de ce potentiel quantique, les équations obtenues deviennent des équations de diffusion, archétype de désorganisation et d'entropie croissante (l'entropie croît comme le temps dans ce cas). Les trois situations de la présence du potentiel quantique, de son annulation et de son inverse correspondent donc respectivement à des situations d'auto-organisation (statistique) de type fluide quantique, au cas des fluides classiques (faible capacité d'organisation) et enfin à la désorganisation diffusive.

Quatrième étape : transformations et champs de jauge

À un nouveau niveau de description encore plus profond (qui correspond à la relativité générale d'échelle par rapport à la relativité restreinte ou galiléenne d'échelle), on inclut les couplages échelle-mouvement, dans lesquels les variables d'échelle deviennent elles-mêmes des fonctions des coordonnées. Autrement dit, une structure (par exemple des géodésiques) qui se trouvait à une certaine échelle interne relativement à une échelle de référence se met maintenant à varier dans les déplacements dans l'espace ou le temps. Ces transformations d'échelles internes peuvent en fait être identifiées aux *transformations de jauge*. À l'aide de la construction d'une nouvelle dérivée « *covariante d'échelle* » qui incluse ces effets dans l'opération même de différentiation, les champs dits « *de jauge* » (du type électromagnétique, faible et fort) et leurs charges associées apparaissent alors spontanément dans cette construction comme manifestations de la géométrie fractale de l'espace-temps¹ (de la même manière que la gravitation apparaît en relativité générale du mouvement comme manifestation de sa courbure).

Cinquième étape : mécanique quantique dans l'espace des échelles

Ce que nous avons appelé espace des échelles, qui est l'espace des variables d'échelle (en l'occurrence des éléments différentiels pris comme variables explicites dans le cas de la description théorique), a été supposé jusqu'à maintenant différentiable. Mais dans le cadre général étudié en relativité d'échelle où seule la continuité de l'espace-temps est conservée, ceci n'est qu'une hypothèse transitoire qui peut elle-même être relâchée. De même que la non-différentiabilité de l'espace mène à la transformation des lois fondamentales de la dynamique en lois quantiques, de même celle de l'espace des échelles conduit à l'introduction d'une nouvelle mécanique quantique dans l'espace des échelles. Dans une telle description, il n'y a plus une structure particulière à une échelle donnée (comme dans les « objets » fractals de Mandelbrot), ni une structure dans un rapport d'échelles donné relativement à une autre, comme dans la simple vision relativiste d'échelle, ni même une structure dont le rapport d'échelle à une autre varie en fonction de la position et du temps, comme dans les champs d'échelle (de jauge),

1. Nottale, 1996a ; Nottale, Célérier et Lehner, 2006.

mais il n'y a plus qu'une probabilité d'avoir une structure à un rapport d'échelle donné (relativement à une échelle de référence). Comme on le verra, une telle approche permet de rendre compte très simplement de l'émergence d'échelles caractéristiques et de l'existence de hiérarchies d'organisation, en particulier en biologie (taille typique des cellules, premiers sauts évolutifs procaryotes-eucaryotes-multicellulaires).

Conclusion

Pour finir, ces différents éléments de construction de la théorie doivent bien sûr être combinés entre eux pour obtenir l'ensemble de ses possibilités descriptives. On peut généraliser l'équation de Schrödinger à une dimension fractale différente de 2, ou variable, ce qui fournit des solutions elles-mêmes explicitement dépendantes d'échelle ; obtenir des solutions fractales à l'équation de Schrödinger ; combiner la dérivation covariante quantique à la dérivée covariante d'échelle pour écrire comme simple équation des géodésiques (pure équation du mouvement inertiel dans le vide) l'équation du mouvement d'une « particule » quantique dans un champ (qui n'est plus rajouté de manière extérieure : champ et propriétés quantiques sont alors tous générés « en interne » comme effets de la géométrie non différentiable). On peut générer une gamme d'équations de Schrödinger ou leurs généralisations à des échelles différentes, couplées entre elles par raccordement des fonctions d'onde, ou mieux par les solutions de la nouvelle mécanique quantique dans l'espace des échelles, ce qui permet une intégration des échelles (un des enjeux majeurs de la biologie), etc.

Avant de décliner maintenant ces différents éléments théoriques dans des propositions d'applications de ces différents concepts à plusieurs sciences, il peut être utile d'explicitier les diverses acceptations de l'expression « relativité d'échelle » utilisées au cours de ce livre. Par relativité d'échelle, on entend tout d'abord au niveau le plus simple le constat et la prise en compte qu'une échelle ne peut être définie que de manière relative, par rapport à une autre, mais jamais de manière absolue. Ce fait trivial prend une signification nouvelle dès lors que des propriétés de systèmes (physiques ou autres) dépendent explicitement de l'échelle d'observation ou d'expérience. À un niveau plus profond, ce constat peut être érigé en principe de relativité d'échelle, suivant lequel les lois fondamentales de la nature doivent être valides quel que soit l'état d'échelle du système de coordonnées (état qui vient se rajouter à ceux

de position, d'orientation et de mouvement du principe de relativité tel qu'on le connaissait jusque-là). Enfin, on parlera de théorie de la relativité d'échelle pour désigner les différents éléments de construction, résumés ci-dessus, de la théorie développée à partir de ce principe.

Les différentes « applications » considérées dans cet ouvrage, doivent être envisagées à la lumière de cette remarque. Certaines d'entre elles, en particulier dans les sciences « dures » déjà mathématisées, mettent bien en œuvre les différents niveaux de développement de la théorie (lois de transformation d'échelle généralisées, mécanique quasi-quantique macroscopique), et des prédictions qu'on peut en tirer. Mais dans d'autres cas, il s'agit seulement de la comparaison de données d'observation ou d'expérience à des modèles (lois de puissance et leurs corrections log-périodiques, fractals, systèmes hiérarchiques, etc.) qui se sont imposés par ailleurs, sans qu'il y ait nécessité de faire appel précisément à la relativité d'échelle. Celle-ci intervient alors comme « constat » (ces modèles se caractérisent bien par le fait que, seuls ont un sens des rapports d'échelle, jamais des échelles absolues), et éventuellement comme justification de ces modèles à partir d'un niveau de description plus fondamental. Enfin, quand on passe à des sciences peu, ou pas du tout mathématisées, c'est essentiellement en tant que cadre de réflexion et de pensée qu'intervient la relativité d'échelle.

1.2

Applications en sciences physiques de la théorie de la relativité d'échelle

Applications en astrophysique

Introduction

L'un des principaux problèmes encore ouvert de la cosmologie moderne est celui de la formation et de l'évolution des structures gravitationnelles. Dans un article récent, le cosmologiste américain J. Silk (2001) écrivait :

La théorie de la formation des galaxies n'est pas dans un état très satisfaisant. Ceci se ramène ultimement à notre manque de compréhension fondamentale de la formation des étoiles. Il n'existe aucune théorie robuste des propriétés détaillées des galaxies.

On pourrait dire la même chose de la formation des systèmes planétaires, comme l'a démontré la découverte ces dernières années de nombreux systèmes planétaires nouveaux autour d'étoiles semblables à la nôtre, et qui ont pourtant montré des caractéristiques totalement inattendues à partir du modèle standard de formation. Comme on va le voir, la théorie de la relativité d'échelle a montré sa capacité à prévoir de telles structures avant leur découverte. Elle fournit une théorie de l'auto-organisation et de la morphogenèse des structures astrophysiques sur une très large gamme d'échelles. Elle prédit théoriquement des relations et contraintes nouvelles, dont plusieurs ont déjà été validées par l'analyse des données astronomiques, et d'autres qui pourront être mises à l'épreuve par les futures observations de haute précision des nouvelles classes de grands télescopes.

Il est important de remarquer que le problème de formation, à l'échelle des galaxies et des grandes structures de l'Univers, est intimement interconnecté à celui de la « matière sombre ». En effet, l'existence de grandes quantités de matière invisible (c'est-à-dire non visible direc-

tement par du rayonnement, mais déduite de manière indirecte par ses effets gravitationnels) est un ingrédient nécessaire de l'approche standard, car en son absence la formation des galaxies et des amas aurait été totalement impossible dans le cadre de ces modèles, sur les échelles de temps de l'âge de l'Univers (dont la valeur est aujourd'hui bien établie autour de 13,7 milliards d'années). Et pourtant, alors que les effets qu'on tente d'expliquer par de la matière manquante sont fermement établis (courbes de rotations plates des galaxies spirales, vitesse de dispersion des amas de galaxies, bilan d'énergie global aux échelles cosmologiques, effets de lentille gravitationnelle, etc.), la matière noire elle-même échappe à toute détection directe.

Comme nous allons le voir, la théorie de la relativité d'échelle permet également de faire des propositions nouvelles en ce qui concerne ce problème fondamental, en suggérant que *cette énergie potentielle manquante est de nature géométrique et liée à la seule matière ordinaire*. Dans le modèle de cosmologie standard, on considère qu'il existe ainsi deux types de matières, la *matière baryonique ordinaire*, lumineuse (dont la contribution au bilan énergétique cosmologique n'est que de $\Omega_B = 0,005$ environ) ou sombre (contribution 0,043) et une *matière exotique jamais observée, non baryonique*, dont la contribution est 6 fois plus importante, autour de $\Omega_{NB} = 0,23$, sachant que la contribution de la constante cosmologique — aujourd'hui parfois considérée comme celle d'une « *énergie noire* » (expression qui peut prêter à confusion avec la matière noire) — domine celle de la matière avec une valeur de $\Omega_\Lambda = 0,73$. Dans le cadre de la relativité d'échelle, au contraire, on montre que la nature géométrique de l'espace-temps implique que la matière ordinaire donne naissance à deux potentiels, l'un qui manifeste sa courbure (le potentiel Newtonien ordinaire) et l'autre qui manifeste sa fractalité. Ce nouveau « *potentiel noir* » pourrait ainsi rendre compte des effets observés qui sont ordinairement attribués à ceux d'une matière noire non baryonique.

Dans ce chapitre, nous appliquerons tout d'abord la théorie à des configurations essentielles auxquelles se ramènent la plupart des structures observées. Il s'agit des solutions de l'équation de la dynamique dans un espace-temps fractal, qui prend une forme de type quantique macroscopique (équation de Schrödinger généralisée). Trois situations typiques seront brièvement considérées : celle d'un potentiel képlérien (cas du vide autour d'une masse, comme dans les systèmes planétaires), d'un oscillateur harmonique (cas d'une densité constante, ce qui correspond en première approximation aux problèmes de formation de structures), et d'un potentiel logarithmique (cas d'un halo, ce qui correspond en particulier aux zones extérieures des galaxies spirales

dans lesquelles on observe des courbes de rotation plates, interprétées usuellement comme preuve de présence de matière sombre).

Puis nous donnerons un panorama aussi large que possible des divers effets prédits théoriquement, suivis de la comparaison de ces prédictions aux données astronomiques disponibles. On verra comment la théorie est capable de rendre compte de l'émergence de nombreuses structures, depuis l'échelle de la Terre, du système solaire et des systèmes planétaires extra-solaires, en passant par les étoiles et les nébuleuses planétaires (qui sont des structures formées par l'éjection par certaines étoiles de leurs couches extérieures), aux structures extragalactiques, de notre propre Groupe Local de Galaxies aux amas et aux très grandes structures de l'Univers.

Prédictions de la théorie

Résumons tout d'abord brièvement le type de prédictions théoriques que l'approche relativiste d'échelle est capable d'apporter dans le domaine de la formation des structures gravitationnelles. L'argument général est le suivant. Prenons le cas d'une nébuleuse protoplanétaire autour d'une étoile, formée d'un très grand nombre de « planétésimaux ». Sur une courte échelle de temps, chacun de ces petits corps suit une portion d'orbite képlérienne, caractérisée par des éléments orbitaux (demi-grand axe, excentricité, inclinaison, obliquité, etc.) qui sont eux-mêmes liés à des quantités conservatives (aussi appelées intégrales première) comme l'énergie, le moment angulaire ou le vecteur de Runge-Lenz¹. Mais dès qu'on considère une échelle de temps plus grande, le petit corps va être soumis à de nombreuses déviations gravitationnelles dues aux rencontres avec les autres planétésimaux. Sa trajectoire devient chaotique, et au-delà d'un certain horizon temporel de prédictibilité, grand devant le temps de libre parcours moyen (qui est lui-même variable en fonction de l'évolution du processus de formation), devient caractérisée par un mouvement brownien. Il n'y a alors plus d'éléments orbitaux bien déterminés, mais seulement une distribution statistique de possibilités.

Les trois conditions sous lesquelles l'équation fondamentale de la dynamique prend la forme, après changement de variables et intégration, d'une équation de Schrödinger généralisée² sont alors réalisées : 1. infinité de trajectoires possibles, caractérisable par un champ de vitesse dépendant du temps et de l'espace, mais aussi de l'échelle (au

1. Ce vecteur est une quantité conservative spécifique du problème képlérien liée à l'excentricité et à l'orientation du grand axe de l'orbite.

2. Voir chap. 1.1 et quatrième partie : Formalisme.

lieu d'une vitesse unique dépendant du temps de la représentation déterministe usuelle), 2. fractalité de chacune de ces trajectoires potentielles, la dimension fractale étant celle du mouvement brownien ($D_F = 2$), 3. enfin, dédoublement fondamental des vitesses, dû à l'irréversibilité qui apparaît au niveau de la nouvelle dépendance explicite en fonction des petits éléments temporels dt (qui ne doit pas être confondue avec celle sur le temps t).

Dans le cas où l'on applique cette approche au problème de la fondation de la mécanique quantique en microphysique, ces trois conditions sont parfaitement réalisées, étant déduite de la non-différentiabilité fondamentale de l'espace-temps. Ici cette non-différentiabilité n'est qu'approximative, sachant qu'aux petites échelles de temps, on retrouve une description déterministe. Il faut bien comprendre que les petits éléments temporels sont ceux qui interviennent uniquement dans la description statistique de grande échelle de temps ; ils sont donc infinitésimaux par rapport à cette échelle de temps, elle-même grande devant l'horizon de prédictibilité t_H . Mais, ils sont eux-mêmes supérieurs à (ou de l'ordre de) cet horizon, car en dessous le système redevient déterministe et localement prédictible : $t_H < dt \ll t$.

Une condition supplémentaire doit donc être ajoutée pour obtenir une équation de Schrödinger comme bonne approximation du comportement du système. C'est que la dépendance d'échelle du système soit valide sur une gamme d'échelles suffisante, autrement dit, que la relation entre fluctuations fractales différentielles et élément différentiel temporel, $\langle d\xi^2 \rangle = 2 D dt$, qui traduit la dimension fractale 2, reste une bonne approximation sur de nombreuses échelles bien qu'on sache d'emblée qu'elle n'est plus valable pour $dt < t_H$. Sur cet intervalle d'échelle il y a non-différentiabilité effective, comme on peut le voir à partir des vitesses moyennes des fluctuations fractales, qui s'écrivent $\langle W^2 \rangle = \langle (d\xi/dt)^2 \rangle = 2D/dt$, et sont donc formellement infinies quand l'élément différentiel tend (virtuellement) vers zéro. Dans la réalité, quand celui-ci atteint l'horizon t_H et lui devient inférieur, on change de régime et les vitesses se trouvent de ce fait limitées : ainsi cet horizon s'identifie à une transition (dans l'espace des échelles) entre un régime déterministe de petite échelle de temps et un régime probabiliste de grande échelle (relative) de temps.

Cette gamme d'échelle minimale est de l'ordre de 10^4 à 10^5 , en raison de la largeur des transitions entre régimes dépendant d'échelle et indépendant d'échelle (voir quatrième partie), qui s'étalent souvent sur un facteur 10 à 50. L'existence d'une transition inférieure et d'une transition supérieure, comme c'est le cas de nombreux systèmes fractals naturels

ou artificiels (en fait de la plupart d'entre eux) implique donc une largeur de transition — sur laquelle la dimension fractale effective n'est plus 2 mais varie de façon continue entre 2 et 1, qui représente la *non-fractalité* — qui peut atteindre $50^2 = 2500$, si bien que même sur une gamme d'échelle de 2.5×10^5 , la dimension fractale ne vaut strictement 2 que sur un rapport d'échelle de 100. Une telle valeur est difficile à réaliser au laboratoire : par exemple, pour une échelle minimale spatiale de 1 cm, il faudrait que la dépendance d'échelle de dimension 2 soit valide jusqu'à une échelle de 1 km pour que cette condition soit réalisée. Par contre, de telles gammes de dépendance d'échelle, peuvent se rencontrer dans des systèmes naturels, en particulier en astrophysique.

C'est le cas tout particulièrement des disques protoplanétaires. On est donc amené à appliquer cette méthode descriptive au mouvement des planétésimaux dans un tel disque. L'équation fondamentale de la dynamique qui décrit un tel mouvement peut alors se transformer en une équation de Schrödinger généralisée (voir chap. 4), qui n'est plus fondée sur la constante de Planck, mais sur le paramètre $2m\mathcal{D}$ qui en tient lieu dans cette situation « *macroquantique* », où $\mathcal{D}$ caractérise l'amplitude des fluctuations fractales.

Dans cette équation, le potentiel dominant est le potentiel képlérien de l'étoile centrale, $\varphi = -GMm/r$, où M est la masse de l'étoile et m celle du corps dont on cherche à décrire le mouvement. Quand au paramètre $\mathcal{D}$, sa forme peut être déterminée à partir des contraintes physiques qui s'appliquent à cette équation de Schrödinger gravitationnelle macroscopique : 1. l'une est qu'il s'agit de l'intégrale d'une équation des géodésiques, ce qui implique que la masse inerte du corps dont on suit le mouvement (égale à sa masse gravitationnelle passive) doit disparaître de cette équation, comme conséquence du principe d'équivalence de la relativité généralisée (du mouvement) d'Einstein ; en conséquence, $\mathcal{D}$ est indépendant de la masse m du corps, ce qui fait une différence essentielle avec la mécanique quantique standard pour laquelle au contraire $\mathcal{D} = \hbar/2m$; 2. l'autre est que, en tant qu'équation du mouvement dans le champ de gravitation créé par une masse centrale M , cette masse (sous forme de son produit par la constante de gravitation, GM), comme dans les théories newtonienne et einsteinienne, donne l'échelle de longueur et de temps du système : ceci est apparent, par exemple, dans la troisième loi de Kepler qui relie demi-grands axes et périodes de l'orbite d'un corps et qui s'écrit $(a/GM)^3 = (P/2\pi GM)^2$; on s'attend donc à ce que $\mathcal{D}$ soit également proportionnel à GM . Ceci amène à l'écrire sous la forme $\mathcal{D} = GM/2w$, où la constante w , spécifique du système ou sous-système considéré, a la dimension d'une vitesse. En exprimant cette vitesse carac-

téristique en fonction de la vitesse de la lumière sous la forme $w = \alpha_G c$, on peut faire apparaître, comme l'ont proposé Agnese et Festa en 1997, une constante de couplage gravitationnelle α_G qui a un statut en partie semblable, pour chaque sous-système auquel elle s'applique, à celui de la constante de structure fine de l'électromagnétisme.

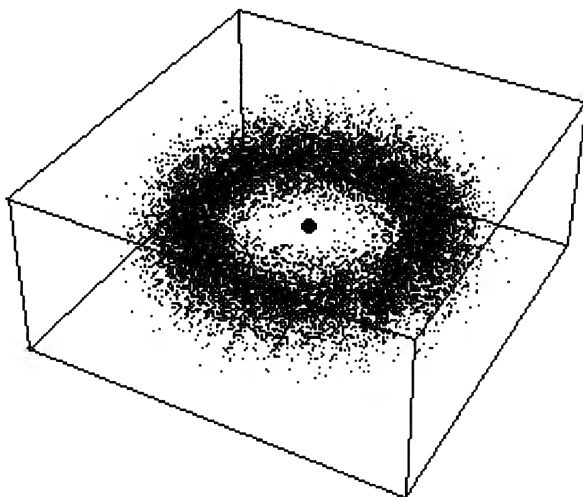


Figure 1.1. Exemple de sous-structure formée dans un disque protoplanétaire selon l'approche relativiste d'échelle.

(Transformation de l'équation fondamentale de la dynamique en une équation de forme schrödingerienne sous des conditions de fractalité.)

La résolution de l'équation de Schrödinger fondée sur un tel paramètre fournit des fonctions d'onde dont le carré du module donne la densité de probabilité attendue pour la distribution des corps dont on a ainsi décrit le mouvement. Cette distribution n'est pas plate, mais montre au contraire des pics de probabilité correspondant à des valeurs particulières des quantités conservatives comme l'énergie, le moment angulaire ou le vecteur de Runge-Lenz. Ainsi le disque initial est amené à s'organiser en sous-structures (fig. 1.1). Les planètes qui se formeront ensuite à partir de ces structures auront (une fois que le système se sera stabilisé, agrandissant ainsi l'horizon de prédictibilité) des éléments orbitaux plus probables qui pourront être calculés en fonction de ces quantités conservatives (qui sont donc communes aux deux régimes, classique et macroquantique).

On prédit ainsi que les demi-grands axes doivent montrer des pics de probabilité pour des valeurs : $a_n = (GM/w^2) n^2$

– où n est un entier, et que les excentricités sont elles-mêmes appelées à montrer des valeurs préférentielles données par : $e_{kn} = k/n$

– où k est un entier qui peut varier entre 0 et $n-1$ ($k = 0$ correspondant à des orbites circulaires).

Un autre exemple d'application d'une telle approche est celui de la formation de structures à partir d'un milieu de densité constante. Dans l'approche standard de la formation des structures gravitationnelles, une telle formation est impossible, et ne peut être envisagée qu'à partir de fluctuations initiales qui doivent ensuite croître jusqu'aux structures actuellement observées. Mais l'amplitude des fluctuations aux tous débuts de l'existence de la matière dans l'Univers (après la phase de rayonnement à la fin de l'Univers primordial) est si petite qu'une telle croissance n'est possible que sous l'hypothèse d'énormes quantités de matière noire, qui n'ont toujours pas été détectées de manière directe. Dans la nouvelle approche au contraire, la fractalité sous-jacente de l'espace-temps implique une auto-organisation spontanée : même à partir d'une densité de matière totalement constante, la théorie prévoit la formation de structures. En effet, le potentiel correspondant à ce cas est celui d'un oscillateur harmonique tridimensionnel isotrope, pour lequel l'équation de Schrödinger macroscopique prédit l'émergence de structures bien déterminées (fig. 1.2).

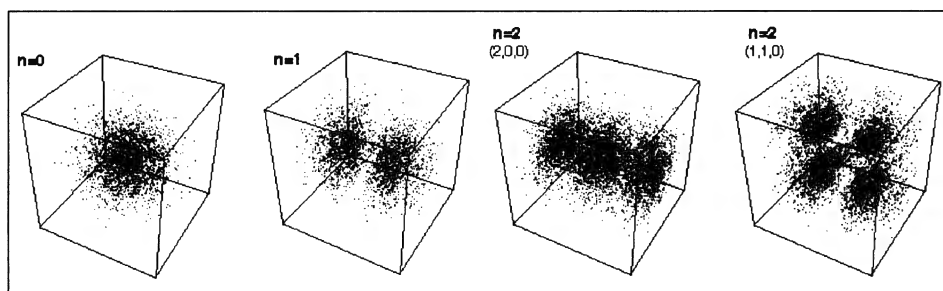


Figure 1.2. Distribution de densité donnée par les solutions de l'équation de Schrödinger macroscopique dans le cas d'un milieu de densité constante (potentiel d'oscillateur harmonique).

Les différentes structures possibles ainsi prédites sont simple (niveau fondamental $n = 0$), double (premier niveau « excité » $n = 1$), alignée sous forme d'un triplet ou quadruple ($n = 2$), etc. Comme on le verra, l'accord est remarquable avec les morphologies observées pour les zones considérées comme en formation, ou proches de l'époque de formation, et cela sur une large gamme d'échelles (étoiles, amas d'étoiles, galaxies, groupes de galaxies).

De plus, si l'on donne à l'équation de la dynamique, non plus sa forme de Schrödinger, mais sa forme hydrodynamique¹, il apparaît une énergie potentielle supplémentaire par rapport à la théorie classique (un « potentiel quantique »), qui pourrait contribuer à expliquer les effets (de dynamique, de lentille gravitationnelle, etc.) ordinairement attribués à de la matière noire invisible.

Un troisième exemple d'application est celui des processus d'éjection (jets, nébuleuses « planétaires », etc.) et leur inverse, ceux d'accrétion. Dans ce cas, particulièrement étudié (da Rocha et Nottale, 2003a, b), on trouve que les distributions de probabilité attendues ressemblent à celles des processus de collision en physique des particules. Si l'on considère en effet la rencontre entre un atome et une particule, celle-ci quand elle s'approche est décrite par une onde plane entrante, et quand elle s'éloigne par une onde plane et une onde sphérique sortante décrite par une équation de Schrödinger dans un potentiel central. Il en est de même ici, au changement de constantes près (et de comportement associé à la nature de ces constantes) : les distributions de matière dans des processus de jet, d'éjection (ou d'accrétion) sont décrites, dans l'approche relativiste d'échelle, par des densités de probabilité données par des ondes sphériques sortantes (respectivement entrantes) qui montrent des pics pour des valeurs particulières des angles d'éjection (fig. 1.3a, b, c). On prédit ainsi, pour les différents objets astrophysiques relevant de ces processus, des morphologies bien particulières, correspondant à des pics de probabilité des angles eux-mêmes corrélés avec des valeurs plus probables des moments angulaires (voir les figures).

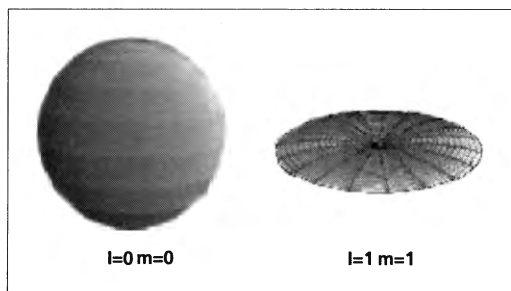


Figure 1.3a. Solutions d'une équation de Schrödinger macroscopique décrivant un processus d'éjection (ou d'accrétion) centrale, classées en fonction des états quantifiés de moment angulaire.

Cas du fondamental (sphère) et d'un disque.

1. Voir chap. 1.1. et 4.

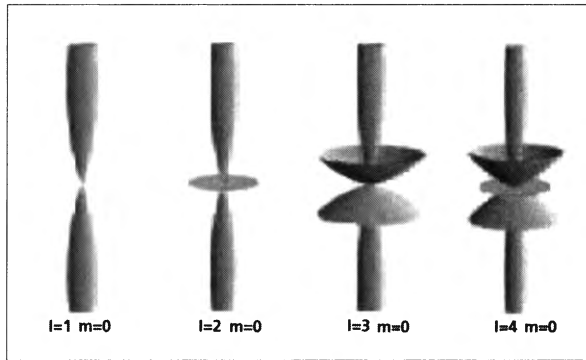


Figure 1.3b. Solutions d'une équation de Schrödinger macroscopique décrivant un processus d'éjection (ou d'accrétion) centrale, classées en fonction des états quantifiés de moment angulaire.

Cas impliquant des jets.

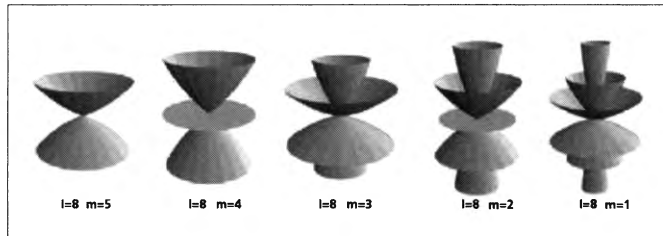


Figure 1.3c. Solutions d'une équation de Schrödinger macroscopique décrivant un processus d'éjection (ou d'accrétion) centrale, classées en fonction des états quantifiés de moment angulaire.

Cas mettant en œuvre des structures du type « diabolo », avec éventuellement des disques et plusieurs nappes emboîtées.

Pour finir, on peut envisager le cas d'un *halo*, comme dans les régions extérieures de galaxies spirales. On trouve que le potentiel quantique reproduit dans ce cas le potentiel nécessaire pour que les courbes de rotation extérieures de ces galaxies, au lieu de montrer une dépendance de la vitesse en $1/\sqrt{r}$, où r est la distance au centre, comme on s'y attendrait du fait que plus aucune (ou très peu de) matière n'est visible dans ces régions, soient caractérisées au contraire par une vitesse quasi-constante (courbe de rotation « plates »).

De nombreuses autres configurations sont bien sûr à considérer, trop nombreuses et complexes pour être détaillées dans le cadre de cet ouvrage. Il faut citer en particulier toutes celles dans lesquelles, ce n'est plus un potentiel extérieur qui domine et qui est structurant pour le système, mais l'auto-potentiel de la structure elle-même, comme par exemple pour les amas de galaxies ou les structures internes des galaxies. Dans ce cas, la complexité du problème augmente d'un cran, car l'équation du mouvement

(Schrödinger généralisée ici) et l'équation du champ (équation de Poisson dans l'approximation newtonienne) deviennent fortement couplées et bouclées l'une sur l'autre. L'équation différentielle unique qui en résulte devient du quatrième ordre : la diversité et la complexité des solutions possibles d'une telle équation sont remarquables.

Comparaison aux données d'observation

► Système solaire

Les prédictions théoriques de cette nouvelle approche de la formation des systèmes planétaires ont pu être comparées de manière très satisfaisante dès le début des années 1990 (Nottale, 1993, 1994) aux données d'observation en ce qui concerne notre propre système solaire. Elles ont également permis de faire des prédictions « en aveugle » de structures du système solaire qui n'avaient pas encore été observées à l'époque (système intra mercuriel, ceinture de Kuiper, pics de distribution des obliquités et inclinaisons de planètes et satellites) qui ont pu être validées depuis. De plus, l'universalité de l'approche utilisée impliquait dès cette époque la prédiction de structures pour les systèmes planétaires extrasolaires, dont aucun n'avait encore été découvert. L'observation de tels systèmes autour d'étoiles de type solaire à partir de 1995 a permis là aussi de valider ces prédictions.

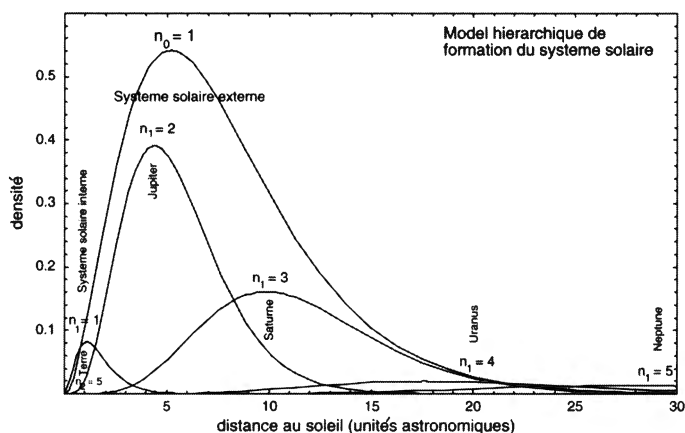


Figure 1.4. Modèle de formation hiérarchique du système solaire.

Le disque initial, dont le pic de densité est, en ce qui concerne notre système, à la distance de Jupiter (ce fait est contingent et dépend du système considéré), se fragmente en sous-structures solutions d'une équation de Schrödinger macroquantique. Celles-ci sont à l'origine du

système solaire externe (planètes joviennes), dont le système interne (planètes telluriques) est le niveau fondamental. Celui-ci se fragmente à son tour en sous disques qui donneront naissance aux diverses planètes du système solaire interne (fig. 1.4 et 1.5).

Un des points importants qui font différer la description macro-quantique gravitationnelle de la mécanique quantique standard est l'invariance d'échelle fondamentale de la gravitation (remarquée déjà il y a deux siècles par Laplace). On a vu ainsi que la constante $\mathcal{D}$ n'avait rien d'universel, contrairement à la constante de Planck qui structure à elle seule le domaine quantique microscopique (des particules élémentaires aux atomes et aux molécules). Elle dépend ainsi de la masse de l'étoile centrale M , mais même après prise en compte de cette dépendance, la constante résiduelle w (ou de manière équivalente la constante de couplage gravitationnelle $\alpha_G = w/c$), n'a pas de raison non plus de prendre une valeur universelle, mais peut différer d'un sous-système à un autre. Par contre, sachant que pour un même système planétaire présent autour d'une étoile donnée, les différents sous-systèmes devront être raccordés entre eux (par exemple, le système solaire interne est le niveau fondamental du système externe), on s'attend à ce que les différentes valeurs de la constante w pour les différents sous-systèmes soient entre elles dans des rapports entiers (fig. 1.5 et 1.6).

•Sous-systèmes interne et externe

La prédiction théorique d'une distribution des demi-grands axes suivant deux lois en n^2 raccordées entre elles pour les sous-systèmes solaires internes et externes a été validée par les données d'observation.

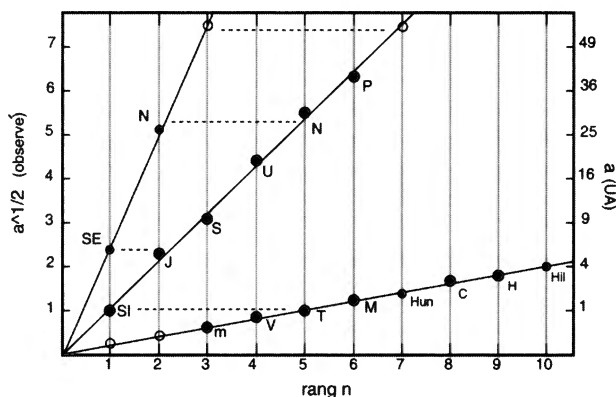


Figure 1.5. Comparaison entre les demi-grands axes observés des planètes des sous-systèmes interne et externe du système solaire et les valeurs prédites par la loi en n^2 déduite de l'approche relativiste d'échelle.

Le sous-système interne (Mercure, Venus, la Terre et Mars ainsi que les petites planètes les plus massives de la ceinture entre Mars et Jupiter) est structuré suivant une constante $w_i = 144,7 \text{ km.s}$. Comme il est lui-même le niveau fondamental du sous-système externe (Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, suivi par les objets de la ceinture de Kuiper commençant avec Pluton) et que son pic de probabilité coïncide avec la Terre qui est en $n_i=5$, la constante structurant le système externe doit être donnée par $w_e = w_i/5$, ce qui est bien le cas.

Un tel modèle de formation par fragmentation hiérarchique (fig. 1.4 et 1.5) permet, de plus, d'obtenir une compréhension de la distribution des masses des planètes des systèmes internes et externes (Nottale et al.1997). Partant de la masse de Jupiter qui domine fortement toutes les autres (notre système solaire est presque un système double Soleil-Jupiter), dont la valeur et la distance sont contingentes (le pic de densité du disque initial varie d'un système planétaire à un autre) les rapports de masse des autres planètes sur celle de Jupiter peuvent être estimés de manière satisfaisante à partir de la fragmentation des orbitales schrödingériennes (fig. 1.6).

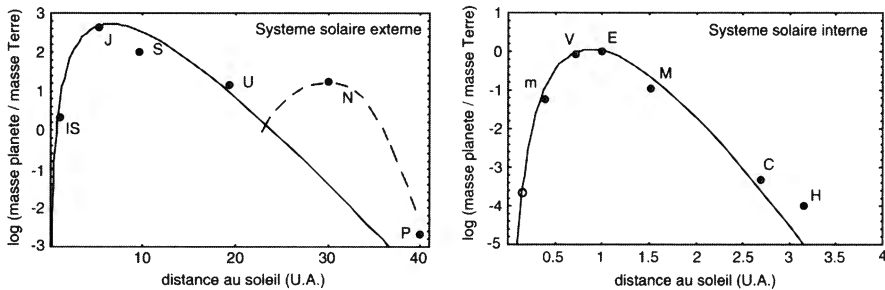


Figure 1.6. Comparaison entre les rapports de masses des planètes à celle de Jupiter prédits théoriquement et observés dans le cadre du modèle de formation hiérarchique.

C pour Cérès et H pour Hygiea (les principales petites planètes de la ceinture entre Mars et Jupiter). Dans le domaine intramercurel, on n'attend pas plus de 10^{-4} fois la masse de la Terre en $n_i = 2$ (0,17 UA) et 10^{-9} en $n_i=1$ (0,043 UA). Ceci impliquerait l'existence, prédite théoriquement mais non encore observée directement, d'un disque d'astéroïdes (de tailles inférieures à 10 km ?) à 0,17 UA, et seulement de pics de poussières (forcément transitoires) à 0,043 UA.

• Structures intra-mercurielles

Une des conséquences intéressantes de la nouvelle approche est sa capacité à faire des prédictions de structures non encore observées. Un des domaines ouverts de ce point de vue dans notre propre système solaire est la zone intra-mercurielle (distances inférieures à 0.4 UA : l'unité astronomique, UA, est la distance Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres). Étant donné que Mercure correspond à l'état $n_i = 3$, et non pas au niveau fondamental, deux pics de probabilité

supplémentaires sont attendus à proximité du Soleil, le fondamental à 0,043 UA et le second à 0,17 UA.

On peut aller plus loin et poursuivre le modèle de formation par fragmentation hiérarchique vers les petites échelles. Or, à partir de la constante du système solaire interne $w_i \approx 145 \pm 0,7$ km/s, on peut anticiper l'existence d'une nouvelle constante qui sera à nouveau dans un rapport entier avec celle-ci. Il est alors remarquable que la vitesse képlérienne au niveau du rayon du Soleil soit de 437,1 km/s, extrêmement proche de $3 w_i = 435$ km/s (ce qui correspond à une distance de 0,00465 UA). Ceci mène à la conjecture raisonnable, qu'en dernier recours, ce soit sur le rayon du Soleil lui-même que se construise l'ensemble des structures et sous structures du système planétaire qui l'entoure. Ceci irait dans le sens des modèles standard de formation, dans lesquels l'étoile se forme d'abord, puis le système planétaire dans le potentiel képlérien créé par elle. De plus, que le Soleil lui-même puisse être décrit en partie par l'approche relativiste d'échelle, n'est pas inattendu : les équations qui régissent sa structure interne sont des équations hydrodynamiques du même type que la forme hydrodynamique de l'équation de Schrödinger macroquantique, à part le potentiel quantique additionnel. L'apparition d'une telle énergie potentielle supplémentaire à partir de la fractalité des trajectoires des particules internes au Soleil n'est pas exclue. On retrouverait alors les résultats de la théorie standard, avec en plus la possibilité de pics de probabilité pour les valeurs possibles du rayon des étoiles.

Dans ce cadre descriptif, on prédit alors des pics de densité de probabilité pour des valeurs $4,09 R_{\text{sol}}, 9,2 R_{\text{sol}}, 16,3 R_{\text{sol}}$ etc. Il est bien sûr exclu, qu'à une telle proximité du Soleil des astéroïdes puissent subsister, car la limite de sublimation de tels objets est d'environ 0.1 UA. Par contre, il n'est pas impossible que des poussières s'accumulent de manière transitoire dans de telles zones. Il existe en effet, dans le plan de l'écliptique, des particules de poussière interplanétaire, issues principalement des comètes, qui constituent ce qu'on appelle la *couronne-F*.

Or, depuis 1966, il y a eu de nombreuses détections revendiquées, au moment d'éclipses, de pics thermiques infrarouges pouvant venir d'un anneau de poussière circumsolaire (Peterson 1967, MacQueen 1968, Koutchmy 1972, Lena et al. 1974, Mizutani *et al.* 1984). Ces structures ont été systématiquement observées aux mêmes distances du Soleil au cours de 5 éclipses entre 1966 et 1983 : ces distances sont précisément de $4.1 R_{\text{sol}}$ et de $9.2 R_{\text{sol}}$, les valeurs prédites par l'approche relativiste d'échelle (fig. 1.7).

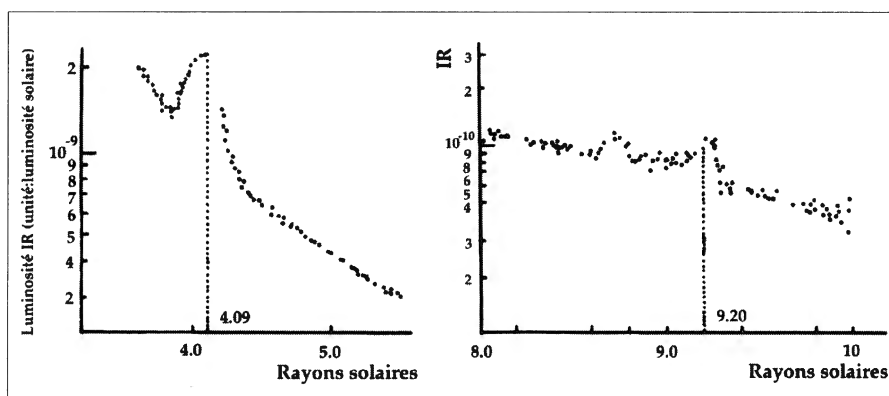


Figure 1.7. Pics de poussière observés en infrarouge pendant l'éclipse solaire de Janvier 1967 par McQueen.

Ces pics correspondent respectivement à des vitesses képlériennes de $432/2=216$ et $432/3=144$ km/s, ce qui correspond exactement au pic principal observé pour les exoplanètes à $0,043 \text{ UA}/M_{\text{sol}}$.

Des observations ultérieures (Lamy et al.1992, Hodapp et al. 1992) n'ont pas confirmé ces détections, mais ceci n'invalide pas les détections précédentes. En effet, de telles structures ne peuvent être que transitoires en raison des nombreuses forces auxquelles sont soumises de telles poussières. Les effets de relativité d'échelle permettent qu'elles s'accumulent dans les zones de haute probabilité, mais elles finissent par tomber vers le Soleil en spiralant, en raison en particulier de l'effet Poynting-Robertson.

Il faut donc que le milieu interplanétaire soit préalablement enrichi en poussières, par exemple du fait de la chute vers le Soleil d'une comète de grande taille, pour que de tels anneaux puissent être observés. Des observations futures en ce sens pourraient permettre de valider ou d'invalider une telle suggestion.

En ce qui concerne la zone de probabilité plus lointaine ($n_i=2$), autour de $0,17 \text{ UA}$, il est probable que le disque initial, dont on a vu que la masse ne dépassait pas le dix-millième de celle de la Terre, n'ait pu s'agréger en petite planète. C'est donc un anneau d'astéroïde qu'il faut chercher autour du Soleil. Une telle recherche a été entreprise par Schumacher et Gay (2001), qui ont conclu qu'il n'existait pas d'objet de taille supérieure à 60 km à cette distance du Soleil. Mais, comme il est probable que de tels corps soient, en fait, plus petits que 10 km , l'existence d'un anneau d'astéroïde n'est toujours pas exclue. Un tel anneau a même en fait été indirectement détecté, à travers ses effets gravitationnels. En effet, Evans et Tabachnik (1999), recherchant l'origine des astéroïdes qui croisent

l'orbite de la Terre, ont trouvé, contrairement à la croyance usuelle selon laquelle ils viennent de la ceinture comprise entre Mars et Jupiter, qu'ils venaient plutôt d'une zone comprise entre 0.1 et 0.2 UA, qui se révèle de plus stable suivant les simulations numériques.

La question pourrait être tranchée par une détection *in situ*, par exemple par un vaisseau du type *Solar Orbiter* (mais qui ne s'approchera pas plus près que 0,21 UA). Une autre possibilité serait de rechercher les perturbations qu'une telle ceinture de petits corps pourrait induire sur le mouvement des astéroïdes qui la traversent. Ainsi on connaît six objets dont les périhélies sont inférieurs à 0,17 UA¹, parmi lesquels 1995 CR, de périhélie $q = 0,119$ et d'inclinaison $i = 4,0$ degrés, et 2000 BD19 de périhélie $q = 0,092$ et d'inclinaison $i = 25,7$ degrés, qui coupe l'écliptique à 0,174 UA, exactement la distance attendue pour le pic de probabilité de la ceinture.

Un niveau de structuration intra-mercuriel encore plus profond peut être détecté à l'aide d'autres objets, les comètes dites « sun-grazers ». Ce sont des comètes dont les orbites sont quasi paraboliques (leur excentricité est très proche de $e = 1$). De ce fait, leur périhélie devient un indicateur direct du moment angulaire.

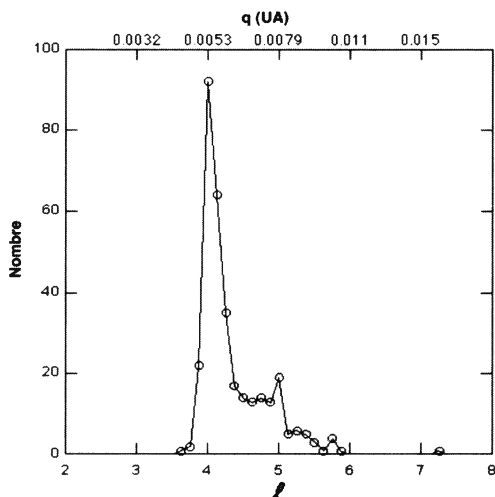


Figure 1.8. Distribution des périhélies de comètes « sungrazer »
(d'après G. Schumacher, in da Rocha et Nottale 2003a), comparée à la prédiction des pics de probabilité de l'approche relativiste d'échelle, suivant laquelle le nombre quantique l doit prendre des valeurs entières.

1. Voir <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>

On prédit alors, théoriquement, des pics de probabilité pour des valeurs du périhélie données par $q_l = (GM/w^2) l(l+1)/2$, où l est un nombre entier. L'analyse des données d'observation confirme cette prédiction de manière remarquable en terme d'une constante w qui est encore trois fois plus grande que celle du Soleil, soit $w = 1296 \text{ km/s} = 9 \times 144 \text{ km/s}$, ce qui manifeste un nouveau niveau de hiérarchie (la vitesse de ces objets peut atteindre 600 km/s).

• Structures transneptuniennes : la ceinture de Kuiper

En 1994, avant la découverte des objets de la ceinture de Kuiper et des exoplanètes, les développements et les prédictions théoriques de la relativité d'échelle permettaient déjà d'écrire :

Nous pouvons espérer que d'autres systèmes planétaires [que le nôtre] soient découverts dans les années à venir, et que des informations nouvelles soient obtenues dans le système solaire très lointain (ceinture de Kuiper, nuage cométaire de Oort...). À cet égard notre théorie est réfutable, car elle fait des prédictions précises concernant de telles observations dans un futur proche : on s'attend à ce que des [grandeurs] observables telles que la distribution des excentricités, de la masse, du moment angulaire, des positions préférentielles des planètes et astéroïdes, [...] soient dans ce cadre de travail des structures universelles partagées par tous les systèmes planétaires¹.

Depuis, de nombreux objets ont été découverts dans la ceinture de Kuiper, qui ont changé notre vue du système solaire lointain — au point que Pluton a perdu son statut de planète principale, devenant une des planètes naines, et pas la principale, de cette ceinture — et permis de valider certaines de ces prédictions théoriques.

La première prédiction qui pouvait être faite consistait à prolonger la loi en n^2 du système solaire externe (fig. 1.5) au-delà de Neptune ($n_e = 5$). Le pic suivant ($n_e = 6$) à 40 UA correspond à la distance de Pluton mais aussi à l'essentiel des objets de la ceinture de Kuiper (KBOs). Au-delà, il existe des objets d'orbites plus excentriques de la ceinture de Kuiper diffusée (SKBOs), dont le pic principal des demi-grands axes est à 57 UA, précisément la valeur prédite pour le pic de probabilité en $n_e = 7$ (Nottale 1993, 1994). Le pic suivant est prédit à 70 UA, alors que la planète naine Eris, dont la masse supérieure à celle de Pluton a contribué à changer la nomenclature, a été découverte avec un demi-grand axe de 68 UA, valeur pour laquelle la distribution observée montre également

1. L. Nottale. *Chaos and Diffusion in Hamiltonian Systems* [Chamonix, Février 1994] (D. Benest and C. Froeschlé Eds.). Frontières. P. 173.

un pic (fig. 1.9). Noter que dans cette analyse, de même que pour les objets de la ceinture entre Mars et Jupiter, il faut aussi tenir compte des trous provoqués dans la distribution par les résonances orbitales avec les grandes planètes.

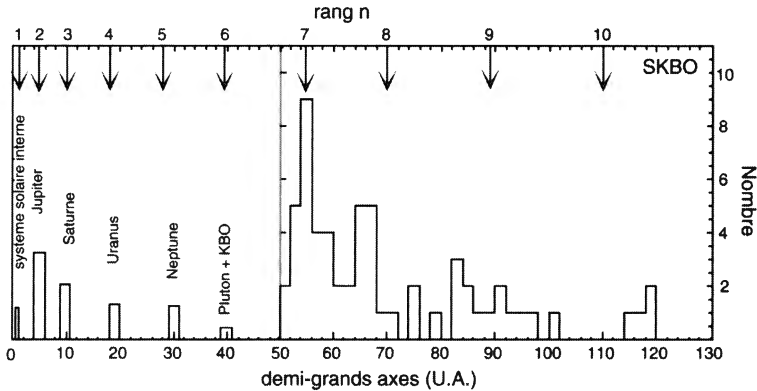


Figure 1.9. Distribution des demi-grands axes des orbites des objets de la ceinture de Kuiper diffusée (SKBOs), comparée aux prédictions théoriques des pics de probabilité (flèches) du système solaire externe.

Encore au-delà, c'est un nouveau niveau hiérarchique d'organisation du système solaire qui se présente. En effet, si l'on considère maintenant la population des SKBOs distants, on peut considérer leur pic principal à 57 UA ($n_e = 7$ du point de vue du système solaire externe) comme nouveau niveau fondamental. À partir de ce niveau $n_{\text{skbo}} = 1$, une nouvelle loi en n^2 est attendue, qui permet de prédire des valeurs préférentielles des demi-grands d'objets très distants de 228, 513, 912, 1425, 2052 UA, etc. (Galoiseau et al. 2004). Une nouvelle fois, les données d'observation sont venues valider cette prédiction de manière remarquable. En particulier, la découverte en 2004 de la planète naine *Sedna* à une distance de 500 UA a été une première manifestation du pic $n_{\text{skbo}} = 3$, mais elle avait été en fait précédée par la découverte d'objets autour de 220 UA correspondant à $n_{\text{skbo}} = 2$. Aujourd'hui ces pics sont remplis par plusieurs objets, et un premier objet autour de 1000 UA correspondant à $n_{\text{skbo}} = 4$ (2006 SQ372) vient d'être découvert (fig. 1.10).

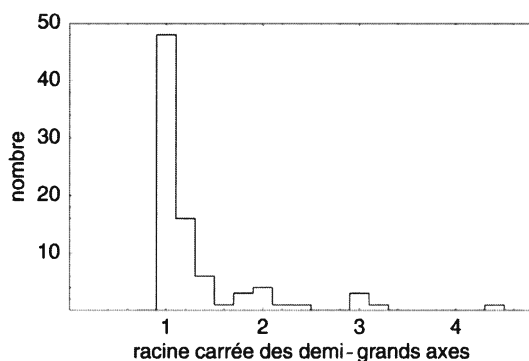


Figure 1.10. Distribution observée des valeurs des racines carrées des demi-grands axes ramenés au pic principal $(a/57 \text{ UA})^{1/2}$, pour les objets de la ceinture de Kuiper diffusée. La théorie prévoit des pics de densité pour des valeurs entières de la variable.

Ainsi, depuis les sungrazers ($w = 9 \times 144 \text{ km/s}$), en passant par les indices d'un sous-système intramercuriel ($w = 3 \times 144 \text{ km/s}$), le sous-système interne des planètes telluriques se poursuivant dans la ceinture entre Mars et Jupiter ($w = 144 \text{ km/s}$), le sous-système externe des planètes géantes se poursuivant dans la ceinture de Kuiper ($w = 144/5 \text{ km/s}$), et enfin les objets de la ceinture de Kuiper distante ($w = 144/35 \text{ km/s}$), ce sont cinq niveaux de structuration hiérarchique emboîtés les uns dans les autres qui peuvent être identifiés dans notre système solaire, tous suivant une loi en n^2 . Les rapports d'échelle entre les constantes de structure de ces niveaux sont respectivement de 3, 3, 5 et 7, ce qui signifie que les rapports d'échelle de distance sont au carré, soit 9, 9, 25, et 49. Autrement dit, entre les plus petites structures des comètes sungrazers et les plus grandes des SKBOs distants, c'est un facteur de l'ordre de 100 000 qui se manifeste dans l'organisation de notre système solaire (fig. 1.11).

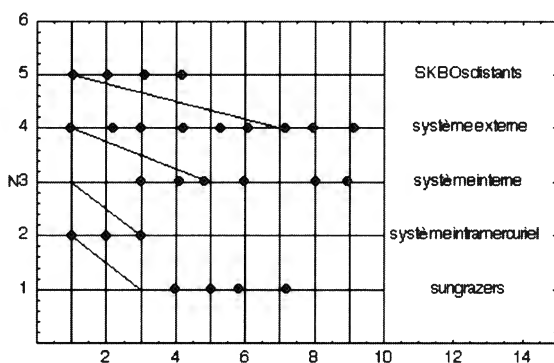


Figure 1.11. Les cinq niveaux hiérarchiques imbriqués actuellement observés dans notre système solaire.

On a porté les racines des demi-grands axes (planètes ou pics de distribution), organisés pour chaque sous-système suivant une loi périodique (statistiquement [sauf pour les comètes « sungrazer » où il s'agit du périhélie et du nombre quantique l (voir le texte)]). Les traits obliques montrent les correspondances entre niveaux, qui sont dans des rapports respectivement de 3, 3, 5 et 7. Pour le système intra-mercuriel, les points sont le rayon du Soleil ($n = 1$) et les deux pics de poussière infrarouge ($n = 2$ et 3). Pour le système interne, Mercure, Venus, la Terre et Mars ($n = 3$ à 6) et Cérès et Hygiea dans la ceinture d'astéroïdes Mars-Jupiter ($n = 8$ et 9). Pour le système externe, le premier point est le niveau fondamental donné par le système interne dans son ensemble, dont le pic de masse est la Terre ($n = 1$), puis Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ($n = 2$ à 5), suivis des pics de distribution des astéroïdes de la ceinture de Kuiper ($n = 6$ à 9), incluant Pluton en $n = 6$ et Eris en $n = 8$. Pour les objets distants de la ceinture de Kuiper, ce sont les pics de distribution, incluant Sedna en $n = 3$.

● Obliquités et inclinaisons des planètes et satellites

Un des aspects de la théorie n'a pas encore été considéré : c'est la possibilité de donner une forme d'équation de Schrödinger, non seulement à l'équation de la dynamique du mouvement translationnel d'un corps, mais aussi à celle du mouvement rotationnel du solide (par exemple, le mouvement d'une toupie).

Or le mouvement rotationnel des planètes et satellites, caractérisé par leur obliquité (l'angle que fait l'axe de rotation du corps sur lui-même avec l'orbite) et leur inclinaison (l'angle que fait l'orbite avec l'écliptique), se révèle dans la plupart des cas chaotique et donc imprédictible sur de longues échelles de temps, comme l'ont montré les travaux, entre autres de Jacques Laskar. L'approche Schrödingerienne de ce problème ne change rien à cet indéterminisme des trajectoires individuelles, mais permet de prédire des pics de probabilité pour les valeurs possibles de la variable (ici des angles). Autrement dit, l'obliquité d'une planète comme Mars, dont l'approche classique dit qu'elle varie au cours du temps de manière erratique sur toutes ses valeurs possibles de 0 à 180°, sera également considérée comme variable en relativité d'échelle, mais avec la propriété de passer plus de temps sur certaines valeurs privilégiées des angles.

La solution de l'équation de Schrödinger du mouvement rotationnel du solide dans le cas libre, qui s'applique aux obliquités et inclinaisons des corps astronomiques, donne un résultat très simple : les pics de probabilité sont quantifiés suivant la relation $\theta = k \pi / N$, où N est entier et k varie entre 0 et N . Or, pour l'ensemble du système solaire, combinant les planètes et les satellites des planètes, il apparaît que cette relation rend compte de la distribution globale observée pour une valeur commune de $N = 7$ (Nottale 1998b). Cette formule redonne bien sûr le cas le plus commun et attendu classiquement des obliquités et

inclinaisons proches de zéro ($k = 0$), mais elle rend compte également d'un grand nombre d'angles proches de $\pi / 7 = 25,7^\circ$ ($k = 1$), dont l'obliquité de notre propre planète, actuellement égale à $23^\circ 27'$, des planètes rétrogrades comme Venus ($k = 7$), et même de celles qui sont couchées sur leur orbite comme Uranus, dont l'obliquité est de 98° pour un pic $k = 4$ prévu à 103° (fig. 1.12).

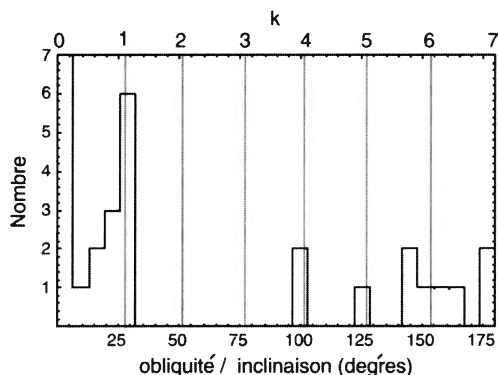


Figure 1.12. Distribution observée (en 1998) des obliquités et inclinaisons des planètes et satellites du système solaire, comparée à la prédiction relativiste d'échelle (valeurs entières du paramètre k).

Des objets ont depuis été découverts dans les pics vides à cette époque.

• Cycle solaire

Un des problèmes fondamentaux de l'astrophysique non encore résolu dans notre propre système solaire est celui de la compréhension du cycle d'activité solaire et de la valeur de sa période, qui est de 11 ans (ou de 22 ans si on tient compte du renversement du champ magnétique). Une solution peut être proposée à ce problème en utilisant l'approche relativiste d'échelle (Nottale, 2004). On suppose que, en continuité avec le disque dans la période de formation planétaire, les différentes quantités physiques qui caractérisent l'activité solaire à la surface du Soleil (densité de nombre des taches, champ magnétique, etc.) peuvent être décrites par une fonction d'onde, solution d'une équation de type Schrödinger (en conséquence de la fractalité de la géométrie).

Les solutions d'une telle équation sont données par une fonction d'onde dont la phase, du point de vue de sa dépendance temporelle, est caractérisée par une période fondamentale, la période de de Broglie. Celle-ci vaut, en mécanique quantique standard, $\tau = 2\pi\hbar/E$, où E est l'énergie du système considéré. Dans la situation macroscopique gravitationnelle considérée ici, la constante de Planck est remplacée par $2mD$, et nous avons vu que la constante solaire est donnée par $D_{\text{sol}} = GM_{\text{sol}}/2w_{\text{sol}}$, où la constante de structure solaire $w_{\text{sol}} \approx 432$ km/s s'identifie à la vitesse

képlerienne au bord du Soleil. Par ailleurs, l'énergie cinétique totale des structures présentes sur la surface solaire est $E = (1/2)m(v_{\text{rot}}^2 + v_{\text{turb}}^2)$, où $v_{\text{rot}} = 2,01 \text{ km/s}$ à l'équateur d'après la période de rotation sidérale du Soleil de 25,38 jours, et où la vitesse d'agitation turbulente est estimée à $v_{\text{turb}} = 1.4 \pm 0,2 \text{ km/s}$.

On prédit donc théoriquement une valeur du cycle solaire :

$$\tau = 2\pi GM_{\text{sol}}/w_{\text{sol}}(v_{\text{rot}}^2 + v_{\text{turb}}^2) = 10,2 \pm 1,0 \text{ ans}$$

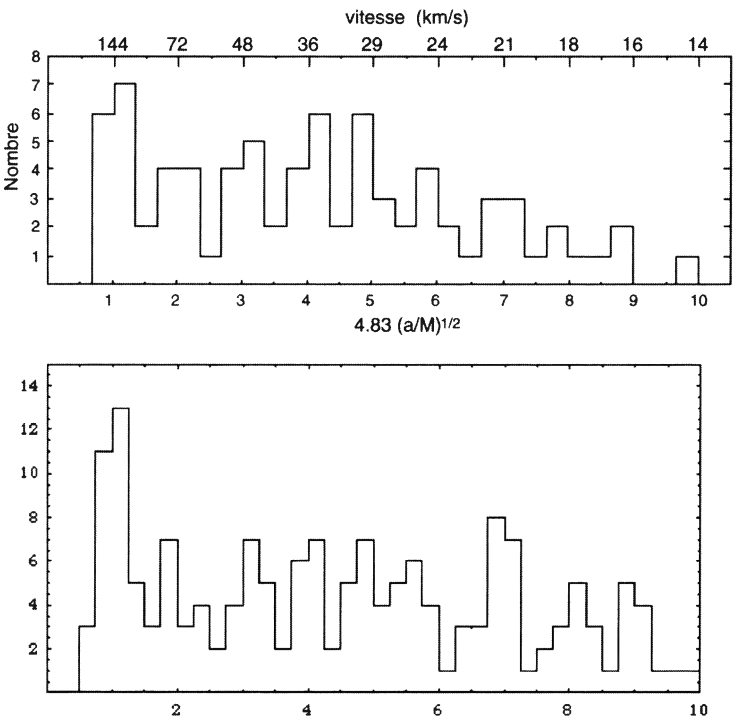
en excellent accord avec la valeur observée de 11 ans.

De plus, les cycles d'un certain nombre d'étoiles inactives de type solaire ont pu être déterminés ces dernières années. Leurs valeurs confirment de manière significative la loi attendue (Nottale, 2008a).

➤ **Systèmes planétaires extrasolaires**

La découverte depuis 1995 de systèmes planétaires autour d'étoiles autres que le Soleil a permis de mettre à l'épreuve de manière remarquable les prédictions théoriques de l'approche relativiste d'échelle à la formation de ces systèmes.

● **Demi-grands axes**



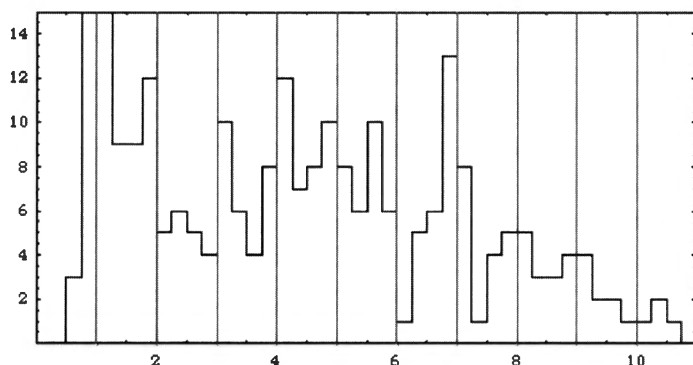


Figure 1.13. Distribution observée des demi-grands axes des orbites des planètes du système solaire interne et des planètes extrasolaires, comparée à la prédiction théorique de pics de probabilités pour des valeurs entières de la variable $4,83 (a/M)^{1/2}$, où a est le demi-grand axe et M la masse de l'étoile.

Haut : données 2002 (79 planètes); Milieu : données 2005 (164 planètes); Bas : données 2008 (301 planètes). Le pic principal en $n = 1$ (niveau fondamental), qui contient en tout 74 planètes dans les données 2008 a été coupé pour faire ressortir les autres pics. La probabilité d'obtenir un tel accord par hasard est aujourd'hui inférieure à 10^{-7} .

En particulier, une des conséquences majeures de l'application aux planètes du système solaire interne de la loi en n^2 prédite pour les demi-grands axes a été, comme nous l'avons vu, le fait que Mercure correspondait à $n_i = 3$, et que deux pics de probabilité supplémentaires étaient donc attendus à $0,043 \text{ UA}/M_*$ et $0,17 \text{ UA}/M_*$ ¹.

Dans notre propre système planétaire, la distribution de la matière est telle que seule une faible masse peut venir éventuellement actualiser ces pics de probabilité (passant ainsi d'une densité de probabilité à une densité de matière). Malgré ce fait (contingent), nous avons apporté des indices d'existence possible de ces pics à travers des petits corps et des poussières transitoires. Mais le pic de matière de notre système à la distance de Jupiter n'a pas de raison d'être universel. On peut ainsi s'attendre à ce que ces deux pics de probabilité, marginaux dans notre propre système, soient par contre réalisés dans d'autres systèmes, tout particulièrement le niveau fondamental à $0,043 \text{ UA}/M_*$ (Nottale, 1993, 1994).

Il est ainsi remarquable que les premières planètes découvertes, en particulier la première *51 Peg* (par Mayor et Queloz en 1995) l'aient été précisément à cette distance (Nottale 1996b, Nottale et al.2000). Dans

1. On rappelle que la masse de l'étoile M_* fixe l'échelle de longueur et de temps du système considéré, et donc que les distances ne doivent pas être comparées directement entre systèmes différents, mais seulement après normalisation par cette masse.

les dernières données (fig. 1.13), qui concernent plus de 300 exoplanètes, ce sont plus de 70 planètes qui s'accumulent maintenant dans ce pic fondamental (Nottale 2008a).

De telles planètes, appelées « *Jupiters chauds* » du fait de leur masse et de la proximité à leur étoile, ne se forment sans doute pas si près mais plus loin de l'étoile et migrent ensuite du fait de l'interaction avec le disque protoplanétaire. Une telle variation des demi-grands axes (et donc de l'énergie), était considérée comme interdite avant la découverte de ces objets qui a depuis imposé ces théories de « migration ». Le modèle de formation relativiste d'échelle participe clairement de ce type de théories, puisqu'il est précisément fondé sur l'interaction gravitationnelle entre les différents constituants du disque protoplanétaire et sur la perte d'éléments orbitaux déterministes. Le problème des modèles de migration classiques est néanmoins qu'on ne voit pas ce qui empêche les planètes de migrer jusqu'à tomber éventuellement sur l'étoile, ni pourquoi elles s'accumuleraient dans des zones précises ainsi qu'observées. Par contre, dans le cadre d'une migration contrainte par une équation de Schrödinger gravitationnelle, celle-ci se fait en accord avec les pics de probabilité de la loi en n^2 (Galoiseau et al.2004).

• Excentricités

La découverte de larges excentricités pour de nombreuses exoplanètes est un autre des puzzles posés par ces objets, en plus des Jupiters chauds, aux théories standard de formation. En effet, ces modèles considéraient que la formation des planètes venait d'une accréation par balayage, ce qui privilégie les trajectoires quasi-circulaires. Dans le cadre relativiste d'échelle, la formation des planètes peut se faire de manière purement gravitationnelle par contraction des zones de haute densité, l'accréation n'intervenant que dans une phase finale. Ceci permet de fabriquer des orbitales dans des états quelconques des quantités conservatives comme l'énergie et le vecteur de Runge-Lenz, ce qui mènera après contraction à des demi-grands axes et des excentricités quelconques, mais caractérisés par des valeurs quantifiées.

Ainsi on s'attend, comme nous l'avons vu, à ce que la distribution des excentricités présente des pics de densité pour des valeurs $e = k/n$, où k varie entre 0 et $n-1$. Les données d'observation (fig. 1.14) sont compatibles avec cette prédiction théorique (Nottale 2006a).

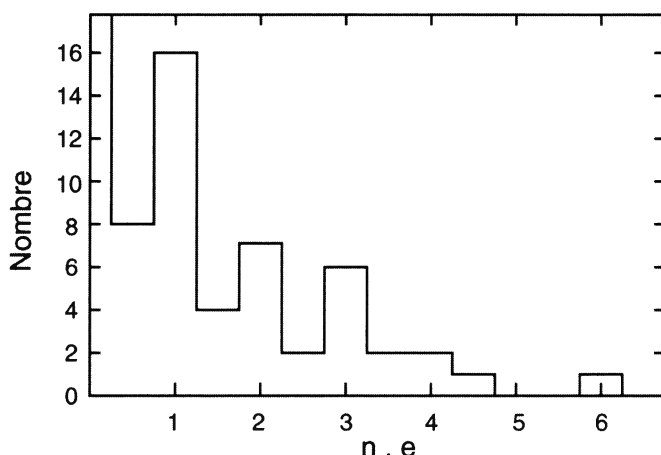


Figure 1.14. Distribution des excentricités des planètes du système solaire interne et des exoplanètes.

La théorie prédit que la distribution du produit de l'excentricité par la variable $n = 4,83 (a/M)^{1/2}$ doit montrer des pics de densité pour des valeurs entières, ce qui est le cas.

• Exoplanètes autour du pulsar PSR 1257+12

La première découverte d'un système planétaire extrasolaire est en fait le système de trois planètes trouvées en 1992-1994 par Wolszczan autour du *pulsar* PSR B1257+12. Ce système, bien que son étoile ne soit pas de type solaire, mérite une étude particulière. En effet, les planètes résultent sans doute d'un disque secondaire formé autour de l'étoile à neutron après l'explosion de la supernova qui lui a donné naissance. L'approche relativiste d'échelle s'applique tout aussi bien à cette situation (Nottale 1996b, 1998c). Il s'agit même d'un cas d'école, car la très petite masse des planètes (quelques masses terrestres pour les deux principales et la masse de la lune pour la troisième), implique que l'approximation utilisée, où l'on n'a tenu compte que du potentiel de l'étoile mais pas de l'autopotential du disque, sera très bien vérifiée dans ce cas. Les effets mutuels entre les sous-structures du disque, puis entre les planètes qui se sont formées à partir de ces sous-structures, seront donc minimes (ces derniers ont d'ailleurs pu être observés), et l'on peut ainsi s'attendre, si le modèle est correct, à un accord entre prédiction théorique et observations de grande précision.

Grâce à ces propriétés, on peut pousser plus loin le modèle de formation et définir de manière plus précise les valeurs possibles attendues des éléments orbitaux des planètes. La loi en n^2 correspond aux *pics de probabilité* des distributions de densité, et s'applique ainsi en moyenne même quand il y a des perturbations à ajouter à ce modèle simple, ce

qui est le cas des systèmes étudiés jusqu'ici. Par contre, dans le cas où une planète se forme à partir d'un ensemble de planétésimaux qui remplissent une orbitale donnée, sans perturbation importante excédentaire, la loi de conservation du centre de gravité implique une correction à la loi de distance en n^2 , car les distributions ne sont pas symétriques (fig. 1.4). La moyenne de la distribution, dans le cas d'excentricité nulle, est en $n^2 + n/2$, c'est-à-dire $n^2 (1+1/2n)$, ce qui donne par exemple une correction de 10 % pour $n = 5$.

La comparaison avec les valeurs observées des demi-grands axes donne effectivement des résultats remarquables par leur précision. L'accord avec la loi en n^2 est déjà extrêmement satisfaisant : les trois planètes A, B et C correspondent respectivement à $n = 5, 7$ et 8 , et les rapports de périodes observés donnent $(P_B/P_C)^{1/3} = 0,878$ à comparer à $7/8 = 0,875$ et $(P_A/P_C)^{1/3} = 0,636$ à comparer à $5/8 = 0,625$. L'accord est de l'ordre de 1 % et même de 3 ‰ pour le couple BC (fig. 1.15).

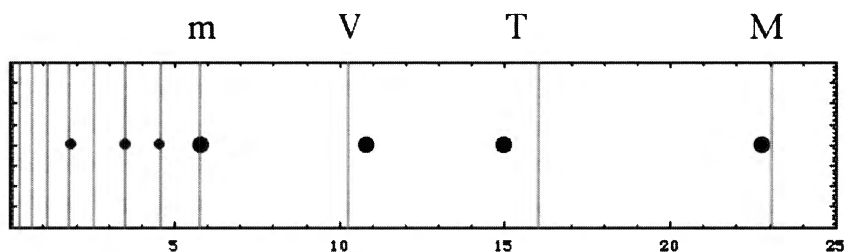


Figure 1.15. Système des trois planètes autour du pulsar PSR1257+12 comparé au système solaire interne (m = Mercure, V = Venus, T = Terre, M = Mars) et à la loi de distance en n^2 .

On a porté les valeurs de (a/M) , où a est le demi-grand axe et M la masse de l'étoile, pour une masse du pulsar de 1.5 masse solaire. La constante de structure du système solaire interne est de 144 km/s et celle du système PSR1257+12 est de $3 \times 144 = 432$ km/s.

Mais si l'on passe à la loi en $n^2 + n/2$, la précision de l'accord devient étonnante : il nous faut calculer les rapports de période observés avec plus de décimales pour trouver une différence. Les périodes mesurées par Wolczzsan et ses collaborateurs étant $P_A = 25,262(3)$ jours, $P_B = 66,5419(1)$ jours et $P_C = 98,2114(2)$ jours (le nombre entre parenthèses étant l'incertitude sur la dernière décimale), on trouve :

$$(P_B/P_C)^{1/3} = 0,8783 \text{ à comparer à } (52,5/68)^{1/2} = 0,8786;$$

$$(P_A/P_C)^{1/3} = 0,63597 \text{ à comparer à } (27,5/68)^{1/2} = 0,63593;$$

L'accord relatif est cette fois au niveau de 3×10^{-4} et de 6×10^{-5} (figure 1.16). Il est rare de trouver en astronomie une telle précision dans la comparaison entre prédiction théorique et données d'observation.

Un fait qui mérite d'être souligné est que, avec les valeurs mesurées des périodes jusqu'en 2003, l'accord était de quelque 10^{-4} pour les deux rapports. Mais une nouvelle détermination prenant en compte de nouvelles observations, ainsi que les effets mutuels entre planètes B et C, a changé les périodes de manière importante. On aurait pu s'attendre à une dégradation de la précision avec un tel changement. Bien au contraire, la précision sur le rapport BC est restée la même, mais celle sur le rapport AC a été améliorée d'un facteur 12 au point d'atteindre les barres d'erreur observationnelle.

Pour donner une idée de la précision que cela représente, si l'on veut réaliser un modèle réduit de ce système planétaire en plaçant la planète C à 68 m du pulsar, la planète B sera à 4 cm de la valeur attendue et la planète A à 3 mm !

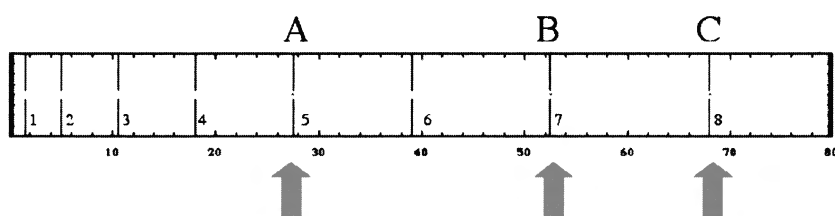


Figure 1.16. Comparaison entre les positions possibles prédites (traits, loi en $n^2 + n/2$ obtenue par conservation du centre de gravité de la distribution de masse) et les positions observées (points) des trois planètes autour du pulsar PSR 1257+12.

Il faudrait faire un zoom d'un facteur 1000 pour voir des écarts entre les demi-grands axes prédits et observés.

La prise en compte des effets mutuels des planètes B et C (qui sont déjà intervenus dans l'amélioration de la détermination des paramètres orbitaux par Konacki et Wolszczan 2003) permet d'améliorer encore ce résultat et de comparer les données à une nouvelle prédiction théorique (Nottale, 2008b). En fait, ces effets sont de trois sortes : conjonction, précession et quasi-résonance. Le rapport prédit des périodes des planètes C et B est de 1,474 et le rapport observé de 1,476, ce qui est proche de 1,5, et donc d'une résonance 3:2 dans laquelle les planètes se retrouvent dans la même configuration, quand l'une fait deux tours et l'autre trois. En ce qui concerne les demi-grands axes, on peut montrer, aussi bien par une intégration numérique (Gozdziewski *et al.*, 2005), qu'analytique (Nottale, 2008b), que les effets de précession et de quasi-résonance ne jouent aucun rôle, et qu'ils sont remarquablement stables sur le long

terme. Cela justifie la comparaison entre les prédictions théoriques qui concernent, strictement, la période de formation du système planétaire, et les données d'observation, qui s'appliquent au système actuel (environ un milliard d'années après sa formation). Il reste l'effet de conjonction qui correspond aux rapprochements réguliers des deux planètes, ce qui implique une légère fluctuation des rapports des demi-grands axes effectifs (fig. 1.17). Ce rapport, qui vaut en moyenne 0,99916 fois la valeur prédite (52,5/68), peut atteindre 0,9995 à son maximum. On s'est donc encore rapproché d'un facteur 2 de la valeur théorique attendue à la fin de la période de formation (Nottale, 2008b).

Or, cette valeur théorique est elle-même caractérisée par une certaine largeur, qui est précisément de cet ordre, due aux relations de Heisenberg. En effet, comme toute solution d'équations de type quantique, la valeur prédite de l'énergie (et donc du demi-grand axe qui s'en déduit quand le système est redevenu classique) est accompagnée d'une « *largeur de raie* » donnée par les échelles de temps caractéristiques des fluctuations des solutions. Celle-ci peut être estimée, dans un modèle de formation plus complet, à travers l'évolution des paquets d'onde qui vont se former dans le disque de manière préalable à la formation des planètes. On arrive donc finalement à un accord (statistique) très satisfaisant entre modèle théorique et observations pour les demi-grands axes (et donc les périodes).

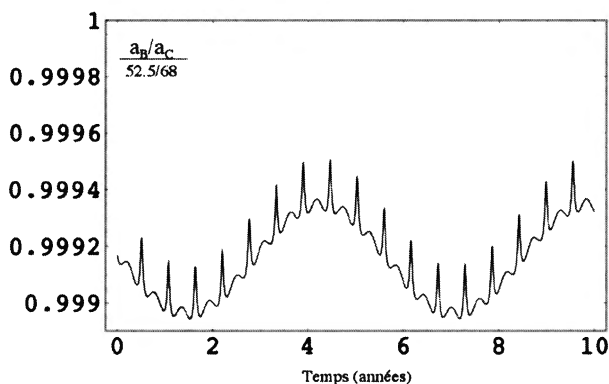


Figure 1.17. Variation au cours du temps du rapport des demi-grands axes des planètes B et C du système planétaire autour de PSR 1257+12, rapporté au rapport prévu (pour $n = 7$ et 8).

L'effet de conjonction implique que le système passe à 5×10^{-4} de la valeur prévue d'après le modèle de formation (c'est-à-dire $68a_B/52.5a_C = 1$), soit deux fois plus près que la valeur moyenne. L'écart résiduel, de 0,00025 sur les nombres quantiques, est de l'ordre de grandeur de la « *largeur de raie* » attendue d'après la prédiction théorique macroquantique.

En ce qui concerne les excentricités, les effets de précession et de quasi-résonance impliquent une importante variation relative d'un facteur presque 3 : les excentricités des deux planètes varient en opposition entre environ 0,0125 et 0,0285 sur une période d'à peu près 6 000 ans. Cela n'aurait donc pas de sens de prédire une valeur précise de l'excentricité. Par contre, on peut montrer (Nottale 2008b) qu'au sein de cette variation, il existe une quantité conservative (un invariant) qui vaut $Q_e = e_B^2 + K e_C^2$, où $K = (m_C/m_B)(a_C/a_B)^{1/2}$ (e , a et m désignant respectivement les excentricités, les demi-grands axes et les masses des planètes). Pour le système considéré, K vaut $1,03 \pm 0,10$, et on trouve pour l'invariant $Q_e(\text{obs}) = 0,001005 \pm 0,000018$. Là encore, un modèle de formation plus poussé pourrait permettre de rendre compte d'une telle valeur comme l'une de celles attendues à partir de l'existence d'un régime « *schrödingérien* » pendant cette formation. En effet, contrairement à la mécanique quantique standard, appliquée aux atomes, où la fonction d'onde ne décrit qu'une amplitude de probabilité de présence de l'électron, ici cette densité de probabilité s'applique de manière individuelle à un grand nombre de planétésimaux et se traduit donc en une densité de matière pour leur ensemble. Mais il faut alors ajouter les effets d'autogravitation qui impliquent une contraction des sous-structures du disque sur elles-mêmes (fig. 1.18).

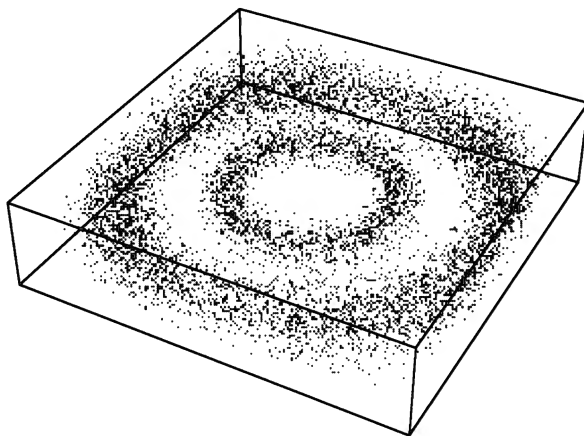


Figure 1.18. Exemple de sous-structures solutions d'une équation de Schrödinger macroscopique dans un disque proptoplanétaire.

Cas de deux orbitales correspondant à deux nombres quantiques différents (comme pour la formation des planètes B et C autour du pulsar PSR1257+12).

De telles sous-structures contractées doivent rester solutions d'une équation de Schrödinger tout en gardant la même valeur moyenne, ce qui se traduit par un facteur d'échelle entier sur la constante de structure et donc aussi sur les nombres quantiques (c'est une nouvelle manifestation de l'invariance d'échelle de la gravitation, combinée avec une théorie macroquantique). Le résultat est qu'on s'attend à voir les rangs $n = 7$ et 8 se transformer en $7f$ et $8f$, avec f entier croissant au cours du temps (les orbitales correspondantes deviennent quasi-classiques et de plus en plus étroites relativement). La valeur la plus probable pour les excentricités est 0 (et celles-ci sont effectivement proches de 0), mais on peut à un niveau de précision supérieur considérer le premier état excité, donné par $1/n$ (voir plus haut), c'est-à-dire ici $1/7f$ et $1/8f$. Il est, à cet égard, intéressant de constater que pour $f = 6$, ce qui correspond précisément à la séparation spatiale des orbitales (celles-ci étaient déjà bien séparées dans l'espace des phases), on trouve $Q_e(\text{pred}) = (1/42)^2 + K(1/48)^2 = 0,001017$, en bon accord avec la valeur observée $0,001005$ aux incertitudes près. Une telle proposition, peut être mise à l'épreuve par des observations futures, puisqu'elle permet une estimation théorique des masses $m_C/m_B = 0,965 \pm 0,058$, plus précise que leur détermination actuelle.

Notons enfin que l'accord entre théorie et observations s'étend à la constante de structure elle-même. En effet, en prenant pour masse du pulsar la masse standard $1,4 \pm 0,1$ masse solaire, on obtient pour cette constante $w = (2,96 \pm 0,07) \times 144 \text{ km/s}$, c'est-à-dire une valeur qui englobe dans sa barre d'erreur la constante de structure « solaire » $w_{\text{sol}} = 432 \text{ km/s}$.

Ces résultats permettent de faire des prédictions nouvelles sur la présence d'éventuelles planètes ou petits corps supplémentaires (des objets de la taille d'astéroïdes pourraient être détectés) autour du pulsar. Par exemple, les périodes prédites pour $n = 1, 2$ et 3 sont respectivement de $0,322, 1,958$ et $5,96$ jours. Une détection marginale (avec une probabilité de 10^{-3}) d'une planète de $0,03$ masse terrestre avec une période de $2,2$ jours a été proposée (Nottale, 2006b) à partir d'observations journalières de Wolszczan (2000) sur un mois au radio-télescope d'Arecibo.

Nous avons, dans cette revue des applications astrophysiques de la relativité d'échelle à l'étude des structures gravitationnelles, privilégié les échelles des systèmes planétaires, qui ont fourni un grand nombre de résultats nouveaux. Nous allons maintenant conclure celle-ci par un survol rapide d'effets concernant des échelles supérieures, de structures internes à notre galaxie aux grandes structures extragalactiques.

► Structures galactiques

• Formation des étoiles

Comme nous l'avons fait remarquer ci-dessus, l'approche relativiste d'échelle fournit des *solutions génériques au problème de la formation de structures* à partir d'un milieu de densité constante. Ces solutions, décrivent des morphologies simples en fonction d'états quantifiés d'énergie et de moment angulaire. On s'attend à trouver, dans les zones de formation (d'étoiles, d'amas d'étoiles, etc.) un niveau « *fondamental* » de morphologie formé d'un objet unique à symétrie sphérique ($n = 0$), puis des niveaux « *excités* » formé de paires ($n = 1$), puis de triplets alignés ou de trapèzes ($n = 2$), des chaînes, etc. Il est dans ces conditions remarquable que les associations stellaires, formées d'étoiles jeunes et chaudes O et B, et reconnues depuis longtemps comme zones de formation, montrent précisément de telles structures en paires, chaînes et trapèzes, tel le célèbre trapèze d'Orion (fig. 1.19 ; da Rocha et Nottale, 2003a).

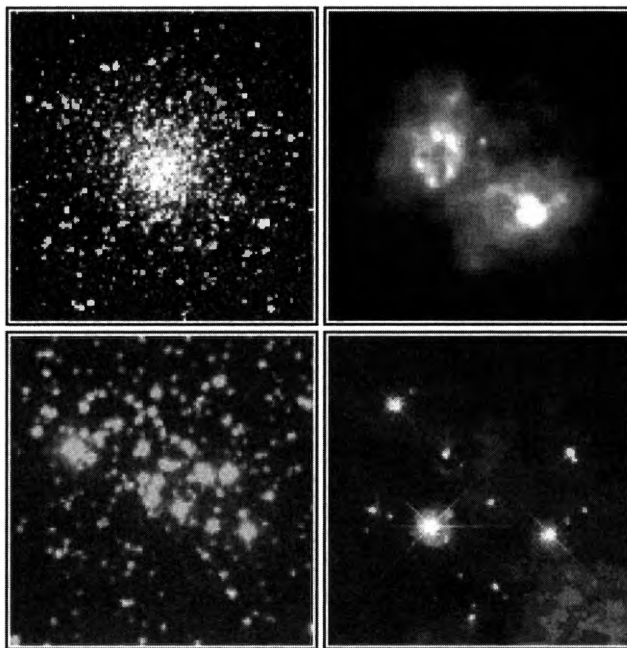


Figure 1.19. Exemples de morphologies d'amas d'étoiles.

En haut à gauche, l'amas globulaire M13 ; en haut à droite, la nébuleuse « papillon » dans M59 (Heydari) ; en bas à gauche, l'amas en chaîne NGC 7510 ; en bas à droite, le trapèze d'Orion. Comparer à la figure 1.2.

•Étoiles doubles

Nous venons de voir, brièvement, que l'existence même d'étoiles doubles (une très grande proportion des étoiles de notre Galaxie est formée de binaires), est attendue dans le cadre relativiste d'échelle. Qu'en est-il au niveau quantitatif? Par un changement de variables, le problème gravitationnel du mouvement d'étoiles doubles se ramène au problème de Kepler. On s'attend donc à retrouver le même type de structure que pour les systèmes planétaires. Les binaires à éclipse, par leur proximité, offrent un échantillon permettant de mettre une telle proposition à l'épreuve (Nottale et Schumacher 1998). C'est ainsi que la vitesse moyenne des 1048 objets du catalogue de Branczewicz et Dvorak est de $w = 289,4 \pm 3,0 = 2 \times (144,7 \pm 1,5)$ km/s (fig. 1.20). On retrouve donc, une nouvelle fois, une valeur multiple de la constante de structure du système solaire interne et des exoplanètes, 144 km/s.

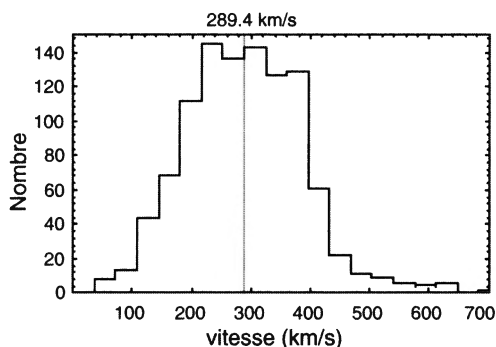


Figure 1.20. Distribution des différences de vitesse entre composantes d'étoiles doubles dans le catalogue de Branczewicz de binaires à éclipse.

La vitesse moyenne est, aux barres d'erreur près, deux fois la constante de structure du système solaire interne, $2 \times (144,7 \pm 1,5)$ km/s.

•Nébuleuses planétaires

Les « nébuleuses planétaires », en dépit de leur nom (qui vient de leur fausse identification à des nébuleuses protoplanétaires à l'époque de leur découverte) sont en fait une étape d'évolution ordinaire des étoiles de faible masse qui éjectent leur enveloppe extérieure. Cette enveloppe se trouve alors ionisée par la radiation de l'étoile centrale et devient lumineuse.

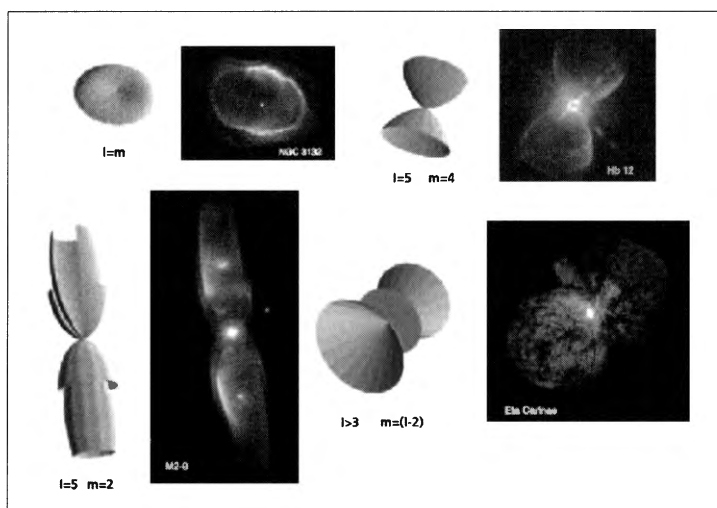


Figure 1.21. Comparaison entre des nébuleuses planétaires et d'autres objets montrant des éjections et/ou accrétions et les morphologies les plus probables déduites de la description relativiste d'échelle par une équation de forme Schrödinger.

Dans le cadre de l'approche relativiste d'échelle, les équations qui décrivent une telle éjection (fig. 1.21) se ramènent à une équation de Schrödinger typique de celles qu'on rencontre dans la description d'un processus de collision en physique des particules (da Rocha et Nottale, 2003a, b). Comme on le verra, la même équation peut également être utilisée pour décrire un processus de croissance florale (fig. 1.22). Dans tous ces cas, qui correspondent pourtant à trois échelles très différentes, les échelles microscopiques des atomes et particules, les échelles mésoscopiques du vivant et les grandes échelles astronomiques, la nature du problème posé est semblable : *il s'agit de décrire une croissance ou une éjection à partir d'un centre*, ce qui se ramène dans un cadre de mécanique de type quantique à l'évolution d'une onde de probabilité sphérique sortante (ou entrante), solution d'une équation de Schrödinger. Il y a donc une base commune, qui va s'exprimer de manière partiellement différente, du fait des spécificités de chaque problème. Par exemple, les solutions sont symétriques pour les collisions de particules sur des atomes et les nébuleuses planétaires, mais pas pour les formes florales où intervient une dissymétrie haut-bas, due à la gravité et à l'orientation de la croissance à partir de la tige et du bourgeon. La symétrie cylindrique est également brisée par une modulation quantifiée, qui va donner les pétales dans le cas des formes florales, ce qu'on retrouve également pour certaines nébuleuses planétaires.



Figure 1.22. Une même forme de solutions de l'équation de Schrödinger :
La croissance à partir d'un centre décrit par une onde sphérique sortante, peut s'exprimer à des échelles très différentes (collision de particules, formes florales et les nébuleuses « planétaires », qui sont des étoiles qui éjectent leurs enveloppes extérieures).

Les solutions obtenues (fig. 1.3 a, b, c) décrivent des morphologies plus probables que d'autres en termes de pics de probabilité pour les angles d'éjection. Ces morphologies quantifiées sont, elles-mêmes, en correspondance avec des valeurs plus probables de l'énergie et du moment angulaire. Une telle approche permet donc de faire des prédictions qui pourront être validées par les « *extrêmement grands télescopes* » (ELT) du proche futur, lesquels permettront de mesurer les champs de vitesse interne à ces objets et de mettre à l'épreuve une telle corrélation entre morphologie, angles et moments angulaires.

Il est déjà possible, pour certains objets jeunes, de corriger l'effet d'orientation et de comparer l'angle d'éjection initial observé à celui prédit d'après la morphologie. C'est le cas par exemple pour les restes de la supernova 1987A (fig. 1.23), dont l'angle mesuré est de $41.2 \pm 1.0^\circ$, en bon accord avec l'angle prédit de $40,89^\circ$.

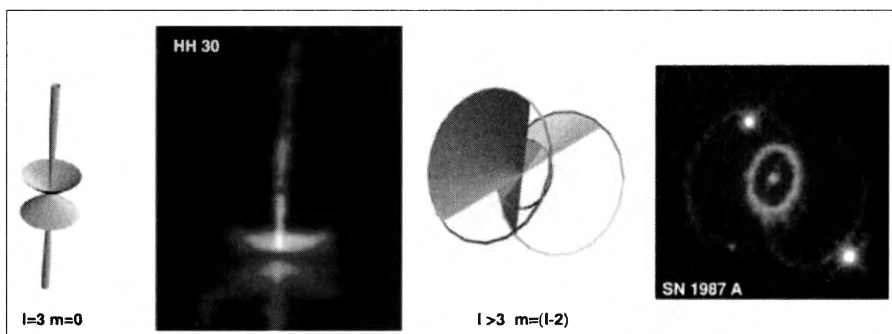


Figure 1.23. Reconstruction et déprojection des restes de la supernova 1987A.
Correspondant à un état de quantification $l = 2$ et $m = 4$ (nombres quantiques caractérisant le carré du moment angulaire total et sa projection sur un axe).

Remarquons enfin qu'une telle modélisation n'est en rien contradictoire avec celles qui sont ordinairement proposées pour expliquer ces formes non sphériques (par exemple, présence d'un compagnon). L'approche de la relativité d'échelle introduit seulement des éléments supplémentaires à ces modèles à un niveau de physique fondamental (existence de valeurs plus probables que d'autres des angles, corrélation morphologie-angles-moment), sans *a priori* sur les raisons plus particulières pour lesquelles le moment angulaire et sa projection ont pris telle ou telle valeur pour tel objet. De plus, des formes non encore observées peuvent être prédites théoriquement, telles des structures à trois couches ou plus (da Rocha et Nottale 2003a, b).

• Structures extragalactiques

Évoquons rapidement, pour finir, certaines applications dans le domaine extragalactique.

– *Courbes de rotation des galaxies spirales*

L'aplatissement à l'extérieur des courbes de rotation des galaxies spirales est l'un des premiers effets dynamiques qui ont été interprétés en termes d'une masse manquante. En effet, on ne voit plus, ou très peu, de matière dans ces zones extérieures, ce qui devrait impliquer une décroissance de la vitesse képlérienne en $1/\sqrt{r}$. Le fait que la vitesse ne décroît pas mais reste pratiquement constante pourrait être dû à l'existence de matière « sombre » formant un halo pour ces galaxies, qui ne rayonne pas comme les étoiles mais a néanmoins un effet gravitationnel.

Une autre proposition a consisté à postuler que la gravitation newtonienne était modifiée aux échelles extragalactiques (hypothèse MOND), mais il est difficile de concilier une telle hypothèse avec les variations de l'effet observé à des échelles différentes. En effet, la quantité de matière noire (ou son équivalent énergétique) nécessaire pour expliquer les courbes de rotation plates des galaxies est de 5 à 10 fois la matière visible, alors que pour les amas de galaxies, il y a un facteur 10 supplémentaire. Or le bilan cosmologique global montre que, pour une contribution de matière visible de 0,005, celle de matière noire ordinaire (baryonique) est dix fois plus grande, alors que la quantité totale de matière noire doit être encore 5 à 6 fois plus grande, autour de 0,27 (fig. 1.24). Ceci implique que *l'essentiel de la matière noire* des amas et des grandes structures, si elle existe, *doit être constitué de matière exotique, non baryonique, de nature inconnue*. Par contre, en ce qui concerne les galaxies, le taux observé est tel qu'il est possible d'en rendre compte avec de la matière ordinaire. Il est très probable que les galaxies spirales possèdent en effet un halo de matière non lumineuse (objets compacts, naines brunes, gaz n'ayant

pas formé d'étoiles, etc.) en continuité de leur partie visible, ce qui a été validé par plusieurs études, en particulier par les effets de « microlentilles » gravitationnelles, mais pas à un niveau qui rende compte des courbes de rotation plates.

La relativité d'échelle peut contribuer au débat par la description du mouvement, sur de grandes échelles de temps, d'une telle matière. La fractalité et la non-différentiabilité effective d'un tel mouvement transforme l'équation de la dynamique en équation de Schrödinger, qui peut elle-même se mettre sous la forme d'équations de l'hydrodynamique standard, mais avec un terme d'énergie potentielle supplémentaire. On peut donc suggérer, dans ce cadre, qu'une partie des effets dynamiques et de lentille gravitationnelle, attribués à de la matière noire (laquelle résiste à toute détection) soit en fait une conséquence de l'existence de ce nouveau « *potentiel noir* », qui manifeste la fractalité de l'espace-temps de la même manière que le potentiel newtonien manifeste sa courbure (Nottale, 2001c, 2006a).

Cette proposition demande à être développée plus avant (il s'agit du cas difficile à étudier où l'auto potentiel est dominant), mais on peut déjà faire remarquer un résultat encourageant : *on retrouve dans la distribution des vitesses des galaxies spirales des pics de probabilités pour des vitesses tout à fait semblables à celles des systèmes planétaires (144 km/s et ses multiples ou sous-multiples).*

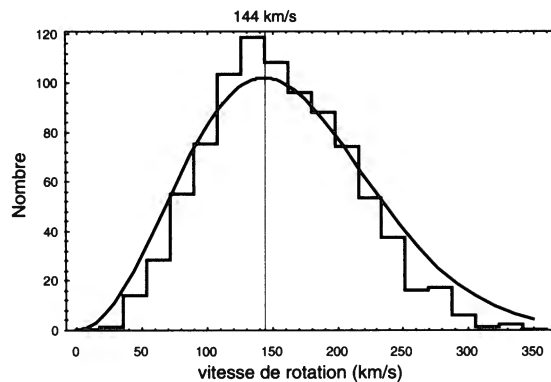


Figure 1.24. Distribution observée des vitesses extérieures (dans la zone des courbes de rotations « plates » où elles sont quasiment constantes) de 967 galaxies spirales (catalogue de Persic et Salucci 1995).

Le pic de cette distribution est à une vitesse de 144 km/s, égale à la constante de structure gravitationnelle du système solaire interne.

– Groupes de galaxies

Les groupes compacts de galaxies présentent un puzzle pour la dynamique de l'évolution et de l'interaction des systèmes de galaxies, car leurs morphologies sont souvent instables. Hickson, l'auteur d'un catalogue de tels objets, en conclut que de nouveaux groupes compacts se forment constamment, et qu'on observe finalement dans ces cas instables le processus même de formation des galaxies.

Il est donc intéressant à cet égard de remarquer que les morphologies observées dans ces groupes sont semblables à certaines morphologies des associations d'étoiles en formation et aux prédictions de l'approche relativiste d'échelle (fig. 1,2, 1,19 et 1,25 ; da Rocha et Nottale, 2003a).

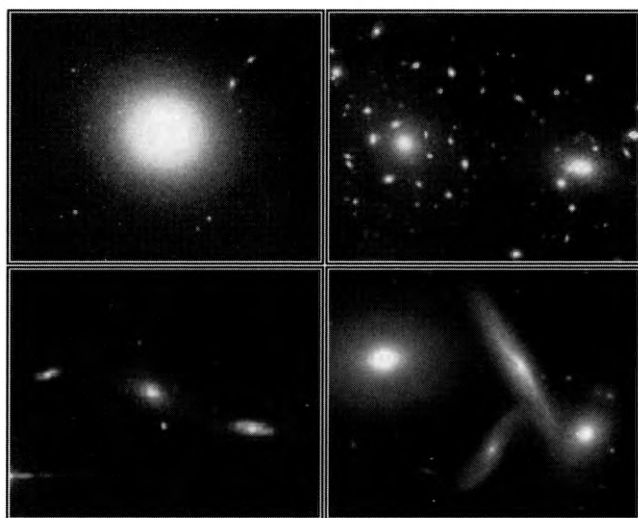


Figure 1.25. Regroupement de galaxies.

Comme pour les zones de formation d'étoile, les groupes ou amas compacts de galaxies (considérés comme jeunes du fait de leur configuration instable) montrent aussi des structures caractéristiques du type galaxie isolée (en haut à gauche), galaxies doubles (en haut à droite), triplets alignés (en bas à gauche), quadrilatères (en bas à droite), etc. Ces structures sont à comparer à la prédiction de l'approche relativiste d'échelle (équation de type Schrödinger pour la densité de probabilité, donc de matière) pour la formation à partir d'un milieu de densité constante (fig. 1.2).

– Paires de galaxies

En particulier, comme pour les étoiles doubles, le cas des paires de galaxies est particulièrement intéressant, aussi bien du point de vue de la formation que de l'évolution. De plus, celui-ci nous concerne tout particulièrement puisque notre propre Groupe Local de galaxies est formé de deux galaxies géantes, notre Galaxie (la Voie lactée) et la nébuleuse d'Andromède et de leurs satellites plus petits.

En ce qui concerne tout d'abord la formation, nous avons vu que cette configuration était celle attendue pour le premier niveau « *excité* » du potentiel d'oscillateur harmonique correspondant à une croissance de structure à partir d'un milieu de densité constante (ce qui est dans tous les cas une première approximation pour ce milieu).

Ensuite, en ce qui concerne la structure actuelle de ces paires, comme nous l'avons déjà remarqué dans le cas des paires d'étoiles, la question de leur mouvement peut se ramener, mathématiquement, au problème de Kepler du mouvement d'une particule test, de masse négligeable, autour d'un centre massif. C'est donc la même équation de Schrödinger, dans l'approche de la relativité d'échelle, qui régit les structures probabilistes des planètes, des exoplanètes, des étoiles doubles et des galaxies doubles.

Mais il y a mieux : comme nous l'avons vu, la description quantique macroscopique gravitationnelle, étant toujours fondée sur le principe d'équivalence d'Einstein, implique que la masse inerte des objets dont on suit le mouvement n'intervient plus dans les équations. Ainsi la constante de structure macroscopique n'en dépend pas, contrairement à celle de la mécanique quantique standard qui vaut $\hbar/2m$. La conséquence fondamentale de cet autre comportement est que ce n'est pas l'énergie qui est quantifiée comme en mécanique quantique, mais l'énergie divisée par la masse. Du point de vue de l'énergie cinétique, $E_c = (1/2) m v^2$, cela signifie donc qu'en dernier recours, on obtient une quantification des pics de probabilité pour les valeurs possibles des *vitesse*s. Ce résultat est bien apparent, dans le fait que les constantes de structures peuvent se ramener, à une constante w ayant la dimension d'une vitesse. Ainsi, les valeurs les plus probables des vitesses képlériennes dans les systèmes planétaires (correspondant à des demi-grands axes en n^2) s'expriment comme $v_n = w/n$, où n est le nombre quantique principal.

Or, alors que du point de vue spatial et du point de vue des énergies, on rencontre des différences d'échelles considérables entre les systèmes planétaires et les systèmes de galaxies, les vitesses rencontrées sont tout à fait semblables. On peut donc tout à fait s'attendre à retrouver pour les paires de galaxies des pics dans la densité de distribution des vitesses ayant des valeurs semblables à ceux obtenus pour les planètes. Pour une orbite képlérienne autour d'un corps central de masse M , la distance est liée à la vitesse par la relation $a = GM/v^2$. On voit donc bien que, si la vitesse d'une planète autour de son étoile (une masse solaire) est la même que celle d'une galaxie autour d'une autre galaxie de 10^{11} à 10^{12} masses solaires, le même facteur astronomique va se retrouver sur les distances.

Ainsi, un des résultats fondamentaux de la relativité d'échelle est la prédiction de l'existence de structures universelles dans l'espace des vitesses (et non celui des impulsions, produit de la vitesse par la masse, qui intervient ordinairement dans la construction d'un espace des phases qui combine positions et moments en mécanique), dont les structures observées dans l'espace ordinaire seraient dérivées (à travers les diverses relations dynamiques qui les relient, en fonction du potentiel — l'exemple précédent étant le cas typique du potentiel képlérien en $1/r$).

L'existence de structures dans l'espace des positions est difficile à nier : il s'agit tout simplement de la répartition hautement non homogène et hiérarchisée de la matière en galaxies, groupes et amas de galaxies, superamas et grandes structures.

En ce qui concerne l'espace des vitesses, des structures ont bel et bien été observées en astrophysique extragalactique depuis les années 70 sous la forme de pics de densité de probabilité pour des valeurs particulières des décalages spectraux, correspondant précisément à des vitesses de 144 km/s et ses multiples ou sous-multiples (fig. 1.26 et 1.27). Malheureusement, ces effets ont été interprétés de manière erronée par leur découvreur (Tifft, 1976, 1977), comme mettant en cause l'interprétation des décalages spectraux en terme de vitesses radiales, ce qui a conduit la communauté des astrophysiciens à les rejeter. Or, la découverte motivée par la théorie de la relativité d'échelle, que ces valeurs se retrouvent dans notre propre système solaire (et maintenant dans les systèmes extrasolaires), ne permet plus de mettre en doute qu'il s'agisse de vraies vitesses : ainsi les vitesses de Mercure, Venus, la Terre et Mars sont bel et bien proches de 48, 36, 29 et 24 km/s, c'est-à-dire $144/n$ km/s pour $n = 3$ à 6. Il ne s'agit en rien de valeurs particulières, hyperprécises et quasi-magiques des décalages spectraux (dont l'origine serait alors inconnue), mais simplement de pics de densité dans la distribution des vitesses, distribution qui n'a a priori aucune raison d'être uniforme.

Il n'y a, dans ce cadre, aucune différence entre les décalages spectraux vers le rouge extragalactiques et ceux observés localement, dont l'origine est dans les deux cas l'effet Doppler (et sa généralisation cosmologique). Ceci peut être confirmé pour les paires de galaxies en identifiant des pics de probabilité en vitesse et en position, dont la corrélation traduit, comme pour les planètes, la troisième loi de Kepler.

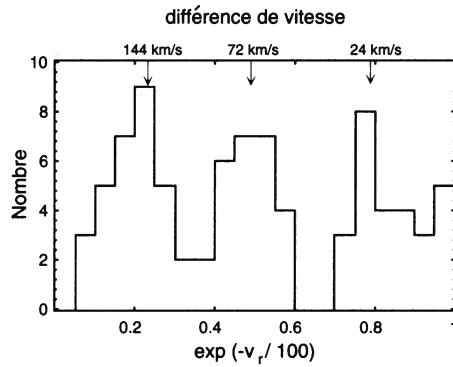


Figure 1.26. Déprojection de la distribution des différences de vitesse entre membres de paires de galaxies du catalogue de Schneider et Salpeter (d'après Tricottet, in da Rocha et Nottale 2003a).

Les pics principaux sont observés à 144 km/s et 72 km/s, comme les deux premiers pics des exoplanètes.

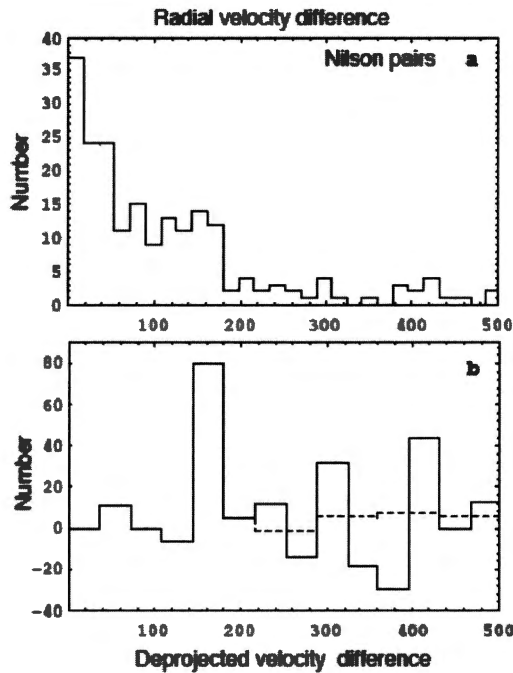


Figure 1.27. Distribution des différences de vitesse entre membres de paires de galaxies (a) et leur déprojection (b) pour 256 paires du catalogue de Nilson ayant des vitesses mesurées de manière précise (d'après da Rocha et Nottale 2003a).

Un pic statistiquement significatif est observé à 144 km/s.

Notons pour finir que, parmi les paires de galaxies, notre propre Groupe Local a pu être étudié en détail par da Rocha (2004), y compris en ce qui concerne les satellites des deux galaxies géantes qui le dominent (la nôtre et Andromède). Du point de vue de la description quasi-quantique macroscopique, ce système ressemble, à certains égards, au cas d'une molécule du type H_2 . Les distributions observées de vitesse et de position des galaxies qui le composent sont en bon accord avec les structures prédites par l'approche relativiste d'échelle.

Aux échelles encore supérieures, plusieurs autres effets ont été découverts qui vont également dans le sens de l'existence de pics de probabilité pour des valeurs des vitesses multiples ou sous-multiples de 144 km/s (fig. 1.28 et 1.29).

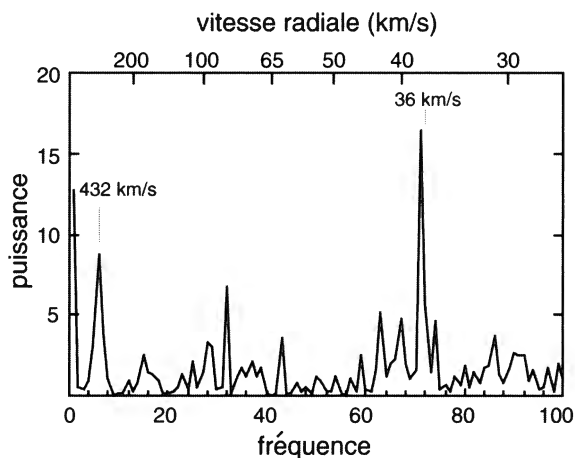


Figure 1.28. Spectre de puissance des vitesses radiales des galaxies de l'échantillon de Guthrie et Napier (1991, 1996) dans le superamas local (l'intervalle total des vitesses est de 2 665 km/s).

Des pics statistiquement significatifs sont obtenus pour $36 = 144/4$ km/s et $432 = 3 \times 144$ km/s.

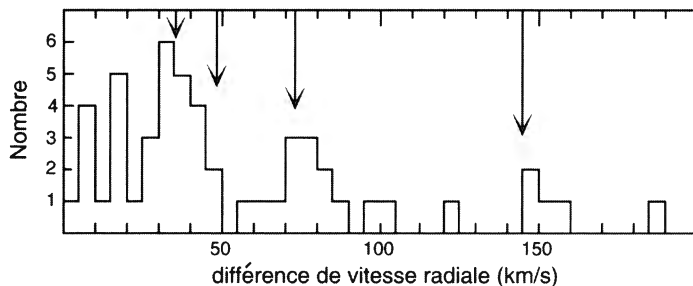


Figure 1.29. Distribution des différences de vitesse entre galaxies dans des groupes du superamas local, qui montre des pics de probabilité pour des vitesses proches de 36, 72 et 144 km/s (d'après da Rocha et Nottale, 2003a).

Application en cosmologie : constante cosmologique

En 1917, Einstein avait introduit dans ses équations une constante, dite cosmologique, afin d'expliquer l'origine de l'inertie. Cette constante joue un rôle géométrique : elle définit une courbure fondamentale de l'espace-temps et est ainsi égale à l'inverse du carré d'une longueur cosmique invariante.

Elle a aussi la propriété de s'opposer à grande échelle, à la force attractive de la gravité et si elle est bien ajustée d'autoriser des modèles d'Univers statiques.

Lorsque l'on découvrit que l'Univers n'est en fait pas statique, à la fin des années 20, certains physiciens voulurent se débarrasser de la constante cosmologique en lui attribuant une valeur nulle. Toutefois, Georges Lemaître fit remarquer dès 1934, suivi plus tard par l'astrophysicien russe Yacov Zeldovich (1967), que l'effet de la constante cosmologique était semblable à celui de la densité du vide quantique. En fait, un tel vide, parce qu'il doit aussi être compatible avec la relativité du mouvement, est caractérisé par une pression négative qui est exactement l'inverse de sa densité d'énergie et la compense dans les équations d'Einstein. Seul y reste le terme de pression négative, qui se traduit par une force répulsive et par une accélération de l'expansion de l'Univers, aujourd'hui observée de manière certaine et précise.

Malheureusement, lorsqu'on tente de calculer l'effet de cette énergie du vide quantique, on obtient un résultat... infini. Même si on la calcule à l'échelle de longueur de Planck au lieu de prendre la limite de longueur nulle, elle reste environ 10^{120} fois plus grande que la valeur observée. Une constante cosmologique d'une telle magnitude n'aurait pas manqué d'avoir des conséquences catastrophiques sur l'Univers. Ceci explique peut-être le fait que l'accélération de l'expansion, depuis son établissement indubitable en 1998, est en général attribuée à une mystérieuse « énergie noire », dont la constante cosmologique n'est qu'une des explications possibles (bien que tous les tests montrent que cette énergie noire agit exactement comme le ferait une constante cosmologique).

La solution proposée à ce problème, dans le cadre de la relativité d'échelle, part du constat que la densité d'énergie du vide quantique dépend en fait de l'échelle à laquelle on la considère, et qu'il n'y a aucune raison *a priori* d'attribuer à l'échelle cosmique la valeur qu'elle a à l'échelle zéro ou à celle de Planck. Mais comme cette densité d'énergie quantique varie en fonction de l'échelle r comme $1/r^4$, on trouve alors qu'elle devrait être maintenant... 10^{120} fois plus petite que la valeur observée.

Cependant, l'énergie elle-même intervient en général uniquement par ses différences : c'est le cas de l'énergie potentielle, dont seul le gradient est observable sous forme de champ. Ainsi on s'attend en fait à ce qu'une telle densité d'énergie constante qui remplirait tout l'Univers ne soit pas observable (en tant qu'énergie du vide, donc état d'énergie minimale, elle servirait de point zéro) et puisse toujours être renormalisée¹.

Par contre si l'on considère les fluctuations d'énergie du vide, la situation est différente. Dans ce cas ce sont bien des différences d'énergie qui interviennent et non pas l'énergie elle-même. De plus alors que la moyenne de l'énergie $\langle E \rangle$ peut toujours être renormalisée comme on l'a vu, l'énergie gravitationnelle de ces fluctuations est proportionnelle à $\langle E^2 \rangle$, quantité qui, elle, ne peut être annulée, du fait de la relation de Heisenberg de mécanique quantique. La densité de self-énergie gravitationnelle des fluctuations est donc donnée par $(1/r^3)(G/c^2)\langle E^2 \rangle/r$, et comme $\langle E^2 \rangle$ est proportionnel à $1/r^2$ d'après la relation d'Heisenberg, elle varie finalement comme $1/r^6$.

On considère alors que la constante cosmologique effective provient de deux sources : d'une part, l'énergie gravitationnelle des fluctuations du vide quantique dont la contribution décroît très rapidement lorsque l'échelle croît, et d'autre part, un terme constant de nature géométrique dont le sens profond est d'être l'inverse du carré d'une longueur cosmique invariante $\mathbb{L}$, de la nature d'un horizon.

Il est remarquable que le résultat obtenu en faisant cette somme est précisément solution d'une équation différentielle d'échelle du premier ordre du type $d\rho/d \ln r = a + b\rho$ (voir chap. 4). Cette solution s'écrit pour la variation de la densité d'énergie en fonction de l'échelle :

$$\rho = \rho_C [1 + (r_0/r)^6]$$

On constate que pour $r \gg r_0$, on obtient la solution cosmologique ρ_C , mais aussi que la contribution du vide quantique dépendante d'échelle atteint cette valeur précisément quand l'échelle r atteint l'échelle de transition r_0 entre les deux régimes. Cette transition doit avoir eu lieu dans la phase de rayonnement de l'Univers primordial (« Big Bang »), car les données d'observations indiquent que la valeur actuelle de la constante cosmologique est établie depuis les premiers instants. L'échelle de transition r_0 doit donc être dans la gamme de la physique des particules. De plus, la densité d'énergie doit atteindre celle de Planck ρ_P à l'échelle de Planck r_P si bien qu'on obtient la relation :

$$\rho_P = \rho_C (r_0/r_P)^6$$

1. C'est-à-dire qu'on soustrait cette contribution à l'énergie, qui, de ce fait, n'aurait pas d'effet gravitationnel.

Mais la densité d'énergie cosmique se ramène, comme on l'a vu, à l'inverse du carré d'une longueur cosmique $\mathbb{L}$, si bien que $\rho_{\mathbb{P}}/\rho_C = (\mathbb{L}/r_{\mathbb{P}})^2$, et l'on obtient finalement la relation fondamentale (Nottale, 1993) :

$$\mathbb{L}/r_{\mathbb{P}} = (r_0/r_{\mathbb{P}})^3$$

On reconnaît ici une des « relations des grands nombres » d'Edington-Dirac, qui relie une échelle cosmique à l'échelle de Planck et à une échelle intermédiaire de physique des particules. Mais alors que la relation de Dirac était empirique, celle-ci est ici démontrée (en particulier la puissance 3), et surtout, alors que dans cette relation empirique c'était l'échelle dépendant du temps c/H qui avait été prise pour caractériser les très grandes échelles cosmologiques (susitant ainsi des théories à variation des constantes, aujourd'hui invalidées, pour conserver malgré tout cette relation), c'est ici l'échelle invariante $\mathbb{L}$ donnée par la constante cosmologique qui joue ce rôle. Dans cette nouvelle forme de relation des grands nombres, toutes les échelles sont invariantes au cours du temps, et aucune variation des constantes n'est plus nécessaire.

Reste à connaître la valeur de l'échelle de transition r_0 pour en déduire la valeur de $\mathbb{L} = r_0^3/r_{\mathbb{P}}^2$ et donc de la constante cosmologique $\Lambda = 1/\mathbb{L}^2$. On s'attend déjà à ce que ce soit une échelle typique de particule élémentaire, mais seules des conjonctures peuvent être faites pour le moment sur sa valeur précise. Celle qui a été proposée initialement (Nottale, 1993, chap. 7.1) et qui reste la plus probable est que cette échelle de transition soit donnée par le « rayon classique » de l'électron r_e . En dépit de son nom, le sens physique de cette échelle n'a rien de classique, puisque l'aire $\sigma_e = \pi r_e^2$ est, en mécanique quantique, la section efficace de collision entre électrons ou entre électrons et positrons à la limite d'énergie cinétique nulle. Autrement dit, r_e n'est rien d'autre que le rayon d'un électron au repos tel qu'il est « vu » par un autre électron.

Or une des premières descriptions du vide quantique est celle, proposée par Dirac, d'une « mer » d'électrons d'énergies négatives qui rempliraient tous les états possibles : de cette manière, tout saut d'énergie d'un de ces électrons vers des valeurs positives fait apparaître un « trou » dans la mer de Dirac qui sera interprété comme un positron. Si l'on soumet maintenant un tel « vide » quantique à l'expansion de l'Univers au cours de ses premiers instants, il est concevable que ces électrons du vide soient également appelés à remplir le vide du point de vue spatial, ce qui exclurait que leur interdistance dépasse $2r_e$ (contrairement aux autres « objets » dont les électrons d'énergie positive qui

continuent à s'écarter les uns des autres). La densité d'énergie du vide se figerait alors à l'échelle du rayon classique de l'électron (qui correspond à une énergie 70,02 MeV), donnant naissance à la valeur actuelle de la constante cosmologique (de même que plus tard dans l'Univers primordial, l'association des protons et des électrons en atomes a cessé l'expansion de leurs distances réciproques).

Une autre possibilité serait que la transition corresponde à la distance la plus grande possible entre deux quarks (du fait de leur confinement dans les particules qui les abritent). Le raisonnement est semblable au précédent. Tant que les distances caractéristiques entre quarks sont inférieures à cette distance maximale, l'expansion joue entre les quarks eux-mêmes. Mais au delà le confinement des quarks empêche qu'ils s'écartent plus, et l'échelle correspondante apparaît donc comme une échelle statique qui n'est plus soumise à l'expansion. Cette échelle est donnée par la moitié de la masse du pion et correspond également à une énergie de 70 MeV.

Le résultat est donc une estimation de la valeur probable de la constante cosmologique $\Lambda = r_{\text{P}}^4/r_{\text{e}}^6 = (1,3628 \pm 0,0004) \times 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$ (Nottale 1993, p. 305 ; Nottale, 1996a). Il lui correspond une échelle cosmique $\mathbb{L} = (2,7761 \pm 0,0004) \text{ Gpc}$, dont le rapport à l'échelle de Planck est $\mathbb{K} = (5,3000 \pm 0,0012) \times 10^{60}$. Ce grand nombre donne le rapport entre ce qu'on identifie en relativité d'échelle restreinte à des échelles maximale et minimale, invariantes sous les dilatations, et indépassables (qui jouent le rôle auparavant dévolu au zéro et à l'infini). Son carré rend compte du facteur de l'ordre de 10^{120} qui caractérise le « problème » de la constante cosmologique. Son logarithme définit une constante universelle sans dimension, $\mathbb{C}_{\text{U}} = \ln \mathbb{K} = 139,82281 \pm 0,00022$, qui joue dans les transformations d'échelle « log-lorentziennes » de la relativité d'échelle restreinte (voir chap. 4) un rôle similaire à celui joué par la vitesse de la lumière c dans la transformation de Lorentz du mouvement.

Or la constante cosmologique (ou « énergie sombre »), pour laquelle on ne disposait que d'estimations grossières jusqu'en 1998, est mesurée depuis cette date avec une précision qui s'améliore d'année en année. On définit une constante cosmologique réduite, $\Omega_{\Lambda} = \Lambda c^2/3H_0^2$, égale à $0,73 \pm 0,03$ d'après les plus récentes déterminations. Elle dépend de la constante de Hubble actuelle qui est aussi mesurée avec une précision croissante ($h = H_0/100 = 0,730 \pm 0,019 \text{ km/s.Mpc}$). La comparaison de l'estimation théorique de $\Omega_{\Lambda} h^2 = 0,38874 \pm 0,00012$ avec les mesures successives jusqu'en 2006 (fig. 1.30) montre une convergence de celles-ci vers cette valeur (Nottale, 2008a). Les résultats récents (2008) du satellite

WMAP après cinq ans d'observation, $\Omega_\Lambda h^2 (\text{obs}) = 0,384 \pm 0,043$, conservent cet accord de manière satisfaisante.

La valeur attendue restant beaucoup plus précise que la valeur expérimentale actuelle, et cette précision pouvant s'améliorer par les progrès auxquels on peut s'attendre, en particulier sur la valeur de la constante de gravitation G (qui détermine l'incertitude principale sur l'échelle de Planck), cette proposition pourra à nouveau être mise à l'épreuve dans le futur.

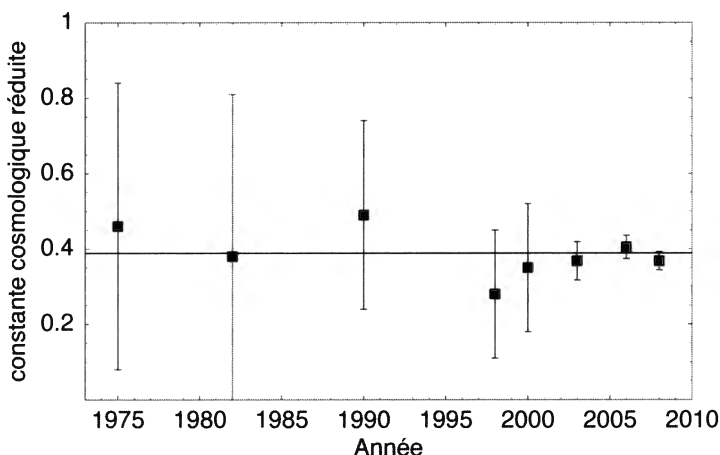


Figure 1.30. Évolution au cours du temps des valeurs estimées à partir des observations, puis des mesures de la constante cosmologique (ou « énergie sombre »), comparée à l'estimation théorique (Nottale, 1993) issue de l'approche relativiste d'échelle (ligne horizontale, $\Omega_\Lambda h^2 = 0,38874 \pm 0,00012$).

Application en physique : constante de couplage forte

À titre d'exemple d'application de la théorie en physique des particules, évoquons la prédiction, faite initialement en 1992 (Nottale, 1992, 1993) de la valeur de la constante de couplage de l'interaction forte.

Cette constante de couplage (carré de la « charge » forte en unités adimensionnelles) varie en fait en fonction de l'échelle de distance. Cette variation est bien décrite par les solutions des équations du « groupe de renormalisation ». Mais dans ces équations, comme dans toute la physique des hautes énergies standard, on considère que les échelles de distances (et de temps) et les échelles d'énergie sont directement inverses l'une de l'autre. Ceci n'est plus vrai en relativité d'échelle restreinte,

dans le cadre de laquelle l'échelle de longueur de Planck (devenue un horizon inatteignable qui joue le rôle du zéro) correspond maintenant à une énergie infinie. La prise en compte de corrections relativiste d'échelle change alors la variation des constantes de couplage des différentes interactions et les fait converger à l'énergie de Planck. À cette énergie, là où elle recoupe également le couplage gravitationnel, la constante de couplage inverse est très proche de $1/4\pi^2$, qui se trouve être une valeur critique pour le carré des charges.

Inversement, en faisant l'hypothèse que cette valeur est la bonne, on peut alors inférer la valeur attendue aux échelles d'énergies inférieures, en particulier à l'échelle du boson Z où elle est bien mesurée. La comparaison de la valeur prédite de cette manière ($0,1173 \pm 0,0004$) avec les mesures (fig. 1.31), dont la précision croît au cours du temps, donne un résultat satisfaisant (Nottale, 2008a). La valeur prédite, dont l'incertitude vient du calcul de l'évolution du couplage entre les échelles de Planck et du boson Z (et peut donc encore être améliorée), reste plus précise que la valeur expérimentale, ce qui permettra, là encore, une nouvelle mise à l'épreuve de cette proposition dans le futur.

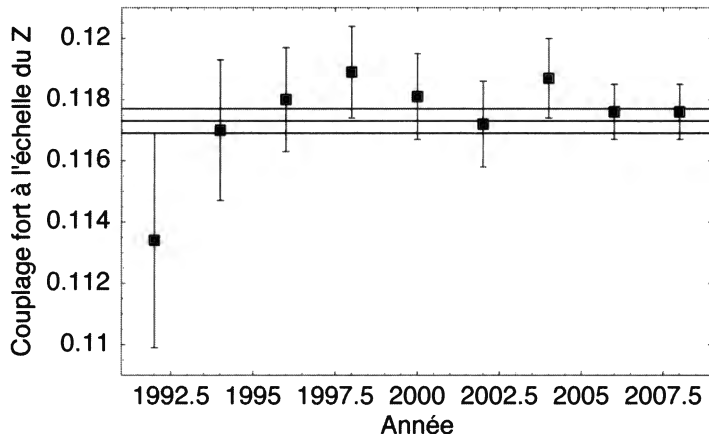


Figure 1.31. Comparaison de la valeur estimée de la constante de couplage forte à l'échelle du Z aux valeurs mesurées au cours du temps depuis 1992 (date de la prédiction théorique, $0,1165 \pm 0,0005$, corrigée depuis à $0,1173 \pm 0,0004$ par prise en compte de la masse du quark top, déterminée postérieurement). La valeur expérimentale 2008 est essentiellement la même que la valeur 2006.

Applications en géosciences

Le domaine des géosciences est un vaste domaine d'applications des lois temporelles critiques, incluant éventuellement des fluctuations log-périodiques. De telles lois, qui se caractérisent par une dépendance temporelle, non directement en fonction du temps T , mais de l'écart à une époque critique — en $|T - T_c|^\gamma$ et/ou en $\cos[\omega (T - T_c)]$ — ont été en effet proposées initialement comme modèles d'évolution de variables liées à des tremblements de terre (voir revue de Sornette 1998). Comme on l'a vu par ailleurs, on les obtient naturellement dans le cadre de la relativité d'échelle comme solutions d'équations différentielles agissant dans l'espace des échelles (du premier ordre pour les lois de puissance et du deuxième ordre pour l'inclusion des corrections log-périodiques, voir chap. 4). Dans *Les Arbres de l'évolution* (Nottale, Chaline et Grou, 2000), leur application à la modélisation de la chronologie des événements majeurs de certaines lignées de l'arbre d'évolution des espèces et à l'évolution économique des sociétés a donné des résultats prometteurs (voir chap. 2 et 3). Ceux-ci ont en effet été confirmés par la suite (voir chap. 2) sur d'autres lignées (Nottale et al., 2001) et sur l'embryogénèse et le développement humain (Cash et al., 2002). Quant à l'évolution économique (voir chap. 3), les travaux ultérieurs de Johansen et Sornette (2001) utilisant de nombreux indices économiques, de recherche et développement, démographiques, etc., sur plusieurs siècles, ont indépendamment confirmé la convergence générale (obtenue dans *Les Arbres de l'évolution* à partir des données du rythme crise/non-crise sur plusieurs millénaires) vers une époque critique comprise entre 2050 et 2080.

Nous donnons ici, pour finir cette évocation (non exhaustive) des applications aux sciences physiques, astrophysiques et géophysiques, deux nouveaux exemples d'application.

Tremblements de terre

La proposition d'appliquer les méthodes du groupe de renormalisation et les lois d'échelle critiques qui s'en suivent à la prédiction des tremblements de terre a été faite en 1982 par Allègre, Le Mouel et Provost. En 1995, Sornette et Sammis ont rajouté des corrections log-périodiques aux lois de puissance obtenues, et montré que la prédictibilité en était fortement améliorée. Ces modèles ont été appliqués à la racine carrée de l'énergie sismique accumulée ou encore à des grandeurs mesurées telles des concentrations d'ions dans des puits profonds, dans le but de prévoir un tremblement de terre individuel.

Une autre approche possible, que nous adoptons ici, consiste à considérer (comme nous l'avons fait pour l'évolution des espèces et à l'évolution économique) que ces lois s'appliquent à une probabilité d'événement. Dans ce cas, c'est le taux de tremblements de terre qui doit être comparé à la loi log-périodique. L'application de cette approche aux tremblements de terre répertoriés en Californie du Sud depuis 1800 (Nottale et Héliodore, en préparation ; voir Nottale, 2008a) a montré une décélération log-périodique très claire depuis l'époque critique $T_c = 1796$. On obtient des pics de probabilité, prévus et observés, autour de 1855, (1873), 1895, 1922, 1955, 1996, les prochains étant autour de 2047, puis 2110 (fig. 1.32).

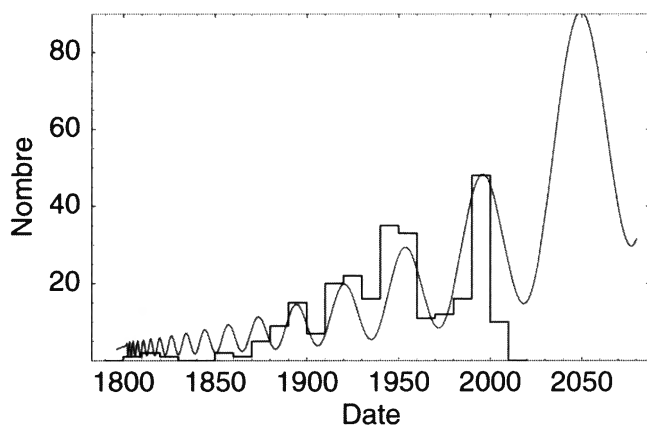


Figure 1.32. Histogramme de la distribution des dates des tremblements de terre de magnitude supérieure à 5 en Californie du Sud (données US Geological Survey EarthQuake Data Center pour les années 1932-2006 et Earth Quake Data Base pour les tremblements de terre historiques, années 1500-1932).

La distribution observée est très bien ajustée par une loi de puissance soumise à une forte oscillation log-périodique décélérant depuis l'époque critique 1796. Le prochain pic de probabilité prévu est autour de 2050.

Une application de ce type d'analyse au récent tremblement de terre du Sichuan donne également des résultats intéressants. On observe une décroissance globale en loi de puissance des magnitudes et du taux de répliques à partir de la date du tremblement de terre principal (12 mai 2008, magnitude 7,9), modulés par des pics (communs aux deux distributions) montrant une décélération log-périodique très précise (fig. 1.33).

Le tremblement de terre principal peut ainsi être rétroprédit avec une précision de 6 h et le pic de répliques du 25 mai pouvait ainsi être prédit avec une précision de 1,5 jour à partir des dates précédentes. Au-delà, du fait de la décélération, la prédictibilité se perd et le système entre dans un autre régime.

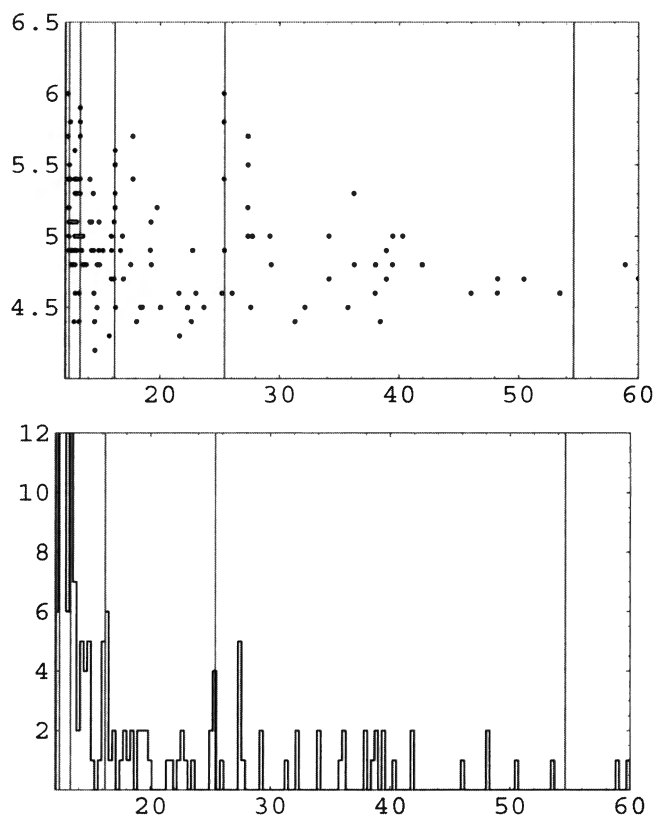


Figure 1.33. Évolution temporelle observée pendant 14 jours (du 12 au 26 mai 2008) des magnitudes (figure du haut) et du taux (figure du bas) de répliques du tremblement de terre du Sichuan.

Le tremblement de terre principal de magnitude 7,9, est à l'origine des temps et dépasse du cadre de la figure. Les pics combinés de magnitude et de taux montrent une décélération log-périodique prédictible (à partir de la 4^e date).

Fonte de la banquise arctique

Donnons pour finir un autre exemple intéressant d'application de lois temporelles critiques à la fonte des glaces de mer de l'arctique, qui a déjà démontré sa capacité de prédictibilité. Jusqu'à ces dernières années, les données concernant la diminution observée de la banquise étaient ajustées par une loi considérant que celle-ci se faisait à un taux de diminution constant (d'environ 8 % tous les dix ans). Ceci menait à une extrapolation impliquant une disparition de la glace de mer (au minimum du 15 septembre de chaque année) autour de 2080-2100.

De ce point de vue, la valeur 2007 (autour de seulement 4 millions de km² restants) plus basse de presque deux millions de km² que la valeur attendue, a été considérée comme une surprise et a conduit à réviser la date critique à des valeurs beaucoup plus proches.

Mais ce point bas de 2007 (fig. 1.34) avait en fait été prédit statistiquement dès 2006, avant son observation (Nottale, 2007), par un modèle de loi d'évolution critique en $|T - T_c|^8$. Un tel modèle a l'avantage de rendre compte de l'accélération attendue pour le processus bouclé et auto-entretenu de réchauffement et de fonte et de contenir dans sa description même la fin de ce processus (contrairement à la loi à taux constant, qui est, formellement, sans limite). Les valeurs observées en 2008, puis en 2009, sont venues confirmer, aux fluctuations près, le modèle. La capacité démontrée ici de prédictibilité de cette description permet de prévoir avec une grande confiance la date de fonte totale de la banquise arctique (Nottale, 2008a). On prévoit une possibilité de disparition totale dès septembre 2011 (date repoussée à 2014-2015 dans un modèle exponentiel, peut-être plus réaliste). De plus l'étude des moyennes sur les mois précédents et suivants indique que l'arctique peut être libre de glaces pendant 3 mois (août, septembre, octobre) dès l'année 2012 (qui devient 2016 dans le modèle exponentiel). Le court intervalle de temps restant permettra de valider ou d'invalider à court terme cette prédiction par le modèle critique. Les conséquences écologiques, politiques, économiques, etc. qu'elle implique sont de première importance.

Si la fonte de glace de mer ne change pas le niveau des océans (sauf à travers la dilatation liée à l'augmentation de température), particulièrement préoccupante est la conséquence indirecte sur la fonte des glaciers du Groënland. La sous-estimation de l'accélération de la banquise laisse craindre qu'il en soit de même pour les glaciers. Il devient urgent d'acquérir des données précises, complètes et détaillées sur ceux-ci, et de prendre en compte dans leur analyse les forts effets non-linéaires déjà avérés pour la banquise. Une analyse, prenant en compte une telle accélération, des quelques données aujourd'hui disponibles donne effectivement une époque critique beaucoup plus proche que celle annoncé en général (quelques siècles), autour de 2027 ! Sachant que l'augmentation du niveau des océans due à la fonte complète de ces glaciers est estimée à environ 7 m, c'est à une situation de très grande urgence à laquelle nous pourrions être confrontés dans les décennies à venir.

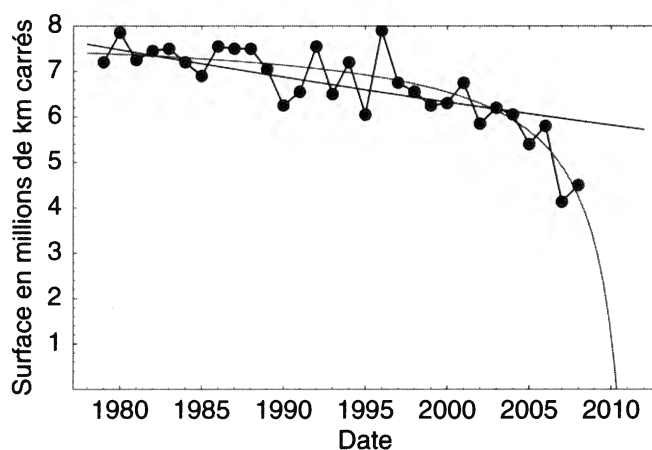


Figure 1.34. Comparaison des données (issues du US National Snow and Ice Data Center) de 1979 à 2008 concernant la surface de banquise arctique restante (au 15 septembre de chaque année) à deux modèles :
 (i) diminution à taux constant (ligne droite); (ii) diminution suivant une loi critique d'époque critique $T_c = 2012$ (qui mène à une disparition totale en 2011).

Pour Erwin Schrödinger,
En hommage à son intuition et sa perspicacité
sur l'apport de la mécanique quantique
à la compréhension du vivant dans
Qu'est-ce que la vie?

Deuxième partie

La relativité d'échelle et le vivant

2.1

Introduction

La théorie de la relativité d'échelle, telle que Laurent Nottale vient de l'exposer, est « susceptible d'apporter des solutions » à un certain nombre de problèmes biologiques considérés dans l'état actuel de nos connaissances, comme encore non résolus et sans solutions proches. Comment est-ce possible ? *Probablement en tenant compte des contraintes physiques imposées par la relativité d'échelle.*

Quels sont les problèmes où la relativité d'échelle peut apporter des éclairages ?

1. En premier, chronologiquement, vient celui de *l'origine de la vie* dans un environnement si différent de l'actuel, que ses paramètres nous sont en grande partie inconnus. Et pourtant ils conditionnent, à n'en pas douter, sans doute par les limites qu'ils imposent au système, *ce phénomène primordial qui ne s'est apparemment pas reproduit depuis cette époque*, il y a quelque 3,4 milliards d'années...

2. Le deuxième est celui de la **structuration du vivant et de sa morphogenèse**. La vie est un phénomène structural qui se déploie à des échelles diverses de complexité.

3. Le troisième grand problème est celui de la *mécanique de l'évolution du vivant*. La mécanique évolutive qui crée ces structures doit être intégrée, avec la constitution du *code génétique unique* qui, au travers des protéines, met en œuvre la *structuration* et la mécanique de fonctionnement du *génome*.

Les *mutations* des gènes ouvriers, ceux de la **microévolution**, ont des effets d'autant plus grands qu'elles touchent les *gènes homéotiques* à effets précoces, qui sont des *gènes de régulation* ou *architectes* et qu'elles modifient des *étapes précoces du développement*. Ces mutations reposent sur le phénomène fondamental et indispensable de la *réplication aux niveaux des gènes et de la cellule*.

Au gré de l'évolution, se pose le problème de la *diversification arborescente du vivant* engendrée par la mécanique des *mutations se faisant au hasard (EVO)*, influençant le *développement des*

organismes (DEVO). Ceux-ci, une fois formés, puis nés, entrent en interactions avec leur environnement. Ces interactions se traduisent par une *sélection naturelle souvent très efficace qui optimise* les acquis génétiques innovants et fonctionnels et supprime les constituants défectueux ou défaillants.

(4) Le quatrième grand problème concerne *l'évolution des espèces à grande échelle*, celui de la *macroévolution*. Les mutations, notamment celles des gènes architectes *Hox*, les gènes maîtres d'œuvre, si elles sont importantes et précoces, peuvent introduire des *discontinuités majeures* qui induisent *l'isolement reproductif*, c'est-à-dire la *formation des espèces nouvelles* et peuvent engendrer alors des *bifurcations* au sein des groupes qui contribuent à la formation des *arborescences évolutives* des *clades successifs* et des *grands plans d'organisation du vivant*.

À ces questions fondamentales pour l'évolution du vivant, que peut apporter la théorie de la relativité d'échelle? C'est ce que nous allons discuter dans ce chapitre.

Nous allons faire un survol du vivant en général, de son organisation, mais sans en retracer l'histoire détaillée décrite ailleurs¹, avec ses structures et ses mécanismes de fonctionnement, en abordant les principaux problèmes à résoudre et en essayant de localiser les *applications potentielles de la relativité d'échelle*. Il va de soi que dans ce travail de prospective, ce sont le plus souvent des *intuitions logiques, des hypothèses proposées* qu'il faudra tester.

1. Voir Nottale, Chaline et Grou, 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Hachette. Paris et Chaline. 1999. *Les Horloges du vivant. Un nouveau stade de la théorie de l'évolution*. Hachette. Paris.

2.2

La vie et ses contraintes

La Terre est un astre a priori favorable à la vie

Le système solaire, formé il y a 4,5 milliards d'années, rassemble autour du Soleil neuf grosses planètes, dont la Terre. La Terre étant une planète interne avec Mercure, Venus et Mars, elle appartient aux planètes dites *telluriques* par opposition aux planètes externes géantes, comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Le système solaire renferme en outre des dizaines de milliers d'astéroïdes entre l'orbite de Mars et de Jupiter, des milliers de comètes dans la ceinture de Kuiper au-delà de Neptune (10 milliards de comètes) et le nuage d'Oort (10 milliards de milliards de comètes) à l'extérieur de l'orbite de Pluton, désormais rattachée au système de Kuiper, et un nombre incalculable de météorites.

La *vie terrestre* est un système très particulier qui s'est développé sur la planète Terre grâce à l'existence de *cinq conditions de base indispensables et inséparables*, autrement dit *contraignantes* :

1. Apport d'une *source d'énergie proche*, celle du Soleil avec le vent solaire, et en plus, le rayonnement cosmique et les décharges électriques de la foudre.
2. *Variations de température modérées* qui, en raison de la distance de la Terre au Soleil, ni trop proche, ni trop lointaine, permettent à *l'eau de se maintenir à l'état liquide*. Cette situation s'est réalisée environ 200 millions d'années après la formation de la Terre. L'eau pouvait alors se condenser, même à des températures supérieures à 100°, grâce à la pression atmosphérique supérieure à l'actuelle et à cause du CO₂ très abondant.
3. Une *chimie du carbone*.
4. Une *croûte et une masse planétaire* suffisante pour garder une *atmosphère*, sans doute inexistante ou peu abondante au début, obtenue par le dégazage du manteau planétaire, dans la *phase prébiotique*. Sans cette atmosphère, la vie aurait été réduite à sa plus simple expression, celle de bactéries anaérobies. Il n'est pas sûr qu'elle ait pu donner naissance à des êtres pluricellulaires.

5. Il existait enfin une contrainte majeure pour l'apparition du vivant, c'est *l'absence d'oxygène* sur la Terre primitive à cause de son pouvoir oxydant destructeur. C'est donc seulement une *vie anaérobie*, avec un métabolisme n'utilisant pas l'oxygène, qui a pu apparaître sur Terre. D'ailleurs la vie n'est pas réapparue après *l'apparition et à cause de l'accumulation d'oxygène* vers -2,5 milliards d'années, car c'est un poison mortel, un véritable polluant, pour l'apparition de la vie anaérobie qu'il condamne, sans doute déjà un effet de la *sélection naturelle induite par l'environnement oxygéné*.

Les caractéristiques du vivant

Pour que la vie puisse se développer sur Terre, il fallait en dehors des caractéristiques physiques terrestres précédentes nécessaires et des contraintes qu'elles imposaient, acquérir un certain nombre de *caractéristiques propres au vivant*.

Ce sont respectivement, selon Antoine Danchin, le *métabolisme*, la *compartimentation*, la *mémoire* et la *manipulation*, ces deux derniers étant reliés par le *code génétique*. Je remplacerai le terme de *manipulation* par la *mécanique de traduction de la mémoire* et j'y ajouterai d'autres caractéristiques majeures comme la *chiralité*, les *apparitions de polarités* et de *symétries*, la *hiérarchie d'organisation*, qui, bien que moins spécifiques du vivant, ont influencé sa *morphogenèse* en réponse à des paramètres physiques précis.

Et il faut intégrer, bien qu'elles soient indépendantes, les *interactions avec l'histoire propre de la Terre* qui ont fortement perturbé l'histoire propre du vivant dès son apparition en introduisant la *contingence* à plusieurs niveaux dans le phénomène évolutif.

Le métabolisme et les sources d'énergie

Le métabolisme correspond à l'ensemble des transformations qui interviennent dans la cellule en utilisant diverses formes d'énergie disponibles pour fabriquer les molécules indispensables à la constitution et à la survie (*anabolisme* avec des réductions et polymérisations) des cellules en brisant d'autres molécules (*catabolisme* avec oxydations et hydrolyses) pour en extraire l'énergie et les éléments indispensables. Le *problème de l'énergie* est celui qui contraint l'ensemble du métabolisme. Il existe dans la nature de très nombreuses molécules aux fonctions potentielles très variées lorsqu'elles se trouvent dans un environnement favorable. Ces transformations suivent les lois de la chimie, mais avec

une différence essentielle, celle de l'existence des *catalyseurs biologiques* (enzymes) qui permettent ces réactions à des températures compatibles avec la vie. Elles font intervenir des échanges d'électrons et de protons dans de véritables turbines moléculaires.

L'origine du métabolisme est une question majeure du vivant. Ces processus chimiques sont appelés dans leurs premières phases, soit *chimie prébiotique*, soit *protométabolisme*. Ces phénomènes sont inconnus, mais Christian de Duve¹ a pu en évaluer les contours avec beaucoup de perspicacité.

En effet, les transformations chimiques impliquent le plus souvent des températures élevées incompatibles avec la survie du vivant. Dans ce système vivant, les opérations chimiques sont *catalysées*, c'est-à-dire accélérées dans leur cinétique par les *enzymes*. Ce sont des *protéines constituées de chaînes linéaires d'acides aminés*. Les protéines sont le résultat de la transcription de l'ADN en ARN, puis de la traduction de l'ARN en protéines. Mais on sait maintenant, grâce à Cech et Altman en 1983 que certains ARN, appelés *ribozymes*, possèdent cette fonction de catalyse ; des molécules idéales pour constituer du vivant. Ce type de molécules pouvant présenter une double fonction (catalyse et information) sont donc un passage quasi-obligé de la vie.

En conséquence, avant l'apparition de l'ARN autocatalyseur, tout le protométabolisme a dû suivre d'autres voies que le métabolisme actuel très complexe. Il semblerait qu'il ait pu exister une certaine variabilité de molécules de type ribozymes, autorépliquables, qui auraient été sujets à la sélection naturelle au sein de protocellules favorisées par la présence de ces catalyseurs et de leurs fonctions métaboliques. Identifier les catalyseurs du protométabolisme n'est pas évident. Par déduction, de Duve² évoque des *peptides* qu'il a nommés *multimères* pour expliquer leurs constitutions en acides aminés associés à d'autres molécules. On en connaît dans la nature avec les peptides et les polyketides qui ont des précurseurs intéressants, les *thioesters* qui ont pu jouer un rôle important dans les premières phases du vivant. Certains peptides auraient pu avoir une origine cosmique, puisqu'on en a trouvé dans des météorites, mais ils pourraient avoir aussi été synthétisés sur Terre. De toute façon, les premières enzymes protéiques ne devaient pas être constituées d'un grand nombre d'acides aminés associés à des ions métalliques, peut-être une vingtaine.

1. Prix Nobel de médecine en 1974.

2. De Duve. 2005. *Singularités. Jalons sur les chemins de la vie*. Odile Jacob. Paris.

► Les sources d'énergie

L'un des problèmes fondamentaux de la vie et de son métabolisme concerne les *sources d'énergie* absolument indispensables, car elles conditionnent la survie du vivant.

Aux stades les plus anciens de l'origine de la vie, il est probable que la constitution des grosses molécules (protéines, acides nucléiques, lipides), à partir des briques de base, s'est réalisée par des *condensations déshydratantes*, consistant en l'enlèvement d'un atome d'hydrogène (H) à un constituant, et son rattachement à un groupement hydroxyle (OH) provenant d'un autre constituant, pour former une molécule d'eau (H₂O). Ces réactions qui utilisent de l'énergie sont les réactions inverses des hydrolyses qui en libèrent, comme l'ATP. Tous ces phénomènes correspondent à un principe très général appelé par de Duve en 1987, le *transfert de groupe séquentiel* avec les transferts de phosphate ou *phosphorylations*¹ et les *pyrophosphorylations*². Ces processus sont au cœur du *métabolisme énergétique* et du maintien de l'activité cellulaire. Le phosphate libre, rare dans la nature en raison de son association au calcium insoluble, aurait pu être remplacé aux débuts de la vie par un pyrophosphate. Ces pyrophosphates sont formés par hydrolyse de l'ATP en adénosine monophosphate³.

L'acquisition du *système énergétique ATP-ADP* est un moment majeur dans l'histoire du vivant par tous les phénomènes biologiques qu'il autorise. L'*Adénosine TriPhosphate* (ATP) est un nucléotide de la famille des purines, formé d'adénine, de ribose et de trois phosphates, qui sert à transporter de l'énergie stockée dans les liaisons phosphates et la libère par hydrolyse en *Adénosine DiPhosphate* (ADP) et en phosphate inorganique. *L'ATP sert aussi de coenzyme*. Or cette hydrolyse dégage une énergie évaluée à 14 kilocalories par molécule-gramme, ce que de Duve appelle « *l'unité bioénergétique standard* » et que je propose d'appeler des « *quanta bioénergétiques* ». Chaque molécule d'ATP porte ainsi en elle un *potentiel énergétique libérable* par « *paquets* ». La régénération de l'ATP par les cellules implique ainsi en contrepartie une énergie équivalente

-
1. Addition d'un groupe phosphate à une protéine ou à du glucose (fructose) ou de l'adénosine. Ce phénomène permet la fermentation lactique dans le muscle, et alcoolique du jus de raisin, ainsi que la fermentation anaérobie dans la décomposition du glucose en acide lactique ou éthanol chez les formes possédant ce métabolisme.
 2. Pour plus de détails, on peut se rapporter au livre de De Duve de 1987 : *Une visite guidée de la cellule vivante*. De Broeck-Wesmael, Pour la science, Paris.
 3. Un nucléotide de l'ARN composé d'adénine, de ribose et d'un groupement phosphate.

obtenue par l'énergie lumineuse (chloroplastes des végétaux¹) ou chimique (mitochondries des animaux).

Les séquences de *transfert d'électrons* constituent une véritable *pompe à protons transmembranaire* (pompe d'oxydo réduction ou *redox*²) selon un *gradient*³ ou variation du flux de protons (*force proton-motrice*). C'est un flux de protons dans la partie mobile rotative, ou *rotor*, de l'ATP synthase qui apporte l'énergie nécessaire à l'ADP de la partie fixe de la machinerie rotative, ou *stator* de l'ATP synthase et au phosphate, pour reconstituer l'ATP. Ce rotor, dont une rotation reconstitue 3 ATP, fonctionne comme une véritable turbine moléculaire réversible. Chez les animaux, la production d'ATP se réalise par une oxydation phosphorylante où le transporteur d'électrons est le cytochrome c intervenant dans la chaîne respiratoire mitochondriale. L'ATP synthase se trouve dans les crêtes des mitochondries, dans les membranes des tylacoïdes⁴ et les membranes plasmiques des Archaea et des bactéries. Elle synthétise l'ATP à partir d'un gradient de protons mis en place par la chaîne respiratoire. Les protons traversent la membrane lipidique aux niveaux des rotors, véritables tunnels ou canaux à protons.

Les divers systèmes vivants des métazoaires possèdent des systèmes protéiques jouant le rôle de *transducteurs* ou de *convertisseurs* de l'énergie en diverses formes de travail adaptées au système considéré. Ils correspondent dans les muscles à un *travail mécanique* par un raccourcissement des fibres, dans les membranes à des systèmes de *transport actif* cellulaires et à des *pompes à énergie* pour réaliser les phénomènes d'osmose (Na^+/K^+ , calcium ou proton H^+ chez les végétaux). Lorsque les molécules transportées ainsi sont chargées électriquement elles sont sources de travail électrique comme, par exemple, l'influx dans les cellules nerveuses ou la production de lumière chez les vers luisants⁵.

L'ATP n'est en fait qu'un *transporteur d'électrons* entre un *donneur* et un *accepteur*, tout comme les enzymes et les autres catalyseurs, tels que les ions métalliques sur lesquels repose le métabolisme de nombreux êtres vivants. Le donneur, riche en électrons, est l'élément *réduit*, tandis que

-
1. La synthèse d'ATP par l'ATP synthase du chloroplaste, une enzyme, est une photophosphorylation réalisée grâce aux transferts d'électrons photosynthétiques (issus de la photolyse de l'eau).
 2. L'élément qui perd un électron est appelé réducteur, celui qui en gagne un est l'oxydant.
 3. Ou variation de proportions des éléments dans une fonction.
 4. Les thylacoïdes sont des sacs à double membrane, situés dans les chloroplastes, où se réalise la photosynthèse par l'absorption de *quanta de photons* utilisés pour la formation de l'ATP.
 5. Ici à la scission de l'ATP, s'ajoute une réaction d'oxydation.

l'accepteur qui capture les électrons est l'élément *oxydé*. Les réactions d'oxydo-réduction, comme le transfert d'électrons, impliquent une chute de potentiel d'au moins 600 mV, ce qui prouve que les transferts d'électrons (chacun 300 mV) se font par paires. Cette mécanique complexe est une merveilleuse machinerie du vivant.

La libération d'énergie par l'hydrolyse de l'ATP en ADP + phosphate est la réaction la plus commune utilisée par le vivant. On peut faire l'hypothèse, que ce système énergétique pourrait être à l'origine de nombreux *phénomènes de la relativité d'échelle, rendus possibles par ce gain majeur d'énergie indispensable et quantifiée* sous la forme de *quanta bioénergétiques*.

► Les divers types de métabolisme

Après la formation de l'ADN, de nombreuses enzymes se sont constituées au gré des mutations et sélections qui ont abouti aux métabolismes actuels des formes anaérobies et aérobie terrestres. Il existe deux façons de se nourrir, *l'autotrophie*, c'est-à-dire de se nourrir seul en baignant dans sa nourriture et en se laissant pénétrer par elle et *l'hétérotrophie* ou *l'allotrophie*, qui consiste à se nourrir des autres, en capturant sa nourriture, la mangeant et l'assimilant plus ou moins partiellement. Le fait de se nourrir est une fonction homéostatique, c'est-à-dire qu'elle assure la stabilité de l'organisme dans son environnement changeant. La nutrition conditionne aussi la dynamique de sa croissance.

Les *métabolismes anaérobies* (sans oxygène) se répartissent en quatre types chez les procaryotes anaérobies.

Il y a les *bactéries fermentatrices* ou *chimio-hétérotrophes anaérobies* qui, à partir des composés organiques comme les sucres ou les acides aminés, produisent des composés organiques simples plus de l'ammoniaque, ou du gaz carbonique et de l'énergie chimique.

D'autres *chimio-hétérotrophes anaérobies* sont les *bactéries sulfato-réductrices* qui, à partir de molécules organiques et de sulfates, sont capables de produire de la matière organique moins réduite, avec du soufre ou de l'aldéhyde sulfhydrique et de l'énergie chimique.

Un troisième groupe de *chimio-hétérotrophes anaérobies* rassemble les *bactéries méthanogènes*. À partir de gaz carbonique et d'hydrogène, elles produisent de la matière organique avec du méthane et de l'énergie chimique.

Enfin, un groupe *photo-autotrophe anaérobie*, utilise le gaz carbonique avec l'hydrogène, ou l'acide sulfhydrique, et la lumière solaire, pour fabriquer de la matière organique et libérer de l'énergie chimique.

Quant aux *métabolismes aérobies* (en présence d'oxygène) des *procaryotes aérobies* et des *eucaryotes*, ils sont de deux types. Le premier, celui de la *respiration aérobie* utilise l'oxygène et la matière organique, pour produire du gaz carbonique, de l'eau et de l'énergie chimique ; c'est celui des animaux. Le second, qui correspond à la *photosynthèse aérobie*, utilise le gaz carbonique, de l'eau et la lumière solaire pour produire de la matière organique et de l'oxygène ; c'est celui des végétaux.

Ces observations suggèrent l'existence d'un « bouillon » de très nombreuses molécules renfermant des sucres, des pyrophosphates et des bases azotées interagissant pour constituer des molécules plus complexes, telles que l'ATP.

Les molécules du vivant existaient sur la planète bien avant l'apparition du vivant. Les divers types de métabolisme montrent que la vie a pu naître dans des conditions anaérobies extrêmement difficiles en utilisant de façon assez optimale pour survivre, les multiples molécules existantes dans des environnements dépourvus d'oxygène. L'efficacité de ces métabolismes est telle qu'ils subsistent encore aujourd'hui, plus de 3 milliards d'années après leur apparition, mais dans des environnements actuellement confinés.

Une organisation hiérarchique

La structure du vivant comporte un grand nombre de niveaux, ou d'échelles d'organisation, hiérarchisés en partant des constituants libres les plus petits, les *atomes*, les *molécules* et les *macromolécules (bases)*, jusqu'à celles de la structure de base du vivant, des *gènes* et des *chromosomes* et la *cellule*, jusqu'aux *tissus*, *organes* par les *processus de développement*, ce que l'on appelle *l'ontogenèse*, constituant les *individus* ou *organismes*. Ces organismes sont rassemblés en *populations*, puis en *espèces*, éléments fonctionnels du vivant groupés en *biomes* (ensemble d'écosystèmes) et *biotas* (ensemble des organismes d'une région donnée ou d'une époque géologique donnée), dont l'ensemble constitue la *biosphère*, la plus haute structure biologique rassemblant tout le vivant (fig. 2.1). Il s'agit d'une hiérarchie ascendante constituée de termes de plus en plus vastes. À chaque niveau d'organisation apparaissent des caractéristiques nouvelles et des propriétés propres à l'échelle considérée, *non prédictibles* par l'analyse des niveaux inférieurs. Mais à l'échelle géologique, *la vie se déploie en clades de rangs successifs emboîtés de plus en plus spécialisés selon une hiérarchie descendante. Les hiérarchies d'organisation sont l'une des caractéristiques du vivant où intervient la relativité d'échelle.*

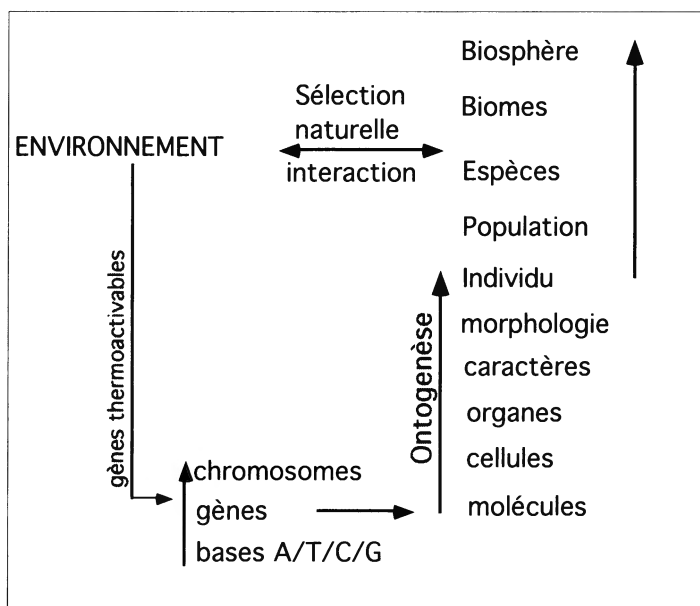


Figure 2.1. Hiérarchie d'organisation du vivant.

L'organisation hiérarchique du vivant, depuis les plus petites échelles (les quatre bases A, T, C, G), à la plus grande, celle de la biosphère. Ce schéma montre les interactions de chaque niveau d'organisation avec l'environnement au travers de la sélection naturelle, ou des gènes « thermoactivables », pour le niveau le plus simple des gènes. À chaque niveau d'organisation apparaissent de nouvelles propriétés non prévisibles à, partir du niveau sous-jacent (d'après Chaline, 1999).

C.R. Woese, en 1987, a distingué trois groupes dans le vivant : les *Eubacteria* ou *Eubactéries*, les *Archaeobacteria* et les *Eucaryotes* ; les *Archaeobacteria* étant les plus proches des *Eucaryotes*. Les *Eubacteria* sont divisés en trois groupes, les *procaryotes* à *Gram négatif*¹ avec une paroi, les *procaryotes* à *Gram positif* possédant aussi une paroi et les *procaryotes* sans paroi. Woese, Kandler et Wheelis en 1990 ont proposé de distinguer trois domaines dans le vivant, remplaçant le système des deux empires (animal/végétal). Ils distinguent les *Bacteria*, les *Archaea* divisés en *Euryarcheota* (Archaeobactéries méthanogènes) et *Crenarchaeota* (Archaeobactéries thermophiles) et les *Eucarya*, ces derniers renfermant les embranchements des animaux (*Animalia*), des plantes (*Plantae*) et des champignons (*Fungi*).

C'est au niveau structurel unicellulaire que s'arrêtent les premiers organismes, les *procaryotes*, qui apparaissent, il y a environ -3,4 milliards d'années et subsistent jusqu'à l'époque actuelle. Cette étape cellulaire

1. Le cytoplasme des bactéries coloré en violet par le violet de gentiane, reste violet chez les Bactéries à *Gram positif* qui ont une paroi qui ne laisse pas passer l'alcool alors que les Bactéries à *Gram négatif* ont une paroi riche en lipides qui laisse passer l'alcool qui décolore le cytoplasme violet en rose.

aboutit vers -1,5/-1,4 milliard d'années, aux *eucaryotes les plus simples*, une *complexification intracellulaire* réalisée par la formation d'une membrane autour d'un noyau, à partir du réticulum endoplasmique. Une membrane se forme aussi autour des *organites*, les *mitochondries* et les *chloroplastes* qui apportent notamment une *augmentation d'énergie* accompagnée de *l'apparition de la reproduction sexuée*.

Les cellules s'organisent ensuite en *niveaux d'organisation hiérarchisés toujours plus complexes*, en *tissus*¹, puis en *organes*, qui aboutissent au terme du développement aux *individus pluricellulaires*, ou *Métazoaires*. Ils seraient apparus un peu avant -1 milliard d'années, précédant la première grande division du monde vivant en *Invertébrés* et *Vertébrés*. Une telle structuration, implique une division du travail fonctionnel qui, tout en restant cohérente, est vraisemblablement liée à l'apparition nécessaire des gènes homéotiques de régulation ou *Hox*² qui *déterminent* concrètement la structuration spatiale des cellules et des organismes avec une polarité antéro-postérieure, une polarité dorso-ventrale et une asymétrie ou une symétrie bilatérale. Les gènes architectes *Hox* contrôlent les chronologies des étapes de leurs développements respectifs, selon une colinéarité entre la répartition des gènes dans les chromosomes et celle de leur activation.

La compartimentation

Elle correspond à l'isolement d'une partie du milieu par une *membrane* qui englobe des molécules variées. Il ne peut y avoir de vie sans la différenciation d'un milieu intérieur séparé d'un milieu extérieur, c'est-à-dire que l'unité de base de la vie est la *cellule* formée de molécules et de macromolécules. La présence de *paroi* est indispensable pour assurer l'indépendance de l'organisme vis-à-vis de son environnement ; c'est l'*étape procaryote*. Au sein de la cellule, ultérieurement, le cloisonnement conduit au noyau et à des organites intracellulaires (magnétosomes, mitochondries, chloroplastes, etc.); c'est l'*étape de structuration eucaryote*. Enfin la formation d'*organismes pluricellulaires* constitue la dernière étape globale de compartimentation avec de multiples variations. Nous analyserons les diverses structures membranaires lors de l'étude de ces étapes cruciales. *Ces formes cloisonnées et emboîtées forment des structures fractales. La théorie de la relativité d'échelle permet de rendre compte d'un tel emboîtement de structures et offre des outils de compréhension de leur intégration*

1. Peau, os, muscle et sang pour les animaux.

2. C'est-à-dire les gènes à homéoboîtes (*HomeobOX* en anglais = *HOX*).

tion. Elle pourrait ainsi contribuer à leur explication (voir paragraphe sur la mécanique quantique dans l'espace des échelles p. 20).

La mémoire et son évolution par les mutations

Elle est portée par les acides nucléiques, notamment les acides désoxyribonucléiques (ADN) et ribonucléiques (ARN) dont les structures en motifs de nucléotides fournissent une séquence de bases constituant le génome, un programme d'élaboration du plan des protéines. Les êtres vivants peuvent se transmettre leurs caractères structurels par hérédité, par la *duplication des séquences* à leurs descendants. La *capacité de la reproduction* est en effet l'une des caractéristiques essentielles de la vie. L'hérédité avec sa mémoire stockée doit se situer au sein du vivant et peut engendrer sans cesse des variants grâce à un support moléculaire souple qui peut se modifier. Celle-ci est réalisée par une *mécanique saltatoire*, souple et économique du changement évolutif, celle des *mutations* se faisant au *hasard*, parfois *canalisée en tendance* par la persistance sur de longues périodes de la *sélection naturelle*.

La structure de l'ADN

La molécule d'ADN est constituée de deux chaînes hélicoïdales en double hélice enroulées autour d'un axe imaginaire, à la façon d'un escalier en colimaçon. Les montants sont constitués de séquences de sucre — phosphate — sucre désoxyribose, et les marches par des couples de bases, *une purine avec l'adénine (A) toujours reliée à une pyrimidine, la thymine (T) et une pyrimidine avec la cytosine (C) associée à une autre purine, la guanine (G)*, selon une polarité précise. Une base liée au sucre et au groupement phosphate forme un *nucléotide*. Les nucléotides sont groupés par *triplets* pour former des *codons*. Et chaque codon est associé à un *acide aminé* particulier. Les deux brins sont reliés par des liaisons hydrogène, c'est-à-dire par la mise en commun d'un proton entre deux molécules *accepteur-donneur*. *Deux liaisons hydrogènes relient la paire de bases A-T¹ et trois liaisons hydrogènes lient G à C²*. Les nucléotides qui sont assemblés à l'aide des sucres sont orientés. Une molécule de phosphate assure la liaison du *carbone 3* du premier sucre, avec le *carbone 5* du sucre suivant, dont le *carbone 3* est lui-même relié, via une autre molécule de

-
1. Le plus haut niveau d'énergie occupé par les électrons qui peuvent interagir dans A-T est de -1,2410 eV, le plus bas niveau d'énergie vacant étant de -1,2239 eV.
 2. Le plus haut niveau d'énergie occupé par les électrons qui peuvent interagir dans G-C est de -1,3210 eV et le plus bas niveau de -1,1785 eV.

phosphate, au carbone 5 du sucre suivant. Il en résulte une chaîne orientée de nucléotides partant de l'extrémité 5 à 3 du brin et son inverse dans le brin opposé. L'ouverture de l'ADN se réalise sous l'action des complexes enzymatiques responsables de la réplication chez les procaryotes, ce que l'on appelle des *hélicases*. Ce complexe d'enzymes (le replisome) fonctionne à très grande vitesse, puisque 500 à 1 000 nucléotides peuvent être lus par seconde. Lors de la réplication de l'ADN ou de la transcription, c'est le brin 5' > 3' qui est favorisé, car c'est sur lui que progresse l'enzyme, l'*hélicase* MCM8, le long du brin. Pour le brin 3' > 5' la séparation se fait dans le sens inverse de la progression de l'enzyme.

Chez les eucaryotes, sur les chromosomes les plus longs, il peut y avoir plusieurs centaines d'*hélicases* qui interviennent simultanément en des points différents d'insertion. C'est une autre enzyme, l'ADN polymérase I (ou *alpha*), qui participe à la fabrication du nouveau brin d'ADN.

Les molécules d'ADN sont des macromolécules, non seulement spirales, mais la plupart du temps en plus super enroulées sur elles-mêmes.

Chez les procaryotes, les unicellulaires sans noyau, l'ADN se présente sous la forme d'un chromosome circulaire unique, super enroulé et forme parfois même des super hélices (*un nucléoïde*). Chez les eucaryotes, le noyau est entouré d'une enveloppe et l'ADN lié avec des protéines compactées, des histones, forme la *chromatine* qui se trouve concentrée dans plusieurs chromosomes linéaires.

La mécanique de traduction de la mémoire : l'ADN, le code génétique et la transcription

La *manipulation*, selon Danchin, est le processus par lequel la séquence mémoire transmise est traduite par un *codage* en protéines ; c'est le *code génétique*. Les termes de *traduction* ou d'*expression de la mémoire* exprimeraient mieux, selon moi, cette fonction majeure du génome, que celui de *manipulation* suggérant implicitement un pouvoir décisionnel (lamarckien) que l'ADN n'a pas. Le *code génétique* correspond à un *programme d'instructions séquencées*, à un langage génétique, avec des règles de lecture de décodage, la programmation d'ordres sélectifs envoyés aux diverses cellules et des régulations complexes pour réaliser la *transcription* du gène sous forme d'ARN, puis la traduction des séquences en macromolécules essentielles, les *protéines*. Insistons tout de suite sur le fait que le code génétique ne concerne que les protéines, en particulier il est indépendant des lipides absolument nécessaires pour former les membranes.

Les acides nucléiques des programmes génétiques sont formés par des séquences de quatre types de *nucléotides* constitués avec les bases *adénine*, *thymine*, *guanine* et *cytosine*.

L'adénine, A¹, est une base azotée, une *purine*, qui se lie à des *pyrimidines* : la thymine dans l'ADN par deux liaisons hydrogène et à l'uracile dans l'ARN. Les expériences de chimie prébiotique ont montré qu'elle pouvait se fabriquer spontanément à partir de cinq molécules d'acide cyanhydrique (HCN).

Rappelons que l'adénosine triphosphate (ATP) est le nucléotide qui, grâce à ses trois groupements phosphates, est l'une des molécules de haute énergie utilisée par le vivant, généré dans le catabolisme du glucose et hydrolysé pour libérer son énergie.

La guanine, G, ou *désoxyguanosine monophosphate* dans l'ADN et *guanosine monophosphate* dans l'ARN est une purine. Elle s'apparie à la cytosine dans l'ADN et l'ARN.

La thymine, T², est une base *pyrimidine*, base azotée qui permet la formation de dimères adjacents. Ces dimères ayant une double liaison covalente empêchent l'ADN polymérase de réaliser la réplication, ce qui entraîne soit la mort cellulaire, soit sa cancérisation et des mutations de type « *faux sens* ». Elle s'apparie à l'adénine dans l'ADN. Dans l'ARN, la thymine est en effet remplacée par U, l'*uracile monophosphate* (la 2,4-dioxyuridine) qui se lie à elle par deux liaisons hydrogène. Cette base qui résulte de la désamination spontanée de la cytosine en uracile, grâce à la réparation cellulaire des mutations, proviendrait du fait que les séquences de l'ARN ne sont pas contrôlées par des systèmes de réparation. U serait donc la base ancestrale, remplacée par T dérivée dans l'ADN. Une raison de plus de penser que l'ARN a bien précédé l'ADN. Les expériences de chimie prébiotique ont montré qu'elle pouvait, comme l'adénine, se former à partir de 5 molécules d'acide cyanhydrique (HCN).

La cytosine, C³, est une 2-céto-4aminopyrimidine qui peut former des dimères adjacents avec les mêmes effets, comme la thymine.

Les bases puriques s'associent donc à des bases pyrimidiques, A-T dans l'ADN ou A-U dans l'ARN et C-G dans les deux cas.

Les acides aminés qui mesurent 100 picomètres (10⁻¹²m), possèdent tous un *groupement carboxyle* (-COOH) et un *groupement amine* (-NH₂) qui forment des *ponts peptidiques* de liaison entre le groupement carboxyle d'un acide aminé et le groupement amine de l'acide aminé voisin avec

-
1. Ou *désoxyadénosine monophosphate* dans l'ADN et l'*adénosine monophosphate* dans l'ARN.
 2. Ou *désoxythymidine monophosphate* (5-méthyluracile) de l'ADN et *thymidine monophosphate* de l'ARN.
 3. Ou *désoxycytidine monophosphate* dans l'ADN et *cytidine monophosphate* dans l'ARN.

la constitution d'une molécule d'eau externe en plus. Les acides aminés se différencient entre eux par les radicaux fixés au carbone central de la molécule. Les acides aminés se répartissent d'un pôle hydrophobe (phénylalanine) à un pôle hydrophile (acide glutamique). Comme certains sont *hydrophobes* et fuient donc l'eau, ils auront tendance à s'orienter vers le centre de la protéine. Les autres, qui s'allient préférentiellement à l'eau (*hydrophiles*) peuvent avoir une charge électrique qui provoque l'attraction ou la répulsion, d'autres acides aminés également chargés. Les acides aminés, comme la *cystéine* et la *méthionine*, renferment un atome de soufre qui peut, dans le cas de la *cystéine*, constituer des *ponts disulfures* avec d'autres acides aminés contenant également du soufre.

Ce sont tous ces facteurs de liaisons qui conditionnent la structure tridimensionnelle des protéines et leurs actions. Ce sont les agents actifs de l'organisme puisqu'elles forment nombre d'organes, catalysent les réactions chimiques par les *enzymes*, protègent le corps des attaques des molécules étrangères par les *anticorps* et transportent l'oxygène par certaines cellules comme les cellules sanguines avec l'hémoglobine. Parmi les protéines importantes se trouvent les *enzymes*, ces biocatalyseurs spécifiques du métabolisme, capables d'accélérer un million de fois une réaction qui ne pourrait se faire aux températures du vivant. Le nombre des enzymes intervenant dans la vie d'une cellule est impressionnant puisque chez une simple bactérie il y en a plus de deux mille nécessaires au bon fonctionnement du métabolisme.

► Le code génétique

Le code génétique (fig. 2.2.) a été déchiffré dans les années soixante. Pour passer du message ADN, constitué d'une succession de nucléotides aux protéines qui sont des chaînes de plusieurs centaines d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques, il faut donc bien qu'il y ait un code. C'est le *code génétique*. Le *code génétique* souvent appelé *code ARN*, est constitué de combinaisons codantes : les *codons* qui, formés de *triplets de nucléotides*, c'est-à-dire de bases liées au sucre et au groupement phosphate, codent un *acide aminé*. Un *acide aminé* est donc spécifié par un *codon* soit un *triplet de nucléotides*.

premier nucléotide	deuxième nucléotide				troisième nucléotide
	U	C	A	G	
U	UUU	UCU	UAU	UGU	U
	UUC	UCC	UAC	UGC	C
	UUA	UCA	UAA	UGA	A
	UUG	UCG	UAG	UGG	G
C	CUU	CCU	CAU	CGU	U
	CUC	CCC	CAC	CGC	C
	CUA	CCA	CAA	CGA	A
	CUG	CCG	CAG	CGG	G
A	AUU	ACU	AAU	AGU	U
	AUC	ACC	AAC	AGC	C
	AUA	ACA	AAA	AGA	A
	AUG	ACG	AAG	AGG	G
G	GUU	GCU	GAU	GGU	U
	GUC	GCC	GAC	GGC	C
	GUA	GCA	GAA	GGA	A
	GUG	GCG	GAG	GGG	G

Fig 2.2. Le code génétique.

Ce code génétique est composé de triplets, ou codons de trois nucléotides. Les soixante-quatre combinaisons possibles représentent, soit un acide aminé pour soixante et un des triplets, avec de nombreux synonymes, soit des messages de début (un codon initial ATG enclenchant le début de la lecture et la transcription,) et soit d'arrêt de traduction. Trois codons STOP (TAA, TAG et TGA) peuvent arrêter la transcription.

La lecture des codons se réalise de la gauche vers la droite dans les ribosomes. Il existe 64 combinaisons possibles de ces 4 lettres en triplets¹. Elles représentent, soit l'un des 20 types d'acides aminés de base codés par 1 des 61 codons, avec de nombreux synonymes, soit des messages de début (ATG, qui code également l'acide aminé méthionine), soit des signaux d'arrêt de traduction (trois codons STOP, ou *non-sens*, peuvent arrêter la transcription : TAA, TAG et TGA traduits en UAA, UAG et UGA dans l'ARN messager : ARNm). La relation 61 codons pour 20 acides aminés implique l'existence de nombreuses redondances. La méthionine et le tryptophane sont codés par un seul triplet, les autres acides aminés sont codés par 2 à 6 triplets, comme par exemple l'arginine, codée par CGU, CGC, CGA, CGG, AGA ou AGG. Parmi les variantes observées, le codon UGA habituellement *codon-stop* peut parfois coder un 21^e acide aminé (la sélénocystéine qui, dérivant de la sérine, est à l'origine d'une sélénoprotéine dans les trois règnes du vivant et, chez les Archaeobactéries et les Eubactéries), un 22^e acide aminé la pyrrolysine (qui dérive de la lysine). Il existe d'autres acides aminés spéciaux, comme la 5-hydroxylysine du collagène, la 4-hydroxyproline des parois végétales, le gamma-carboxyl-glutamate de la prothrombine (coagulation) et la gamma-methyl-lysine de

1. De 3 bases.

la *myosine*, ce qui porte le nombre d'acides aminés identifiés à 26. Ces variations mineures montrent que le code génétique lui-même peut évoluer par dérivation en utilisant un sous-ensemble d'ARN de transfert (ARNt) avec leur codage. Ainsi chez certaines bactéries, la *glutamine* pourrait dériver du *glutamate* encore fixé à son ARNt.

La *séquence des codons* de l'ADN est convertie en une séquence d'ARN *messenger* par l'action d'une *enzyme* et cette nouvelle séquence est transcrite par les organites spécialisés que sont les *ribosomes*. Il faut noter ici l'importance du *cadre de lecture*. En effet, la mutation d'un seul nucléotide dans une séquence par addition ou délétion d'une base modifie le cadre de lecture et la protéine résultante de la transcription est souvent non fonctionnelle. Les acides aminés s'alignent les uns à côté des autres en respectant l'ordre des codons, constituant ainsi une *protéine* donnée. On constate qu'en dehors des codons d'initiation (AUG) et de terminaison STOP (ou non-sens), (UAA, UAG et UGA) de la transcription d'un gène donné, plusieurs codons codent le même acide aminé ; ce sont donc des *codons synonymes* qui entraînent des *redondances*. Il reste donc 60 codons pour coder les 19 acides aminés, méthionine décomptée. Ce sont les règles de correspondance entre la séquence des nucléotides dans les acides nucléiques, les codons, et celle des acides aminés dans les protéines qui constituent la notion de *code génétique*. Il y a une *colinéarité* entre les deux informations.

Du fait que tous les codons ne codent pas chacun des acides aminés différents, on dit que le code génétique est *dégénéré* ou *redondant*. Cette première expression est très malvenue ; il vaudrait mieux dire *évolué par dérivations* et *optimisé par la sélection naturelle*. En fait le code génétique a évolué et la forme que nous lui connaissons aujourd'hui est *dérivée* d'une forme originelle où la sélection naturelle a optimisé les correspondances des codons-acides aminés. *Ce code est maintenant considéré comme étant quasi-universel* depuis les bactéries jusqu'aux mammifères avec quelques rares exceptions¹. De fait, le code a dû se fixer avant la formation du dernier ancêtre commun à l'ensemble des êtres vivants (LUCA) pour qu'on le retrouve aussi largement répandu dans la biosphère.

1. Le code génétique des mitochondries de mammifères, dont nous savons que ces organites correspondent à des endosymbioses avec des bactéries, montre des différences avec le code universel. Très petit, ce génome code seulement 13 protéines. En outre chez les mycoplasmes (*Mycoplasma capricolum*), UGA, qui est un codon STOP, code le tryptophane. De même chez les ciliés *Tetrahymena* et *Paramecium*, les codons non-sens ou STOP UAA et UAG codent la glutamine. Chez les hydres, il est aussi légèrement différent. D'autres variantes de traduction de codons sont connues chez les Archaeobactéries, les Eubactéries, les algues vertes (*Acetabularia*), les mitochondries et les champignons.

Thomas H. Jukes (1906-1999) a, en 1966, proposé l'hypothèse d'un *code primitif* avec seulement 15 acides aminés au lieu de 20, où seules les deux premières positions des codons auraient contenu de l'information, la troisième jouant seulement un rôle de ponctuation. Cette théorie implique l'apparition de nouveaux acides aminés et toute une série d'événements très, voire trop hypothétiques.

Si l'on analyse la structure du code génétique, on peut faire quelques constatations intéressantes, qui ont vraisemblablement une signification structurale et évolutive. L'inventaire des codons montre, qu'à l'exception des codons fonctionnels (début/stop) et de ceux du tryptophane et de la méthionine, tous les autres codons ont des synonymes variant de 2 à 6. Les acides aminés sont codés soit par un, deux, trois, quatre ou six codons¹.

J.-Y. Boulayes qui a réalisé une analyse numérique du code génétique a fait des observations intéressantes. Il a conclu son étude en montrant que le code génétique répondait à des contraintes numériques qui reliaient la configuration des codons à la structure atomique des acides aminés codés. Il a mis en évidence de nombreux phénomènes de multiples des nombres premiers reliant la configuration des codons aux nombres de protons intégrés dans les acides aminés codés. Il a mis aussi en évidence de nombreux cas de symétrie dans la répartition de ces phénomènes qui impliquent les nombres premiers 7, 11 et 13. Il a notamment constaté une association de phénomènes de concentration de multiples du nombre premier 7 vers le codage de l'acide aminé codé *proline* au nombre de fois qu'un acide aminé est codé. Cette observation souligne l'originalité de la *proline* qui est en effet le seul acide aminé à posséder un nombre pair de protons, alors que les autres en ont un nombre impair.

Enfin, il en a tiré une règle générale selon laquelle, à l'exception d'un groupe « rebelle » dont le nombre de protons est un multiple du nombre premier 13, les codons codent pour le même codé, *si et seulement si*, leur dernière base est soit A, T, G, ou C. Ses travaux l'amènent à restructurer le code génétique en 26 super-codons codant 26 super-codés : 8 super-codons codés de 4 codons codés, 14 super-codons codés de 2 codons codés et 4 super-codons codés de 1 codon codé (fig. 2.3).

-
1. 2 acides aminés codés par un codon, la méthionine (AUG) et le tryptophane (UGG) et 4 codons de fonctionnement : ce sont les codons non-sens qui enclenchent (AUG) et arrêtent la transcription (UAG, UGA et UAA);
 - 8 acides aminés codés par deux codons : phénylalanine, tyrosine, histidine, glutamine, lysine, acide aspartique, acide glutamique et cystéine;
 - 1 acide aminé codé par trois codons : isoleucine;
 - 5 acides aminés codés par quatre codons : valine, proline, thréonine, alanine et glycine;
 - 3 acides aminés codés par six codons : leucine, arginine et sérine.

13 GRANDS CODONS DANS				13 GRANDS CODONS DANS			
4 cases avec 1 grand codon				4 cases avec 1 grand codon			
3 cases avec 2 grands codons				3 cases avec 2 grands codons			
1 case avec 3 grands codons				1 case avec 3 grands codons			
AA A G LYS	GA A G GLU	TA A G STOP	CA A G GLN				
AA T C ASN	GA T C ASP	TA T C TYR	CA T C HIS				
2 grands codons	2 grands codons	2 grands codons	2 grands codons				
AG A G ARG	GG A G GLY	TG A STOP	TG A STOP				
AG T C SER	GG T C	TG G TRP	CG A G ARG				
2 grands codons	1 grand codon	3 grands codons	1 grand codon				
AT A G ILE	GT A G VAL	TT A G LEU	CT A G ALA				
AT T C ILE	GT T C	TT T C PHE	CT T C				
3 grands codons	1 grand codon	2 grands codons	1 grand codon				
AC A G THR	GG A G ALA	TC A G SER	CC A G STOP				
1 grand codon	1 grand codon	1 grand codon	1 grand codon				

Figure 2.3. Le nouveau tableau symétrique du code génétique (d'après J.-Y. Boulayes, 2001-2004).

Lorsqu'il y a des *codons synonymes*, on constate que les deux premiers nucléotides du triplet codant un acide aminé sont les mêmes et semblent donc suffire à la codification, seul le troisième nucléotide présente une différence dont la fonction est complexe. Cette troisième base du codon est en général reconnue par une base inhabituelle de l'autre codon sur l'ARNt, la *xanthine*, présente dans le nucléoside I (*inosine*) et qui peut s'hybrider avec A, U et C. Jukes considérait cette 3^e base comme un simple élément de ponctuation. S'il en était ainsi, les 3^e bases distinctes impliqueraient une *dérivation spécialisée* à partir d'un code génétique ancestral.

Qu'est-ce que cela signifie au point de vue évolutif ? D'après le diagramme des deux séries, il semble se dégager deux pics de probabilité à 2 et à 4 codons qui pourraient correspondre à des *pics de probabilité de structuration* impliqués par le diagramme de Nottale « *énergie/complexité dans les espaces standard et des échelles* » que nous verrons plus loin (fig. 2.6) et retenu ensuite par la sélection naturelle.

Pourquoi la thymine de l'ADN est-elle remplacée par l'uracile U dans l'ARNm ? Nous avons évoqué une désamination spontanée de la cytosine en uracile, détectée par les systèmes de réparation de l'ADN, là où l'uracile n'existe pas normalement et est remplacée par T. Par contre dans l'ARN,

qui ne possède pas de système de réparation, la transformation de cytosine en uracile serait une conséquence fonctionnelle sélectionnée qui aurait été conservée. On admet alors que *l'uracile serait une base ancestrale*, alors que la thymine (la 5-méthyluracile) en serait une forme dérivée. Ce qui est cohérent avec l'idée d'un ARN ayant précédé l'ADN.

► Le codage des protéines : la transcription

Lorsqu'une cellule a besoin de protéines ou d'enzymes, elle transcrit la séquence ADN en utilisant une enzyme (l'ARN polymérase dépendante de l'ADN) et la copie sous la forme d'un un ARN dit messenger (ARNm) identique à la séquence ADN, une découverte de François Gros. Ensuite la cellule fait la traduction en protéines selon une lecture séquentielle du messenger par l'intermédiaire des ribosomes, ces organites qui sont de véritables petites usines de transformation du message génétique en acides aminés constituant les protéines. Il s'agit d'un phénomène qui est irréversible et unidirectionnel. L'unidirectionnalité du transfert d'information est un phénomène considéré par les biologistes comme le dogme¹ central de la biologie moléculaire. En fait, l'irréversibilité souffre tout de même d'une exception qui a été démontrée en 1970 ; c'est le rôle de la transcriptase inverse qui permet de transformer l'ARN en ADN chez les rétrovirus et peut-être chez d'autres organismes plus complexes.

L'ARNm n'est pas enroulé en hélice et est moins stable que l'ADN. Il se dégrade plus rapidement en raison du remplacement du sucre *désoxy-ribose*, insensible à l'hydrolyse alcaline, par un sucre *ribose* qui y est très sensible. Les acides aminés sont accrochés sur des ARN de transfert (ARNt) qui contiennent un anti-codon, complément inverse du codon, qui porte l'acide aminé correspondant au codon. Dans le ribosome lors de la lecture des codons, les uns après les autres, le codon de l'ARNm est mis en relation avec l'anti-codon d'un ARNt qui ajoute l'acide aminé qu'il portait à la séquence protéique en cours de formation.

L'ordre des acides aminés dans les protéines est essentiel car il implique la façon dont les radicaux se positionnent pour former la structure tridimensionnelle de la protéine. La structure spatiale est très importante, car elle conditionne la fonction de la protéine. Ainsi certaines se découpent en *domaines* exerçant certaines fonctions indépendantes des autres parties de la protéine. *Cette structure multifonctions suggère la*

1. Le dogme correspond à un principe incontestable et intangible d'une religion ou d'une doctrine philosophique ou politique. En science, il n'y a pas de dogmes, simplement des axiomes (vérités indémonstrables qui doivent être admises ou des principes (loi admise sans démonstration ou raisonnements qui servent de point de départ) ; la meilleure preuve en est que ce « dogme » souffre des exceptions.

fusion de plusieurs gènes distincts en un gène unique mosaïque au cours de l'évolution.

L'origine de l'ARN est un problème majeur pour comprendre celle de la vie. L'ARN est incontournable en ce sens que l'ADN ne peut être exprimé sans l'ARN. Compte tenu de son rôle d'intermédiaire, l'ARN doit logiquement avoir précédé les protéines, polypeptides formés actuellement avec 20 types acides aminés différents. Mais son origine est encore inconnue en raison de la méconnaissance des conditions concomitantes du protométabolisme naissant. L'existence de ses constituants, le D-ribose (homochiral), le phosphate, l'adénine, la guanine, la cytosine, l'uracile et d'autres bases azotées, est un préalable incontournable. Ces éléments n'étaient sans doute pas les seuls avec des coenzymes variées. Avec le temps, de nombreuses combinaisons n'ont pas manqué de se faire et la sélection naturelle n'a retenu que les plus performantes. Il faut prendre en compte également l'apport de l'énergie indispensable pour assurer les liaisons chimiques, autrement dit la présence d'ATP et sans doute les pyrophosphates et les thioesters déjà évoqués pour échanger les électrons. Si on y ajoute la réplication automatique, on dispose des éléments suffisants pour que l'ARN ancestral se soit constitué de façon efficace. Selon E. et R. Winkler-Oswatitsch en 1981, l'ARN ancestral devait être d'une longueur limitée à 75 nucléotides et riche en guanine-cytosine disposés en deux unités mobiles complémentaires de 35 nucléotides assemblées par une charnière et pouvant s'enrouler en double hélice. Cet ARN a dû présenter également une propriété indispensable, celle d'une activité autocatalytique qui a favorisé très naturellement sa sélection en ribozymes.

► Structure du gène

Définir le gène aujourd'hui, après tous les progrès réalisés en biologie moléculaire, n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire. La génétique de la théorie synthétique faisait la relation directe entre un gène et un caractère. Désormais cette définition est caduque. Un gène correspond à un fragment de séquence de la double hélice d'ADN, d'où le terme désormais souvent usité de *séquence génomique*. La définition actuelle correspond à *un segment d'ADN impliqué dans la production d'une chaîne polypeptidique ; il comprend des régions qui précèdent ou qui suivent la région codante, ainsi que chez les eucaryotes, les séquences intercalaires (introns) situées entre les séquences codantes (exons)*. Fonctionnellement, un gène correspond à une séquence ADN qui code une protéine.

On constate que les zones *non codantes*, les *introns* (*intervening sequences*) présentent une répartition en dent-de-scie (corrélations à long terme),

tandis que les *zones codantes* (les *exons* : *expressive sequences*) ont des répartitions en courbes régulières. Les corrélations à grande échelle de lois de puissance trouvées dans les séquences non codantes de l'ADN sont un indice indirect de sa structure tridimensionnelle, un reflet des propriétés d'invariance d'échelle des longues chaînes des polymères, autrement dit qu'elles ont une structure fractale. Cela signifie aussi que *les séquences non codantes de l'ADN ont une structure fractale*. Cette structure pourrait être liée à la façon dont la chaîne polymère d'ADN est repliée dans le chromosome, sans faire de nœuds, puisqu'il faut ranger un objet de 1 m de long dans une région d'environ 1 μm . Une telle structure ne peut être que globulaire et autosimilaire (globule froissé ou fripé). Ce sont des protéines basiques positives, les *histones*, qui s'accrochent sur l'ADN et le font se replier sur lui-même en une *compaction* qui le réduit de 1/8 000. *Les histones sont donc des inducteurs biochimiques de structures géométriques fractales*, qui pourraient bien être codées par une séquence particulière d'ADN à identifier. Les *régions non codantes* auraient donc un rôle de *mécanique de rangement*, une *fonction de structuration* de la molécule d'ADN pour lui permettre de tenir de façon compacte dans l'espace réduit des chromosomes en se repliant sur elle-même en *globules fractales*, ce qui pourrait être l'une des manifestations de la relativité d'échelle dans les gènes.

Par contre les *régions codantes* (les *exons*) ont une structure aléatoire. La raison biologique en semble évidente. En effet, les protéines fonctionnelles ont une *conformation compacte tridimensionnelle* correspondant à une *énergie minimale dans l'espace de conformation* et impliquent que la séquence codante soit aléatoire. C'est une condition nécessaire au bon fonctionnement des protéines fabriquées par l'organisme. Dans l'hypothèse (qui reste à valider) d'une *intervention sous-jacente de la physique quasi-quantique macroscopique dans ces phénomènes de structuration du vivant*, cette énergie minimale dans l'espace de conformation pourrait correspondre au niveau fondamental (énergie du vide).

Les travaux de l'équipe de Buldyrev en 1995 sur l'évolution de la complexité fractale dans l'organisation des nucléotides des gènes de la chaîne de myosine ont montré que la séquence codante était restée pratiquement inchangée au cours de l'évolution, alors que la séquence entière du gène était devenue plus hétérogène et complexe. L'exposant quantifiant ces corrélations exprimant la complexité fractale est plus faible pour les séquences codantes, que pour les parties non codantes. Pour le gène entier, la valeur de l'exposant croît des premiers eucaryotes aux invertébrés et des invertébrés aux vertébrés. Elle est sans doute un reflet de l'accroissement de complexité. L'existence de plusieurs niveaux

autosimilaires est maintenant bien établie chez les eucaryotes et il semble même qu'une valeur universelle du coefficient de corrélation de 2/3 caractériserait cette structure.

L'ensemble des gènes constitue le *génome* d'un organisme. Il renfermerait chez l'homme 3 milliards de paires de bases réparties entre 25 000 et 30 000 gènes. C'est en fait une *simple base de données, d'informations multiples*, comme l'a souligné fort justement Denis Noble en 2007, et non « pas un programme qui détermine la vie ». Ce qui détermine la vie, c'est le *génome* dans un *environnement cellulaire complexe* qui fait intervenir des *interactions multiples* avec des *expressions très variables de gènes dans le temps et dans l'espace*, pour fabriquer les *protéines nécessaires* et exercer des *fonctions physiologiques* comportant de nombreux *systèmes de régulation*. Cet ensemble constitue un véritable *système biologique*.

► Les mutations

Les mutations correspondent à des changements intervenant dans la séquence génomique, à des erreurs au moment de la réplication lorsque la cellule se divise. Il peut s'agir du remplacement d'une paire de base par une autre, un T remplaçant un A, un G à la place d'un C, etc. Ce sont les *mutations ponctuelles*. Il semblerait selon Masuda et al., 2005, que l'activité des polymérases de l'ADN soit requis, chez les souris, pour produire des mutations. La *polymérase η (Pol η)* est impliquée dans les mutations A/T et la *polymérase θ (Pol θ)* serait en cause dans l'introduction des mutations C/G. Il peut y avoir une inactivation d'un gène sauvage, une *mutation directe*. Il peut y avoir aussi un remplacement au niveau d'un codon représentant un acide aminé le transformant en codon de terminaison (*mutation non-sens*), la réactivation d'un gène silencieux (*mutation reverse*). Parfois les mutations n'entraînent aucune modification de l'expression du gène ; ce sont les mutations silencieuses, ou neutres, souvent placées au niveau intergénique. Il peut y avoir mutation par *addition* ou *insertion* d'une base supplémentaire (*insertion*) ou par l'*élimination* d'une base de la séquence considérée (*délétion*), ce qui a comme conséquence immédiate de décaler le cadre de lecture vers l'avant ou vers l'arrière. Il en résulte la formation de codons différents dont le résultat peut être une autre protéine, ou une absence de protéine. Les mutations affectent aussi bien les séquences codantes (*exons*) que les séquences intercalaires (*introns*) situées entre les exons.

Les mutations engendrent les *variations individuelles* constituant la *variabilité*, avec les *innovations*, mais aussi les *anomalies tératologiques*.

On sait que lorsque la protéine de choc thermique *HSP 90*¹ qui facilite la transmission des informations lors de la division cellulaire et du développement n'exerce plus son rôle, par *mutation ou inactivation*, la fréquence des malformations augmente alors, ce qui suggère que *HSP 90* réduit certaines mutations au silence. Elle intervient pour garantir le repliement des protéines sur elles-mêmes qui est indispensable pour leur activité biologique. *Les mutations se réalisant au hasard constituent la mécanique de base de l'évolution* ; ce sont elles qui apportent les *innovations*, mais aussi les *anomalies tératologiques*. Mais ce *hasard est contraint*, limité par le nombre de bases et d'autres phénomènes de réparation.

Les taux de mutations sont généralement faibles, de l'ordre de 1/10 000, mis en évidence grâce aux méthodes de détection et de répartition des erreurs. Ils ont fait l'objet de nombreux débats. On admet un taux de mutation globalement constant au cours des temps géologiques, ce que l'on appelle l'*horloge moléculaire*². On avait observé, que chez les vertébrés, ce taux était à peu près constant, ce qui suggérerait que les mutations apparaissent selon un rythme assez régulier pour une protéine donnée. Les horloges moléculaires sont utilisées pour évaluer par les phylogénies moléculaires, les temps de divergences entre les espèces. En fait, les taux de mutations varient d'une molécule à l'autre et même au cours du temps, comme l'a prouvé l'utilisation des données paléontologiques. Certaines molécules et les gènes qui les codent évoluent plus vite que d'autres par des substitutions. Les *fibrinopeptides*³ évoluent très vite (tous les 1,1 Ma.), les *hémoglobines* un peu moins vite (tous les 5,8 Ma.), alors que les *cytochromes c* évoluent les plus lentement (tous les 20,0 Ma.). Les taux d'évolution sont sans doute liés à l'importance métabolique des molécules considérées, mais aussi au temps de génération des espèces. Une molécule très vitale comme le *cytochrome c* ne peut certainement pas muter beaucoup en raison de son implication fonctionnelle dans la respiration par sa capacité à subir oxydation et réduction. Des modifications trop importantes pourraient l'empêcher de fonctionner, d'où

-
1. « *Heat shock protéine* » de poids moléculaire 90 est une protéine qui protège les autres protéines contre les stress comme l'absence d'oxygène, la température.
 2. La théorie de l'horloge moléculaire de Zückerlandl et Pauling en 1962, est fondée sur l'observation du taux d'évolution des protéines, en particulier des α globines.
 3. Le fibrinogène est un dimère dont chaque unité a des chaînes α , β et γ . Sur les chaînes α , β se trouve une petite séquence de peptide, appelée fibrinopeptide, fragments de peptide isolé du fibrinogène par la thrombine. Les fibrinopeptides de la salive sont de bons indicateurs de l'état des facteurs de coagulation du sang. Dans la coagulation, une enzyme protéase clive les fibrinopeptides des chaînes α et β du fibrinogène pour donner de la fibrine.

sa stabilité structurale. La validité de son horloge moléculaire a été confirmée. Quoi qu'il en soit, *le génome propose, mais le milieu dispose*.

La relativité d'échelle intervient peut-être ici indirectement au niveau de la duplication de l'ADN par des erreurs de duplication. Nous y reviendrons plus loin.

La mécanique saltatoire modulée par les hétérochronies du développement

La mécanique des mutations, source du changement, a comme conséquence lors de son action sur le développement d'engendrer ce que l'on appelle des *hétérochronies du développement*.

► Les hétérochronies du développement

Les effets des mutations peuvent être amplifiés, ou minorés, par les altérations de la chronologie, des taux et des vitesses du développement. C'est ce que l'on appelle les *hétérochronies du développement*¹.

L'évolution peut faire « marche arrière » souvent par une innovation, en rajeunissant la morphologie adulte, ce que l'on appelle une *paedomorphose*, par *néoténie*, *retardation* ou *décélération* ou par *troncature du développement*, appelée encore *hypomorphose*, ou accélérer par ce que l'on nomme une *peramorphose*, par une *accélération* parfois novatrice du développement. L'évolution est un véritable patchwork de tous ces processus hétérochroniques qui donnent à l'évolution une mécanique d'une très grande souplesse.

1. Voir Chaline et Marchand. 2002. *Les Merveilles de l'évolution*. EUD, Dijon & Chaline. 2006. *Quoi de neuf depuis Darwin ?*, Ellipses. Paris.

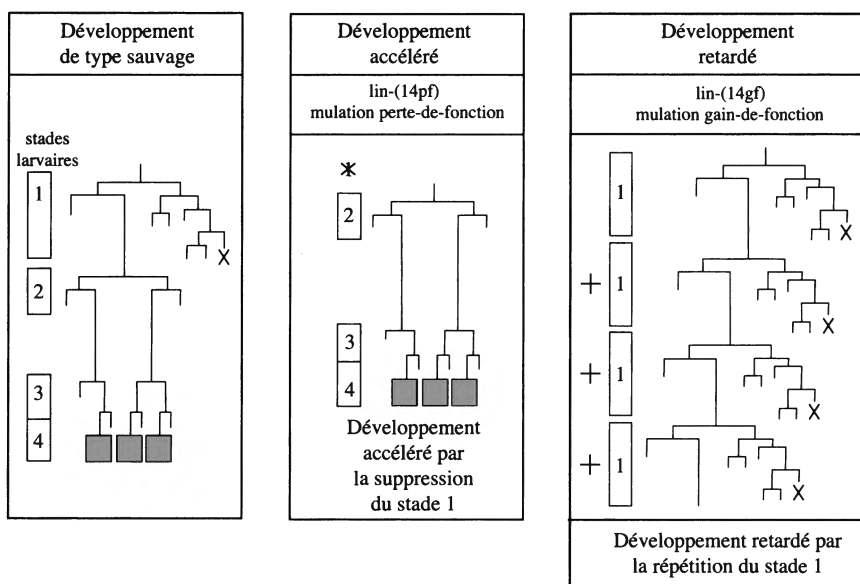


Figure 2.4. Les gènes hétérochroniques Lin 14 chez *Caenorhabditis elegans*.

Le lignage du blastomère antéro-postérieur se maintient (à gauche) au cours du développement normal des quatre premiers stades larvaires. Au centre, les mutations avec perte de fonction (pf) du gène *lin-14* provoquent un développement accéléré du lignage en raison de la suppression des divisions du premier stade larvaire. À l'opposé, à droite, la mutation gain de fonction (gf) du gène *Lin-14* entraîne une retardation dans la différenciation des lignages à cause de la répétition des divisions du premier stade larvaire (d'après B.C. Wightman, I. Ha, & G. Ruvkun, 1993 in Wolpert, 2004).

S.J. Gould et Brian K. Hall ont montré que les altérations chronologiques du développement étaient un processus épigénétique qui liait le développement à l'écologie et à l'évolution, car elles sont en effet souvent associées aux fluctuations des paramètres climatiques par le biais des médiateurs hormonaux et de gènes dits *hétérochroniques* souvent *thermosensibles*. On connaît un exemple caractéristique, chez le ver *Caenorhabditis elegans*, où l'on a pu déterminer les gènes qui contrôlent le devenir des cellules à chaque instant du développement. On a ainsi identifié les gènes qui déterminent la chronologie des divisions de nombreux types cellulaires. Wightman, H. et G. Ruvkun ont pu montrer que les mutations de deux gènes *lin-4* et *lin-14* altéraient la chronologie du développement (fig. 2.4). Ce sont donc des *gènes hétérochroniques*.

Les mutations de ces gènes provoquent à la fois des développements retardés et des développements accélérés. C'est le cas du blastomère T (*T antéro-postérieur*) qui, dans le type sauvage non muté, présente quatre stades larvaires successifs (1, 2, 3 et 4) qui donneront naissance aux cellules épidermiques et aux neurones. Le mutant *lin-14* avec perte de

fonction (*pf*) montre une division accélérée du lignage par la suppression des divisions du premier stade larvaire. Par contre les mutations gain de fonction (*gf*) de *lin-14* entraînent la répétition des divisions du premier stade larvaire et retardent donc la différenciation des lignages de cellules. On estime que ces gènes agiraient sur la concentration d'une protéine *Lin-14* qui diminuerait au cours du temps, sa concentration étant divisée par 10 entre les premiers et les derniers stades larvaires. Les mutants *gain de fonction* provoqueraient donc le maintien à un taux élevé de la protéine, tandis que les mutants *perte de fonction* l'abaisseraient. On a même pu montrer que ces mutants jouent des rôles antagonistes. Chez les organismes dépourvus de phase larvaire, les hétérochronies dépendent souvent de la chronologie de la maturité sexuelle qui bloque définitivement la croissance.

● La décélération de l'évolution

Par rapport au développement théorique de l'ancêtre en quatre phases A, B, C et D, une retardation du développement (ex. : néoténie), ou sa décélération, sans modification de sa durée, aboutit à un descendant ayant une taille identique, mais avec une morphologie plus juvénile. L'adulte descendant a donc une morphologie plus juvénile de type ancestral. Ce phénomène entraîne un véritable rajeunissement morphologique de la lignée considérée, un possible retour en arrière d'un caractère donné.

● L'hypomorphose, un développement tronqué qui miniaturise

Elle se traduit chez le descendant par un développement tronqué, donc raccourci. En conséquence, le descendant adulte a la taille et la forme que son ancêtre avait à un âge plus précoce. C'est une véritable *miniaturisation* de l'espèce, mais qui peut cependant se reproduire, puisque la maturité sexuelle est déjà effective à la fin de la croissance. Ce type de phénomène est bien connu dans les archives paléontologiques où de nombreuses lignées nouvelles apparaissent généralement à partir d'individus de petite taille par hypomorphose de formes ancestrales.

● L'hypermorphose

À l'opposé du raccourcissement du développement par hypomorphose, se situe l'hypermorphose. Conditionnée par le recul de la maturité sexuelle, elle a comme conséquence, de prolonger la croissance au-delà de la croissance présentée par l'ancêtre. C'est ainsi que le descendant adulte aura une taille beaucoup plus grande et une *morphologie* exagérant celle de l'ancêtre, qualifiée alors d'*hyper-adulte*. L'hypermorphose

d'un caractère semble pouvoir s'accroître graduellement au cours des temps géologiques, sous l'action de la sélection naturelle, puisque l'on constate souvent un fort accroissement de taille dans de nombreuses lignées paléontologiques, à l'origine de la soi-disant *loi d'accroissement de taille*, dite *loi de Cope*. En fait, il s'agit d'une simple tendance évolutive, sélectionnée pour les avantages évidents qu'elle peut procurer, mais non absolue puisque la taille est un caractère réversible par hypomorphose. Ce processus est à l'origine des développements excessifs de certains caractères ou organes, les *hypertélies*, comme les fameux bois des cerfs *Megaceros* qui ont entraîné leur extinction. Nous y reviendrons plus loin à propos des allométries de développement...

• L'accélération

C'est le phénomène inverse de la décélération du développement. Du fait de son accélération, le développement parcourt les premières étapes morphologiques plus rapidement et comme la croissance se poursuit au-delà de celle de l'ancêtre, elle s'exprime dans une nouvelle étape morphologique inédite, dite hyper-adulte, alors que la taille adulte reste identique à celle de l'ancêtre. L'accélération est une mécanique qui peut provoquer un véritable bond morphologique évolutif de l'espèce.

D'autres hétérochronies comme les pré- et post-déplacements concernent un simple caractère.

Les hétérochoronies montrent l'*aspect relatif du développement embryonnaire d'une espèce à l'autre* par rapport au système de référence. C'est une expression de la relativité d'échelle, qui s'exprime dans le temps.

La chiralité

La *chiralité* des molécules vivantes est un phénomène chimique qui est important ; une découverte faite par Pasteur en 1848. C'est une donnée à prendre en compte pour comprendre l'origine de la vie. Elle exprime le fait que l'activité optique d'une molécule est liée à la *chiralité*, un terme employé par Lord Kelvin en 1904. Pasteur a montré que de nombreuses molécules ont des pouvoirs rotatoires spécifiques qui détournent la lumière polarisée, soit à droite (R = *rectus*), soit à gauche (S = *sinister*). On dit qu'elles sont optiquement, respectivement *dextrogyres* ou *lévogyres*. C'est-à-dire que la disposition des atomes d'une molécule est souvent *asymétrique*, mais parfois *symétrique*, ce qui leur permet de prendre des positions différentes dans l'espace, constituant les *stéréoisomères*. Lorsque ces *stéréoisomères* sont l'image de l'autre en miroir,

non superposables et symétriques, ils forment des molécules *chirales*¹, que l'on appelle les *énantiomères*². Et ces molécules ont des propriétés différentes comme conséquence directe de leur conformation spatiale. Les atomes de carbone portant quatre groupements différents (tétra-valent) forment un *système chiral* auquel correspondent deux *isomères*. En général ces systèmes renferment autant de formes dextrogyres que lévogyres ; on parle de *mélange racémique*.

Lorsqu'une molécule n'existe que sous une forme, on parle d'*homochiralité*. Or les organismes vivants sont justement constitués de molécules du même type stéréochimique ; elles sont *homochirales*.

Les acides aminés sont des molécules homochirales, des énantiomères tous *lévogyres*.

Pour les sucres, c'est l'inverse, ils sont tous *dextrogyres*. La molécule d'ADN peut être, soit enroulée vers la droite, à cause des sucres dextrogyres, soit dans quelques cas particuliers rares, vers la gauche ; une *isomérisation de conformation*.

Cette asymétrie a certainement une signification structurale, ou fonctionnelle, puisqu'elle a été retenue par la sélection naturelle. Une cause physique est sans doute en jeu, mais il est possible qu'elle soit liée tout simplement au fait que *la dissymétrie est plus stable que la symétrie*. En outre l'asymétrie permet une meilleure diversité d'interactions moléculaires spécifiques du type « *clé-serrure* ». Mais on ignore comment la sélection naturelle a retenu et optimisé ces formules, peut être par le simple principe de parcimonie fonctionnelle, selon les propriétés propres à chacun des énantiomères, avec une discrimination possible provoquée par un récepteur chiral. Pour l'ADN il semble évident qu'un mélange hétéro-chiral avec des sucres dextrogyres et lévogyres poserait des problèmes au moment de la réplication. La *chiralité dextrogyre* des sucres de l'ARN (le *D-ribose*) a sans doute contraint celui des acides aminés lévogyres (*L-acides-aminés*) et des protéines qu'ils conditionnent.

On peut dire que *la vie correspond à une rupture de symétrie*, au moins au niveau *moléculaire*, puisqu'elle retrouve des symétries à d'autres échelles de structuration plus élevées, au niveau de la morphogenèse des organismes, comme nous allons le voir plus loin. Selon André Brack, cette rupture de symétrie moléculaire pourrait être la conséquence de

-
1. Du grec *kheir* signifiant « la main », ce terme désigne un composé chimique qui n'est pas superposable à son image dans un miroir, comme une paire de chaussure par exemple.
 2. Du grec *enantios* signifiant « opposé ». Un exemple d'énantiomère, ou d'énantiomorphe, est celui des mains humaines.

la *force nucléaire faible*¹ (mais il reste difficile de comprendre comment celle-ci pourrait s'exprimer aux échelles du vivant, considérablement plus grandes que celles où agit cette force). Une autre piste possible, mais qui reste à étudier, est l'existence de dissymétries dans la relation obtenue en théorie de la relativité d'échelle entre le champ de vitesse des géodésiques et les fonctions d'ondes (dans le cas de l'équation de Dirac).

On remarquera que les virus, formes non vivantes, qui ont acquis du matériel génétique, mais aucun élément de décodage, ne peuvent absolument pas donner une idée des premiers assemblages vivants, puisqu'ils sont tributaires d'organismes préexistants et doivent parasiter un autre organisme pour se multiplier.

Il existe aussi un certain nombre de *contraintes physiques terrestres* qui ont été déterminantes dans les *morphologies* qu'ont prises les êtres vivants, ne serait-ce que la *gravité*. D'autres contraintes façonnent aussi le vivant comme nous allons le voir maintenant.

Il existe une très grande différence entre *l'inorganique* et *l'organique*, c'est celle de la *complexité de l'organisation des molécules*. Le passage d'un domaine à l'autre concrétise l'apparition de la vie et constitue un saut structurel majeur, dont les caractéristiques étaient également très contraignantes. Si l'apparition du vivant est une *rupture de symétrie* au niveau de base moléculaire, *la symétrie se réinvente à divers niveaux hiérarchiquement plus élevés* de la morphogenèse.

Échelles du vivant, polarités, asymétries et symétries

En effet, il existe pour l'inorganique comme pour le vivant, de nombreuses contraintes physiques qui conditionnent le développement de *symétries* et des *polarités*. Les symétries physiques des cristaux découlent des forces des liaisons chimiques (liaisons hydrogène, métallique) entre atomes et molécules, alors que celles du vivant sont liées aux contraintes qui se développent aux diverses échelles considérées, comme l'ont montré Scania Schonen en 1989 et Francis Hallé en 1999².

-
1. La force nucléaire faible est l'une des forces fondamentales d'interaction de la nature, la plus faible limitée au noyau atomique. Elle régit les interactions entre les leptons et les quarks et est responsable de la désintégration des particules, son champs d'action étant de 10^{-18}m .
 2. Voir leurs livres respectifs : « Symétrie et cerveau » dans *La Symétrie aujourd'hui* et *Éloge de la plante*.

► Les échelles du vivant

Dans le diagramme des échelles de l'univers établi par Nottale (fig. 2.5), on constate que le vivant se situe logiquement juste au milieu, à la frontière des petites et grandes échelles, là où s'expriment en majorité les lois de la physique classique. Elle se situe entre l'atome (rayon de Bohr à 0,5 angström), base des éléments du vivant et les plus grands organismes atteignant entre 20 et 35 m pour un poids de 1 à 2 t pour la baleine bleue. Les plus petits éléments vivants, les bactéries se situent aux environs de 40 microns. C'est-à-dire qu'entre l'atome et l'organisme vivant il y a une échelle de longueur de l'ordre de 10^{12} .

Entre 40 et 100 μ , aux petites échelles des unicellulaires, les contraintes physiques sont essentiellement celles de la *tension superficielle*, de la *viscosité* et du *mouvement brownien* ; la *gravité* étant négligeable à ces échelles. Il en est résulté des *symétries organisées autour d'un point* dans un plan à deux dimensions ou dans l'espace à trois dimensions, déterminant des formes soit *circulaires*, soit *sphériques*. Le rapport surface/volume confère à ces microorganismes la potentialité de trouver leur énergie, soit dans le rayonnement solaire chez les plantes, soit dans des proies chez les animaux. Chez les Protistes, dont beaucoup ont plusieurs noyaux (plurinucléés¹), (plasmodies des Myxomycètes, Opalines, Flagellés parasites et Amibes variées), les séparations radicales connues entre autotrophes (végétaux) et hétérotrophes (animaux incapables de photosynthèse qui fonctionnent grâce à la digestion) sont, à cette échelle, impossibles. Mais les Euglènes vivent ainsi de façon ubiquiste, soit à la manière des végétaux, soit à la manière des animaux. Des Flagellés porteurs de chlorophylle peuvent devenir, soit une amibe, soit une algue et pratiquent simultanément l'autotrophie et l'hétérotrophie comme *Chromulina flavicans*. Plus d'un million d'espèces de bactéries se trouvent dans cette zone du spectre de taille.

1. Ces Protistes, s'ils sont plurinucléés, redeviennent mononucléés au cours de leur cycle par dissociation en éléments constitutifs.

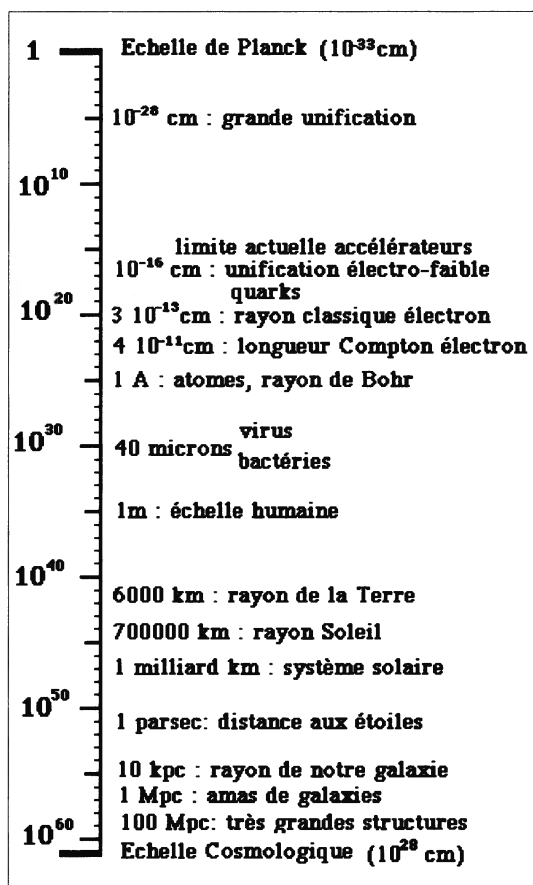


Figure 2.5. Le vivant dans l'échelle des échelles des différentes résolutions dans la nature.

La place de la vie dans la nature se situe juste au milieu de l'échelle de l'univers, depuis l'échelle de Planck, pour les plus petites (à 10^{-33} cm), jusqu'aux plus grandes de l'échelle cosmologique (à 10^{28} cm). D'un trait à l'autre, on augmente d'un facteur 10 (d'après Nottale, 2002).

Les formes de taille supérieure à 100μ sont soumises à la *gravité* et aux contraintes d'*exploitation* des *sources d'énergie* (lumière solaire et proies). On constate par contre que les tailles entre 100μ et $1\,000 \mu$ ($= 1\text{ mm}$) renferment peu d'organismes.

La plupart des organismes pluricellulaires (animaux et végétaux), plus d'un million d'espèces, ont des tailles comprises entre 1 mm et une centaine de mètres.

Y aurait-il une explication possible de cette répartition des organismes grâce à la relativité d'échelle et ses pics de probabilités optimisés par la sélection naturelle ?

► Symétries et asymétries chez les végétaux

Les *êtres vivants*, à croissance ou mobilité horizontales, groupant les animaux aquatiques et terrestres ainsi que les plantes et leurs organes à croissance horizontale, possèdent une *polarité antéro-postérieure* pour les plantes et un *axe antéro-postérieur (tête-queue)* pour les animaux, qui correspondent, soit à l'axe du déplacement, soit à l'axe de croissance dans l'environnement¹.

Soumis à la *gravité*, les grands organismes présentent en conséquence, une *polarité verticale* avec un dessus, un dessous, un haut, un bas, une face et un dos. La gravité nécessite une base d'autant plus solide, que l'organisme est plus lourd.

Dans la dimension horizontale, on doit distinguer deux cas. Chez les *êtres vivants fixés et à croissance verticale*, c'est-à-dire, les plantes et les animaux fixés comme les hydres, les anémones de mer et les coraux, on observe une *symétrie radiale sur un axe vertical*. Cette structure est interprétée comme le résultat de la sélection naturelle dans l'exploitation des sources d'énergie dans toutes les directions. Cette *symétrie radiale* s'applique également aux structures internes des organes.

Les plantes présentent plusieurs types de répartition des feuilles autour des tiges, c'est ce que l'on appelle la *phyllotaxie*. Cette répartition se différencie par des *mouvements angulaires*, des *rotations*, des *torsions*. Lorsque la plante développe une feuille par nœud, on dit que la *disposition* est alterne (angle de 360°) avec une variété dite *alterne distique* de feuilles sur un seul plan (angle de 180°).

Avec deux feuilles par nœud, les uns au-dessus des autres, la répartition est dite *opposée*, devenant *opposée décussée* lorsque d'un nœud à l'autre, il y a une rotation de 90°. Enfin lorsque plus de deux feuilles se développent par nœud, on parle de *répartition verticillée* se développant sur plusieurs plans (angle de 60° pour trois feuilles.)²

On la dit *alterne spiralée*, lorsque les feuilles sont disposées selon une *spirale* avec un angle de divergence variable caractéristique de l'espèce. Dans les répartitions spiralées, on constate l'existence de *spirales secondaires* appelées *parastiches* pouvant être *senestres* ou *dextres*. Ces parastiches, d'orientations opposées sont quantifiées et pour chaque plante particulière, le nombre des parastiches dextres et senestres correspond

1. Pour plus de détails, voir Chaline. 2006. *Quoi de neuf depuis Darwin ?* Ellipses.Paris.

2. Les travaux expérimentaux de Douady et Couder, utilisant le dépôt de gouttes ferrofluides dans un champ magnétique, a permis d'obtenir tous les motifs phyllotaxiques observés.

en général à deux nombres successifs de la suite de Fibonacci¹, une découverte d'Alexander Braun en 1831. Par exemple, la marguerite des jardins est une fleur spiralee qui possède 13 et 21 spirales et le tournesol a ses graines réparties en 21 spirales dans un sens et 34 dans l'autre. Les écailles de pin ou d'ananas, qui ont 8 écailles dans un sens et 13 dans l'autre sens, ont une répartition qui se réalise selon deux nombres successifs de la suite de Fibonacci. Il semblerait qu'il existe des transitions entre des modes différents de spirales, ce qui suggère *une optimisation des nombres de parastiches selon des pics de probabilité*. De même la répartition du nombre des pétales des fleurs n'est pas quelconque, les lys ont 3 pétales, les boutons d'or en ont 5, les soucis 13, les asters 21 et les marguerites ont des fréquences de 34, 55 ou 89 pétales. Il semblerait que *cette répartition des feuilles ou des fleurs*, chez les plantes autotrophes, soit *optimisée par la sélection naturelle pour favoriser la photosynthèse*, c'est-à-dire pour utiliser au mieux le rayonnement énergétique solaire et en favorisant également l'aération pour capter le bioxyde de carbone de l'air. C'est la *phyllotaxie spiralee* qui optimise au mieux la photosynthèse en donnant aux bourgeons un maximum d'espace pour se développer.

Il s'agit là de nombres de la suite de Fibonacci qui pourraient correspondre à des pics de probabilités retenus et, optimisés par la sélection naturelle.

Il semblerait en effet, selon les travaux de Green et al. en 2006, que la *biophysique des méristèmes* (zones de développement des feuilles) joue un rôle majeur par les contraintes de tension et turgescence définissant les courbures des plissements influençant la répartition des microtubules et les motifs résultants, spiralés et verticillés. La phyllotaxie proviendrait d'une région en anneau située à l'apex de la plante et résulterait d'une *réponse physique spontanée* aux surfaces en expansions dues aux contraintes latérales. Les propriétés physiques d'une couche uniforme sur celle de son substratum uniforme provoqueraient une longueur d'onde amplifiée avec une ondulation déterminant le nombre d'organes. Ces mécanismes, qui brisent la symétrie circulaire en réponse à des compressions ou à la croissance de l'anneau, semblent pouvoir être étudiés par les équations différentielles de la physique des matériaux. Les auteurs dérivent de ces processus, essentiellement physiques et non chimiques, les phyllotaxies végétales selon les valeurs respectives des paramètres.

1. La suite Fibonacci se construit en additionnant le nouveau chiffre avec le précédent ou leur double : $1+2=3$, $2+3=5$, $5+3=8$, ce qui donne la suite de 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377. Elle a été découverte par Léonardo Pisano (Léonard de Pise), dit Fibonacci, qui l'a publiée dans son livre *Liber Albaci* en 1202.

► Contrôle génétique des symétries et polarités chez les végétaux

Les gènes de régulation à homéoboîtes des végétaux, les gènes *KNOX* (*KNO*tted-like *homeobo*X) joueraient aussi, selon Sarah C. Hake, un rôle important avec les hormones (auxine) et les morphogènes prévus par Turing, dans le développement de ces méristèmes qui déterminent la formation, la nature et la position des organes végétaux. Le *méristème apical caulinaire* fabrique en effet les tiges, les feuilles et contrôlerait la disposition spatiale des feuilles et des bourgeons sur la tige. Nous avons vu que l'exploitation maximale de la lumière semblait être une condition de sélection de la phyllotaxie et l'on pensait que celle-ci pouvait être déterminée génétiquement. Bessonov *et al.* en 2008 ont montré que le modèle mathématique de Green de la phyllotaxie impliquait à la fois des hormones (*auxine* et *cytokinine*) dont les concentrations déterminent l'apparition de nouveaux bourgeons et la prolifération, des facteurs de croissance et des nutriments qui conditionnent la croissance des branches et des racines contrôlée durant l'organogenèse chez *Arabidopsis* par le gène *aintegumenata* (*ANT*). Le gène *apetala2* (*AP2*) exprimé dans les organes floraux des sépales, pétales, étamines et carpelles participe également au développement de ces organes. Effectivement, si une seule mutation du maïs, appelé *abphyl* (*abnormal phyllotaxy*) est suffisante pour changer la phyllotaxie des feuilles, il semblerait que la mutation d'un seul gène puisse générer de la diversité. Le gène *stylosa* (*STY*) lorsqu'il est double mutant *STY GRAM* intervient dans la *régulation de la phyllotaxie*, les fonctions homéotiques florales et la *polarité des organes* chez *Antirrhinum*. De nombreux autres gènes semblent intervenir dans le développement des feuilles : le mutant *shoot meristemless* (*STM*) empêche la formation du méristème, les rôles des gènes *MGO*UN, *KNAT2* (symétrie) et *KNAT6* et *PHAN* (*PhantasticA*) sont encore mal connus. Lippman *et al.* (2008) ont montré que chez les tomates, les mutants *compound inflorescence* (*s*) et *anantha* (*an*) qui codent pour un facteur de transcription d'homéobox et pour une protéine *Fbox*, contrôlent l'architecture de l'inflorescence, en retardant la formation de la fleur et lui permettant d'acquérir ainsi de nouveaux branchements et des centaines de fleurs. Les années à venir apporteront vraisemblablement les réponses génétiques à toutes ces questions de morphogenèse et de phyllotaxie. L'expression de la relativité d'échelle en morphogenèse, ici la *phyllotaxie*, se manifesterait donc au travers de gènes homéotiques particuliers qui structurent les végétaux.

► Morphogenèse et principales symétries et polarités chez les Métazoaires

Les Métazoaires, c'est-à-dire le passage à l'état pluricellulaire, se manifestent à leurs débuts par des organismes où les cellules ne sont pas encore vraiment structurées en tissus et en organes. Ce sont les éponges ou Spongiaires (4000 à 5000 espèces; tailles variant du mm au m). Groupées, leurs cellules ont perdu la possibilité de mener une vie autonome¹; elles sont devenues interdépendantes par une nouvelle intégration biologique : le *multicellulaire*. N'ayant ni tête, ni cerveau, les cellules puisent leur nourriture dans l'eau qui circule au sein des *canaux internes* qui présentent une *structure fractale arborescente*.

Les premiers Métazoaires, où les cellules sont groupées en tissus et organes sont les Eumétazoaires, groupant tous les autres Métazoaires. On distingue en leur sein deux types de différenciations importants dans la morphogenèse et la symétrie.

Les plus simples possèdent deux *feuilletts embryonnaires* (diploblastiques avec l'*ectoderme* et l'*endoderme séparés* par la matrice extracellulaire en forme de gelée dépourvue de cellules (*mésoglée*) et une *symétrie radiaire* (Cnidaires : méduses, coraux, hydres et cténophores représentés par 9000 espèces).

Les seconds ont trois *feuilletts embryonnaires* (triploblastiques avec en plus le *mésoderme*) et une *symétrie bilatérale* au moins à l'état embryonnaire; ce sont les *Bilateria*².

On constate ensuite l'apparition d'une cavité dans le corps, le *cœlome*, une cavité mésodermique où se développent les viscères. Cette structure persistera chez les *Deutérostomiens*³ et les *Protostomiens*⁴ où deux modes de segmentation de l'œuf se sont différenciés.

-
1. On cite l'expérience d'une éponge que l'on dissocie en la filtrant et qui se reconstitue si l'on remet ensemble les cellules isolées à son emplacement initial. Mais des cellules isolées ont perdu le pouvoir de redonner une éponge complète, car elles se sont différenciées en petites et grandes cellules, internes et externes, avec un milieu intérieur où des fibres façonnent un squelette plus ou moins solide. Beaucoup de cellules disparaissent dans cette expérience. Chacune commence à acquérir des fonctions spécialisées dans un système d'intégration souple avec une information qui circule lentement en l'absence d'un système nerveux coordonnateur.
 2. Animaux présentant deux axes de polarités (antéro-postérieur et dorso-ventral) qui ont pour corollaire une symétrie bilatérale. L'axe antéro-postérieur est parallèle au sens de déplacement de l'animal et le tube digestif est ouvert aux deux extrémités.
 3. Chez les Deutérostomiens groupant les Echinodermes (4000 espèces) et les Cordés (Tuniciers : 1 600, Céphalocordés : 25 et Vertébrés : 60 000), les blastomères se segmentent selon un *schéma à symétrie radiaire*, possèdent une *symétrie bilatérale* et l'anus se forme le premier et la bouche en second.
 4. Chez les Protostomiens, la *segmentation* des blastomères est *spirale* et la bouche se forme en premier (mollusques : 80 000 espèces; arthropodes : 1 000 000 d'espèces, et les vers

Le coelome restera *indivisé* chez les Mollusques et les Échinodermes, ou sera *métamérisé*¹, c'est-à-dire permettra au corps de se constituer en *éléments successifs distincts* chez les Annélides, ou de former des *organes axiaux fusionnés* chez les Arthropodes et métamérisés chez les Vertébrés.

Des squelettes externes (coquilles des mollusques, cuticule des Arthropodes) et un squelette interne en os/cartilage chez les Vertébrés permettront ensuite aux individus d'acquérir une structure de soutien absolument indispensable pour maîtriser la *gravité* en accédant à de plus grandes tailles.

En résumé, à l'échelle macroscopique, les plantes possèdent une polarité verticale avec une symétrie radiale, tandis que les animaux possèdent un système de bipolarité antéro-postérieure et dorso-ventrale avec une symétrie bilatérale. On constate que ces structururations apparaissent déjà sur la cellule œuf, c'est-à-dire de façon très précoce dans le développement, ce qui indique aussi leur ancienneté.

► Contraintes physiques de la morphogenèse

Outre la gravité qui contraint les êtres vivants, d'autres manifestations physiques encore mal connues interviennent dans sa morphogenèse. Pour expliquer les morphologies du vivant, Vincent Fleury, en 2006, s'est attaché aux mouvements des cellules qui s'écoulent d'un lieu à un autre de l'embryon au cours du développement², notamment de la gastrulation. En effet lorsque la *blastula* atteint environ 20 000 cellules, une réorganisation majeure intervient, la *gastrulation*, avec des flux de mouvements cellulaires d'une extrême complexité³, qui aboutissent au plan d'organisation de l'individu. Ce flux se matérialise sous la forme de vortex symétriques qui, par collision, se transforment en flux hyperboliques autour d'une région neutre en forme de selle ou de fer à cheval, présumée ombilicale. Autour de ce point, les déformations sont simplement des élongations. Cet auteur suggère l'existence de *champs de cellules*, un peu à la façon des *champs magnétiques*, qui se déformeraient sous l'action de *forces de poussée*, par des étirements, des rotations, des tourbillons (vortex), des enroulements, des plis, des gonflements et des contractions qui détermineraient alors les polarités et les symétries. Ce seraient des phénomènes physiques, ou relevant de la mécanique des fluides, d'une hydrodynamique avec un relai génétique : « Les

Annélides : 7 000 espèces).

1. Corps composé d'une succession de segments (métamères).
2. Cette fluidité des cellules est bien visible chez le poisson zèbre transparent.
3. Connus depuis les années Trente.

tissus étant organisés en lames de parquet, les champs de force suivraient ces orientations. »

Il explique ainsi les plans d'organisation et plus particulièrement les animaux bilatéraux :

« les animaux bilatéraux aboutissent au fil de l'évolution à un animal plutôt allongé, ayant deux paires de membres, un tube interne et une sorte de tube sur le dos. Vers le haut du corps, au-dessus des épaules, une boule cérébrale entourée d'organes positionnés sur un fer à cheval apparaît dans le même mouvement [...] Le mouvement qui positionne les parties d'un animal est un écoulement mathématiquement précis » correspondant à des « écoulements tourbillonnaires ». En outre « les règles physiques de construction contraignent considérablement les possibles »... « C'est là une conséquence profonde de la physique et non de la génétique. »

Il est évident que l'idée de Fleury n'est pas fausse et exprime effectivement des structurations physiques limitant un certain nombre de possibles. Pour accepter son idée originale très vraisemblable de « *morphogenèse fluide* », on aimerait que l'auteur suggère plus clairement quelles sont ces *forces physiques sous-jacentes* en action. Cette approche de Fleury va dans le même sens que les travaux de Diogo Queiros-Condé (1999, 2000) sur les *turbulences*. Ce dernier a développé un modèle, celui des « *peaux entropiques* », pour interpréter *l'intermittence en turbulence développée*. Au cours de ses recherches, Queiros-Condé a transposé à l'arbre de la vie, la *géométrie de l'intermittence*. Et, grâce à l'introduction d'un *principe de conservation d'un flux d'entropie le long de l'arbre*, la géométrie de l'intermittence a permis de retrouver la *loi log-périodique* qui sera évoquée plus loin. Ces données suggèrent *une relation étroite effective entre la géométrie du vivant et les phénomènes de turbulence et de morphogenèse fluide*.

La description par Fleury de la croissance cellulaire par les lois de la mécanique des fluides est partiellement commune avec celle de la relativité d'échelle. En effet, une des représentations possibles de l'équation de la dynamique dans le cadre de la relativité d'échelle est *l'équation de Schrödinger*, mais une autre obtenue après changement de variable est précisément celle de la mécanique des fluides. Ce qu'apporte Fleury est de considérer les solutions de telles équations correspondant à des fluides visqueux et élasto-plastiques. Par contre, en relativité d'échelle, il se rajoute un *potentiel supplémentaire* (manifestation de la géométrie fractale), le « *potentiel quantique* », qui va impliquer la quantification des solutions. En conséquence, le système sera amené, non pas à une évolution continue comme dans l'approche classique de Fleury, mais à des sauts d'un état à un autre, c'est-à-dire, du point de vue biologique,

d'un plan d'organisation à un autre... Ceci est un point essentiel pour la relation entre embryogenèse et phylogenèse : l'approche classique ne peut permettre qu'une évolution graduelle (darwinisme classique), alors que la description macroquantique pourra rendre compte de l'évolution ponctuée (Gould et Eldredge, 1993), qui est aujourd'hui avérée.

En outre si Fleury fait la part belle à la structuration physique, il minimise le rôle du « *contrôle génétique* » de la morphogenèse, mis en évidence à chaque étape du développement. Pour Fleury :

« les nombreux gènes qui dirigent en apparence la formation des vaisseaux sont en fait sous le contrôle de l'écoulement, donc des forces ». Car affirme-t-il, « il n'y a rien de plus facile que de changer une veine en artère et réciproquement en modifiant les écoulements par de petits outils de chirurgie ». Il estime que « les mécanismes de formation des vaisseaux sont simples et induisent une auto-organisation automatique des tuyaux... même sans instructions génétiques préalables ».

Hamant et al., en 2008 ont apporté des arguments en faveur de la thèse de Fleury. Ils ont montré que la morphogenèse du *méristème*¹ d'*Arabidopsis* était une propriété émergente résultant du comportement des cellules en proie au stress mécanique dû aux forces physiques générées par la croissance. En effet, les vitesses de croissance des cellules créent, par les pressions mécaniques de l'eau qui entre dans la cellule, un gonflement, et exerce une pression dite de *turgescence* qui agrandit la paroi en développant des champs de forces physiques tissulaires. Or les microtubules qui constituent le cytosquelette² s'orientent dans ces champs de force. Autrement dit, ce sont les tissus cellulaires en croissance qui génèrent des contraintes mécaniques orientant les microtubules contrôlant elles-mêmes les dépôts de fibrilles de cellulose dans les parois cellulaires et déterminant en partie la forme des plantes. Ce mécanisme fonctionne en coordination avec la production de l'hormone de croissance, l'auxine³, qui contrôlerait la croissance cellulaire en favorisant la rupture des liaisons entre la cellulose et les fibrilles, ce qui ramollit la paroi et permet son élongation par turgescence. Elle interviendrait au niveau génétique en se liant à l'ADN dans la transcription des gènes méristématiques de type *KNOX* et *ARP* et de la famille *AUX-LAX* qui codent des transporteurs d'influx d'auxine. Il y aurait donc une part

-
1. C'est un tissu végétal des racines, tiges et feuilles, où ont lieu les divisions des cellules indifférenciées des zones de croissance.
 2. Voir le paragraphe : « La cellule eucaryote, le cytosquelette et la division cellulaire », p. 173-174.
 3. L'auxine, est synthétisée à partir d'un acide aminé, le tryptophane ou à partir d'un composé indolique, par une enzyme et son transport est généralement polarisée dans le sens basipète. Elle est inactivée par oxydation une fois son travail accompli.

de croissance où la physique joue un rôle mécanique et une part qui assure aussi à la plante la morphologie du *plan d'organisation de son espèce*, à contrôle nécessairement génétique. Nous verrons plus loin que la relativité d'échelle intervient sans doute aussi dans la morphogenèse, comme le suggère l'exemple généré théoriquement par une solution de l'équation de Schrödinger généralisée et réalisé dans la nature par *Platycodon grnadiflora* et *Liriodendron tulipifera*¹.

Le déplacement et le devenir des cellules sont pourtant très étroitement contrôlés par des gènes, comme le montre la formation du ver *Caenorhabditis elegans*². Chez ce dernier, il existe un module très conservateur qui contrôle les migrations des cellules et aussi leur forme³. Chez l'hydre, Khalturin *et al.* (2008) viennent de montrer que la famille des gènes *Hym301* contrôlait la distinction entre les deux espèces *Hydra oligactis* et *H. magnipapillata* par des différences de symétrie des tentacules.

La segmentation des vertébrés est aussi étroitement déterminée génétiquement, comme celle de la drosophile. Comme l'ont écrit Jean-Pierre Cornec et André Gilles en 2006, la segmentation du poulet se réalise selon un rythme précis, toutes les 90 minutes, et de 90 à 120 minutes pour la souris, ce qui implique l'existence d'un *oscillateur* réglant à la manière d'une horloge la *chronologie de la segmentation*. Chez le poisson zèbre ou la souris, la voie de signalisation est *Notch 1/delta 1* dont la cible est le gène *Lunatic fringe* qui oscille de façon synchrone avec le gène *C-hairy 1* dans le mésoderme présomitique. Des vagues d'ARNm progressent périodiquement en direction antérieure, puis se réduisent et se stabilisent dans la partie caudale du nouveau somite. Dans le cas de la souris, il existe une autre composante de l'oscillateur, qui a pour voie *Wnt/β-caténine* et pour cible le gène de la *conductine (axine 2)*. Ces résultats suggèrent que l'ancêtre *Urbilateria* était vraisemblablement segmenté et devrait permettre de démontrer l'homologie de la *métamérie* chez les Métazoaires.

En revenant au point de vue de Fleury, des écoulements tourbillonnaires on rejoint manifestement, selon moi, les systèmes dynamiques des pendules et des oscillateurs harmoniques avec des champs de force

-
1. Voir plus loin le paragraphe : « Application de la relativité d'échelle au végétal », p. 190.
 2. Le ver mâle est composé de 1031 cellules et l'hermaphrodite de 959 cellules, mais 131 sont programmées pour disparaître par apoptose. Son génome de 13 500 gènes renferme des gènes de l'apoptose (*ced3/cd4*) et des gènes de survie des cellules (*bcl-2*).
 3. Le module est formé de la kinase activée P21 (*PAK*) en interaction avec le facteur d'échange (*PIX*) et le récepteur de la kinase couplée avec la protéine G (*GIT*), qui indique aux cellules leur localisation. Il existe d'autres modules contrôlant la forme des cellules et les migrations des cellules distales (*RAC/CDC-42 GTPases*).

linéaires et non linéaires, capables d'auto-organisation¹. Les rythmes observés impliquant un oscillateur dans la segmentation sont vraisemblablement à mettre en rapport avec la relativité d'échelle. Un beau programme sera de trouver comment ces forces physiques, les écoulements tourbillonnaires qui sont des phénomènes de turbulence ont été transcrits en termes de gènes structuraux induisant des facteurs de croissance orientant le développement, ou si ce sont eux, qui influencent ces gènes comme le suggère Fleury ? On a bien mis en évidence des gènes (gène *Hoxb-5*) qui conditionnent les bifurcations des structures fractales des poumons comme on le verra plus loin. Faisons, par exemple, le point sur la génétique des polarités des Métazoaires.

► Contrôle génétique des symétries et des polarités chez les Métazoaires

La polarité antéro-postérieure chez la mouche est déterminée par des gènes de segmentation à effet maternel (*bicoid* = *Hox3* et *torso* pour la partie antérieure de la tête et du thorax et *nanos*, *pumillo* et *oskar* pour l'arrière). L'ARNm de *bicoid* localisé dans la région antérieure de l'ovule est traduit après la fécondation et la concentration de la protéine *bicoid* enclenche l'activité du gène *hunchback* qui est réprimé par *nanos*. La polarisation de l'ovocyte est liée à celle des microtubules grâce aux kinésines et aux dynéines. *Caudal* est un morphogène postérieur intervenant dans la formation des segments, par des gènes cardinaux *gap* (*hunchback* et *kriippel*), des gènes de parité (*pair-rule* : *fushi-tarazu* et *even-skipped*), des gènes de polarité de segment (*engrailed* et *wingless*) et des gènes de régulation *HOM-C* qui définissent l'identité des segments (*bithorax* et *antennapedia*).

Chez le poulet, l'axe antéro-postérieur est déterminé par la gravité. En effet dans l'utérus de la poule, l'œuf bascule sous l'effet du champ de gravité et l'embryon et son vitellus tendent à prendre une position verticale.

La polarité antéro-postérieure est complétée chez les animaux par un axe dorso-ventral (gène *dorsal* à effet maternel et les gènes *chordin*, *noggin* et *sog*).

La polarité dorso-ventrale est une rupture de la symétrie sphérique radiale qui, chez la grenouille à griffes (*Xenopus*), commence dans l'ovule par la localisation des ARN messagers qui définiront le pôle animal riche en pigments (partie supérieure de l'axe embryonnaire où l'activité mitotique est la plus forte) et le pôle végétal (vitellus ou réserves nutritives). Cet

1. Voir Dubois et Chaline. 2006. *Le Monde des fractales*. Ellipses.

axe des plans animal-végétal à déterminisme maternel détermine les premiers plans de division cellulaires qui définiront souvent le futur *plan de symétrie* de l'organisme.

Avec la fécondation par le spermatozoïde, le pôle animal pigmentaire se contracte formant une zone plus claire dépigmentée à l'opposé du point de fécondation qui marque aussi la future face dorsale. Des microtubules, liés à la protéine cytoplasmique *béta-caténine*¹ qui favorise les liaisons intercellulaires et leurs adhésions font migrer l'enveloppe de l'ovocyte et l'ancien pôle végétal du cortex. Ceux-ci se trouvent décalés du pôle végétal du cytoplasme où va s'accumuler la *béta-caténine* définissant la *future zone dorsale*. Le cortex subit une *rotation de symétrisation* corticale de 30°, événement initiateur de l'acquisition de la *polarité dorso-ventrale* dès le stade *blastula*. Après la *blastula*, se réalise la *gastrulation* avec la formation des trois feuilletts embryonnaires (ectoderme, mésoderme et endoderme) à l'origine des divers tissus de l'embryon. L'axe dorso-ventral est réalisé par des protéines maternelles à effets dorsalisants et ventralisants. Chez la mouche, les mutants *ddp* présentent des anomalies dans la formation des structures de l'ectoderme dorsal, tandis que chez les mutants *sog* les structures de l'ectoderme s'étendent beaucoup plus ventralement. Mais chez les crapauds *Xenopus*, un haut niveau d'expression de *BMP* (homologue de *ddp*) empêche la formation des structures dorsales, tandis que *chordin* est l'antagoniste de cet effet. Cela signifie que *sog* et *chordin* inhibent les signaux issus de *ddp* et de *BMPs* chez la drosophile et *Xenopus*. Chez l'embryon de mouche *ddp* est exprimé dorsalement et *sog* ventralement. Ceci implique aussi que les ancêtres des invertébrés et des vertébrés devaient utiliser un système ancestral *ddp/BMP* pour structurer l'axe dorso-ventral. Et après la séparation des deux groupes, ou au même moment, les signalisations structurelles ont été inversées. L'inversion dorso-ventrale entre les invertébrés et les vertébrés serait donc simplement contrôlée par un couple de gènes antagonistes (*ddp/sog* et *chordin/BMP2-4*), qui s'expriment par des protéines antagonistes.

Enfin, il apparaît une *symétrie bilatérale* chez les Bilatériens, exclusivement externe qui se superpose et se développe perpendiculairement à l'axe de déplacement et lui permet de capter les signaux grâce à des organes spécialisés et de se déplacer ainsi dans toutes les directions du plan.

Chez les mammifères, comme la souris, où l'œuf n'a pas de vitellus, il ne semble pas que des facteurs maternels interviennent et on ignore

1. La *béta-caténine* peut induire des cancers, car elle régule aussi l'expression des gènes à l'intérieur du noyau des cellules.

actuellement comment s'établit l'axe antéro-postérieur qui n'apparaît qu'à la nidation. Le bouton embryonnaire, futur embryon, se développe en sphère creuse jusqu'au stade blastocyste, avec une cavité asymétrique, le blastocœle. Cet axe correspondrait à l'axe dorso-ventral, mais vu le brassage des cellules, on ne peut pas, à ce stade prédire le devenir dorsal ou ventral d'une cellule.

Chez les mammifères, la symétrie est de règle par rapport au plan médian pour de nombreuses structures, les yeux, les oreilles et les membres, mais pas pour toutes. Par exemple le cœur, le foie, l'estomac et la rate sont asymétriques, mais des mutants à asymétrie complète inversée en miroir ne sont pas du tout affectés par cette modification. Les gènes *Pitx2*, *Nodal* et *Sonic hedgehog* (*Ssh*) sont associés à l'asymétrie des organes. Au cours de l'organogenèse, l'identité de position des somites le long de l'axe antéro-postérieur est contrôlée par les gènes de régulation *Hox* répartis en plusieurs ensembles.

La structuration spirale des mollusques, dextre ou senestre, dépend du génome de la mère et est contrainte par des mutations d'une seule paire de gènes intervenant dans le cytoplasme de l'oocyte (Sturtevant, 1923 ; Boycott et al., 1930). C'est le cas des coquilles des escargots (*Limnea peregra*) qui sont généralement dextres, mais présentent des mutants senestres qui se différencient dès la deuxième division de la segmentation.

Autrement dit, les axes antéro-postérieurs, dorso-ventraux et la symétrie bilatérale de certains animaux sont contrôlés par la *gravité* qui a entraîné la sélection de certains déterminants génétiques indispensables.

Les organisations spatio-temporelles des organismes où l'on a vu que la *gravité* pouvait intervenir, notamment chez les oiseaux qui doivent la vaincre durant leur vol, reflètent des *brisures de symétrie* vraisemblablement liées à la *structuration physique du vivant* dans son environnement, mais encore non identifiées.

L'interaction avec l'histoire de la Terre : la contingence

L'histoire mouvementée de la Terre à l'échelle géologique, bien que temporellement peu rapide, impose une nouvelle contrainte externe au vivant et introduit un *hasard événementiel extérieur au vivant, historique* intervenant en plus du *hasard événementiel interne des mutations*, en introduisant une *double contingence dans l'évolution*. Comme l'a écrit Gould¹ : « Une explication historique ne repose pas sur des déductions direc-

1. Dans *La Vie est belle*.

tement tirées des lois de la nature, mais d'une séquence imprévisible d'états antécédents, dans laquelle tout changement majeur à n'importe quel stade altérerait le résultat final. Ce dernier est contingent, en ce sens qu'il est dépendant de tout ce qui s'est produit auparavant — c'est ainsi que l'histoire impose sa marque ineffaçable. »

La vie, apparue sur Terre il y a plus de 3,4 milliards d'années, a pris un essor considérable avec des phases de *diversifications* et d'*expansions* coupées de phases d'*extinctions* majeures qui ont éliminé de nombreux groupes ; c'est la contingence de la vie. L'histoire de la vie a abouti de nos jours à la coexistence de plus de 3 millions d'espèces représentées par un plus ou moins grand nombre d'individus. Selon les espèces, le nombre d'individus peut varier de quelques spécimens pour les espèces en voie de disparition, à plus de 6 milliards 300 millions d'individus pour la seule espèce humaine avec une prévision à plus de 9 milliards d'individus en 2050, et à des milliards de milliards de milliards d'individus pour les bactéries, les virus et les insectes...

2.3

Historique des théories de l'origine de la vie

La génération spontanée actuelle, d'Aristote à Pasteur

L'idée d'Aristote (384-322 av. J.-C.) de *génération spontanée actuelle* du vivant s'est maintenue jusqu'au XIX^e siècle. On pensait que la vie pouvait émerger directement du monde inerte sans avoir d'ascendants. Les traditions populaires faisaient sortir les vers et les grenouilles de la boue et les pucerons des bambous. L'exemple le plus banal était celui de l'apparition d'asticots sur la viande en putréfaction. Le combat des scientifiques contre les partisans de la génération spontanée a duré très longtemps et il a fallu attendre Pasteur pour en faire la démonstration incontournable. Pasteur réalise diverses expériences dans son laboratoire de l'école normale supérieure et le 7 avril 1864 a donné une conférence décisive à la Sorbonne. Pasteur triomphait en démontrant que les micro-organismes sont la cause des fermentations et que leur multiplication résulte de l'introduction de germes préexistants et non d'une génération spontanée. La thèse de la génération spontanée actuelle est enfin officiellement abandonnée : « *La génération spontanée est une chimère*¹ ».

Mais lorsque l'on remonte aux origines de la vie, il est bien évident aujourd'hui, que son *apparition* ne peut être qu'un *phénomène de génération spontanée issue de la sélection naturelle*, mais dans un environnement qui n'a plus rien à voir avec le nôtre actuellement. Nous passerons en revue les différentes théories et hypothèses proposées dans un cadre historique avant de proposer les apports de la relativité d'échelle à ce problème majeur.

1. Pour ceux qui voudraient avoir tout le détail de cette confrontation à propos de la génération spontanée, ils pourront se reporter à mon article « L'énigme de l'apparition de la vie » publié dans le livre *Les Grands Défis technologiques et scientifiques au XXI^e siècle*. Éd. Bourgeois et Grou. Ellipses, Paris, 2007.

Les anciennes théories de l'origine de la vie

Trois groupes de théories ont été proposés pour expliquer les origines de la vie, celle de la *panspermie* ou de l'*origine cosmique de la vie*, objet de la nouvelle discipline de l'*exobiologie* et celles exclusivement terrestres *abiogénétiques chimiques* à partir d'une *soupe chimique originelle* ou de la *géochimie des surfaces minérales*.

De la panspermie à l'exobiologie : l'origine des briques du vivant

En 1865, Hermann Richter estime que la vie n'est peut-être pas originaire de notre planète, mais aurait pu provenir des espaces sidéraux ; c'est la *théorie de la panspermie*, une hypothèse déjà proposée par Anaxagore au V^e siècle avant J.-C. qui croyait que des semences, des germes de vie se trouvaient répandus dans l'univers et prenaient vie, là où les conditions étaient favorables. Richter évoque un ensemencement du vivant à partir des météorites, une *lithopanspermie*. Cette théorie sera reprise par Hermann von Helmholtz (1871) William Thomson (1824-1907), futur Lord Kelvin (1871) et même par Pasteur qui recherchera des microorganismes dans des météorites. C'est Svante Arrhénius (1859-1927) en 1906 qui, dans son livre *L'Évolution des mondes*, donnera le nom de *radio-panspermie* à la théorie défendant l'idée que la vie avait pu être transportée sur Terre à travers l'espace par des germes se déplaçant sous l'effet de la pression de radiation, c'est-à-dire la pression de rayonnement des étoiles, les vents cosmiques.

Dans les espaces interstellaires se trouvent des nuages interstellaires provenant d'explosions de supernovae renfermant plus de 130 molécules variées¹ dont les éléments constitutants ont été assemblés dans le cœur très chaud des étoiles et qui ont pu parvenir sur les planètes, entraînées par les météorites et les vents stellaires.

Cependant en 1910, Paul Becquerel démontra que les éléments vivants les plus résistants dans la nature, comme les spores et les graines, étaient détruites par les rayons ultraviolets, ce qui lui a permis de rejeter la théorie de la panspermie qui a connu alors une forte régression.

Or, bien que sachant que les rayons ultraviolets tuent les bactéries et que les températures des espaces interstellaires soient très basse (à

1. Eau, méthane, monoxyde d'azote, monoxyde de carbone (à 11 milliards d'années lumière), formaldéhyde, cyanure, acide cyanhydrique, acides aminés, sucres (glycolaldehyde ou sucre à 2 carbones pouvant former du ribose), purines et pyrimédines et des acides gras.

-260°), Fred Hoyle (1915-2001) et Nalin Chandra Wickramasinghe (1939-) reprirent cette idée dans les années quatre-vingt en estimant que les germes proviendraient des queues glacées des comètes. Ils expliquaient ainsi également l'apparition de pathologies inédites, devenue la *pathospermie*.

Les sondes lancées dans le système solaire (Giotto, Véga 1 et 2) ont montré qu'il existait effectivement, environ 15 % de carbone, dans les comètes de Haley, de Hale-Boop et de Hyakutake. On attend avec intérêt les analyses de la sonde Rosetta lancée en 2004 vers la comète Churymov-Gerasimenko et qui doit l'atteindre en 2014. On trouva également des substances organiques dans la météorite d'Orgueil en France (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques), 70 acides aminés dont 8 acides aminés qui existent dans notre biosphère, dans une météorite tombée à Murchisson en Australie, sous leur forme racémique montrant autant de formes lévogyres que dextrogyres : glycine, alanine, valine, leucine, isoleucine, proline, les acides aspartique, glutamique, mais aussi adénine, guanine, xanthine, uracile, acétone, urée et éthanol et acides lactique, malique et fumarique.

D'autre part la Terre reçoit environ 50 à 100 tonnes par jour de poussières interplanétaires qui nous apportent environ 500 tonnes de carbone/an. Si l'on sait que les premières phases de l'histoire de la Terre, entre 4,2 et 3,8 milliards d'années, ont été caractérisées par un bombardement météoritique d'une ampleur considérable, au moins mille fois supérieure à l'actuel. l'apport de substances prébiotiques intéressantes semble évident. André Brack estime que la matière carbonée qui fut apportée par les micrométéorites ($2,5 \times 10^{16}$ tonnes) représente environ 25 000 fois celle qui est recyclée de nos jours au sein de la biomasse.

Une expérience de Guy Ourisson et de son équipe a montré qu'en bombardant des cibles de graphite avec de très grandes énergies les atomes constitutifs des briques concernées, on pouvait obtenir effectivement un certain nombre de constituants du vivant.

Une équipe franco-allemande a démontré en irradiant un acide aminé, la leucine, dans un synchrotron du laboratoire de Lure (Orsay), que l'homochiralité pourrait être due à une irradiation dans l'espace qui aurait produit un mélange asymétrique des deux formes au sein d'un mélange symétrique au départ, donc racémique. C'est donc dans l'espace que les acides aminés auraient pu acquérir leur configuration lévogyre ; un argument en faveur de la panspermie.

La théorie cosmique a été étayée plus récemment par Armand Delsemme dans *Les Origines cosmiques de la vie*. En 1996, un amalgame a été proposé entre la panspermie d'Hoyle et la *théorie de Gaia* de James

Lovelock, considérant la Terre comme un être vivant. Francis Crick, l'un des découvreurs de la structure de la molécule d'ADN, Leslie Orgel et Cal Woese ont proposé l'hypothèse d'une *panspermie dirigée*, c'est-à-dire que les germes de vie auraient été envoyés par une civilisation lointaine et seraient arrivés sur terre par des vaisseaux spatiaux. On arrive ici aux spéculations de nombreuses sectes qui relèvent plus de la science-fiction que de la science, à l'exemple de celle de la secte de la scientologie¹.

On admet aujourd'hui qu'une partie des briques du vivant proviendrait de l'espace. Les constituants de la vie auraient leur origine dans notre galaxie. Cela signifie aussi que ces molécules du vivant sont universelles, pourraient avoirensemencé de nombreuses autres planètes potentiellement favorables à l'éclosion de la vie.

La théorie de la *panspermie spatiale* ne fait d'ailleurs que repousser le problème de l'origine de la vie dans des environnements incompatibles avec la vie, puisqu'il n'y a pas d'atmosphère, mais au contraire le vide et des rayonnements destructeurs. Toutes ces recherches font partie de ce que l'on nomme maintenant *l'exobiologie*.

Les théories qui s'opposent à la panspermie sont celles, dites *abiogénétiques*, qui considèrent que les organismes vivants sont apparus à partir de la matière minérale, non vivante, terrestre.

Les premières hypothèses de l'origine chimique de la vie : l'abiogénèse

Malgré les démonstrations de Pasteur réfutant la génération spontanée, de nombreux chercheurs ont essayé de faire apparaître de la matière vivante en laboratoire. C'est le cas de Henry Charlton Bastian (1837-1915) avec des expériences de solutions salines surchauffées dans des vases clos et défendant une théorie de *l'abiogénèse*, c'est-à-dire d'une origine de la vie à partir d'une matière non vivante ; autrement dit d'une origine strictement chimique de la vie. Il en a été de même de Raphaël Dubois et Stéphane Leduc (1853-1936), mais aussi de Thomas Huxley (1825-1895), Ernst Haeckel (1834-1919) et d'Edouard Pflügel (1829-1910).

1. Selon L. Ron Hubbard, écrivain de science-fiction, il y a 75 millions d'années notre univers fut organisé en une confédération galactique de 76 planètes, dirigée par un seigneur tout-puissant galactique appelé Xenu. Ce Xenu aurait expédié sur la Terre dans de nombreux vaisseaux spatiaux, 13,5 trillions (13,5 milliards de milliards) d'habitants. Il les aurait installés dans les volcans où il aurait fait exploser de gigantesques bombes H et aurait ensuite soudé ensemble ces âmes désincarnées, appelées les thétans de corps. Les humains ne seraient donc pas seuls dans leur enveloppe charnelle qui serait composée à la fois d'eux-mêmes, mais aussi de ces milliers d'âmes thétans qui y vivraient en véritables parasites et dont la scientologie « vend » les moyens pour s'en débarrasser...

Ce sont des théories d'une *génération chimique spontanée par étapes* et les hypothèses sont nombreuses. C'est donc un retour à une *génération spontanée initiale, mais désormais chimique de la vie dans des conditions ancestrales très différentes de l'actuel où la sélection naturelle a joué un rôle majeur.*

Les hypothèses d'Oparin-Haldane

Les travaux du biochimiste Alexandre Ivanovich Oparin (1894-1980) sur la chimie du carbone l'ont amené à proposer en 1924, une *théorie de l'origine chimique de la vie* à partir de molécules dans une atmosphère traversée de décharges électriques. Ces molécules présentes dans une *soupe primordiale*, pourraient se combiner entre elles si elles se trouvaient dissoutes dans des coacervats.

Oparin part du principe qu'il y a peu de différences entre l'inanimé et le vivant et estime que le second s'est développé par des propriétés propres à la matière. À l'époque on venait de découvrir que l'atmosphère de Jupiter et des planètes géantes était constituée de méthane et il en déduisit que l'atmosphère primitive de la Terre devait être très différente de sa composition actuelle. L'atmosphère devait être réductrice (dépourvue d'oxygène) et contenir à la fois du méthane, de l'ammoniac, de l'hydrogène et de la vapeur d'eau, le carbone venant principalement du méthane. Il suggérait qu'au début, des substances organiques se formaient dans l'atmosphère en s'arrangeant en structures moléculaires selon leurs constitutions atomiques, en particulier de petites molécules comme le formaldéhyde (HCHO) ou l'acide cyanhydrique (HCN). Mais plus tard ces molécules dissoutes dans le milieu aquatique s'arrangeaient en formes plus complexes en faisant émerger des propriétés nouvelles déterminées par les relations spatiales des molécules. De ce complexe se dégageaient progressivement les processus biologiques où les compétitions, les vitesses de croissance et la sélection naturelle avaient déterminé les formes d'organisation que l'on connaît aujourd'hui.

Pour Oparin, les *coacervats* étaient les structures élémentaires d'où la vie aurait pu émerger dans l'océan primordial. Oparin et l'exobiologiste Sidney W. Fox ont étudié la formation des micro-gouttelettes colloïdales constituées d'agrégats de macromolécules, appelées par Fox, des *protéinoïdes*, qui se compartimentent et sont limitées par des polymères de phospholipides constituant des « membranes » rudimentaires. Ces structures ont été appelées *coacervats* par Oparin et *microsphères* par Fox. Ces agrégats, qui ne sont pas les premières cellules, car formés d'éléments actuels, présentent cependant certaines propriétés des cellules, comme

par exemple l'adsorption de composés organiques, des diffusions de polypeptides à travers la « membrane » et peuvent incorporer diverses molécules y compris des acides nucléiques. C'est un modèle protocellulaire et protomembranaire.

Indépendamment, en Angleterre John Burton S. Haldane (1892-1964) a développé une théorie identique en 1929, celle d'une origine de la vie à partir de molécules organiques qui se seraient formées dans l'atmosphère avant de s'intégrer dans le milieu aquatique où les molécules se seraient complexifiées jusqu'à l'apparition des premières cellules se nourrissant de matière organique (hétérotrophe). Mais ces molécules organiques ne peuvent subsister qu'en milieu réducteur, faible en oxygène. Pour Haldane, la source première du carbone serait donc nécessairement le gaz carbonique.

À cette époque, on ne connaissait pas encore le matériel génétique, ni le métabolisme cellulaire, et il fallait le vérifier expérimentalement. Walther Loeb (Löb) en 1913, en cherchant à identifier les mécanismes d'assimilation de l'azote par les plantes, avait réussi à synthétiser le plus simple des acides aminés, la glycine, en mélangeant du dioxyde de carbone, de l'ammoniac et de la vapeur d'eau soumis à des décharges électriques et aux rayons ultraviolets. La formamide se transforme en acide oxamique qui, réduit, donne de la glycine. Mais ce travail est malheureusement resté méconnu d'Oparin, Haldane, Urey et Miller.

D'autres chimistes se sont intéressés au problème, comme Wilhelm Groth et Hans Eduard Suess (1831-1914) ainsi que des biologistes parmi lesquels nous citerons Alexandre Dauvilliers (1892-1979) et E. Desguins qui ont proposé en 1942 des hypothèses photochimiques comme explication de l'apparition des premiers éléments constitutifs organiques.

L'idée de soupe originelle d'Oparin avait de nombreux adeptes. Horowitz en 1945 avait avancé l'idée que la vie avait dû utiliser au départ une molécule complexe rapidement épuisée, remplacée par une molécule plus simple construite à partir d'un précurseur en présence d'une enzyme donnée, et ainsi de suite jusqu'aux molécules les plus simples utilisées par les bactéries. Autrement dit la filiation des enzymes serait un reflet inversé de la phylogenèse du vivant. Mais Granick en 1957 lui a opposé l'idée inverse des enzymes évoluant des plus simples vers les plus complexes par spécialisation progressive, depuis les enzymes les plus généralistes aux plus spécifiques. Cette hypothèse a été confirmée par la génétique moléculaire grâce aux travaux de B.P. Nichols dans les années quatre-vingt.

En 1951, Melvin Calvin (1911-1997) a réussi à obtenir du formaldéhyde en exposant du gaz carbonique en solution à un rayonnement, mais il manquait une approche plus directe et précise des origines de la vie, c'est le travail réalisé par Miller.

Miller et la reconstitution des conditions de l'origine de la vie

Harold Clayton Urey (1893-1981), prix Nobel de chimie en 1934 pour la découverte du deutérium utilisé pour former l'eau lourde, s'est intéressé à un très grand nombre de problèmes biochimiques. Il avait imaginé qu'une atmosphère primitive, dont on suppose la constitution sans oxygène, où le carbone était apporté essentiellement par le méthane (CH_4), avec de l'ammoniac (NH_3) et du gaz carbonique (CO_2), comme le concevaient Oparin et Calvin, dans laquelle on ferait éclater des étincelles « devrait » en principe produire des acides aminés qui constituent les éléments de base des protéines et sans doute d'autres molécules...

L'expérience de Miller

Stanley Loyd Miller, étudiant dans le laboratoire d'Urey, à la suite d'une conférence de son maître décide de faire l'expérience suggérée. Le scénario imaginé par Stanley Miller et son équipe à l'université de Californie en 1953 consistait à faire éclater des décharges électriques fortes dans l'*atmosphère primitive* imaginée par Oparin, Haldane et Urey. Celle-ci était dépourvue d'oxygène, mais contenait beaucoup de molécules élémentaires comme le gaz carbonique, le méthane, l'ammoniac et la vapeur d'eau, et donnait naissance à de nombreux acides aminés, constituants primaires des protéines et d'autres molécules. Le 15 mai 1953, il a publié un travail dans la revue *Science* : *A Production of Amino Acids under possible Earth Conditions* où il décrivait cette expérience qui a fait date. Quelles sont les conclusions de cette étude : certaines molécules « *d'intérêt biologique* » ont pu effectivement se constituer à partir des molécules minérales. D'autres expériences ont été tentées dans d'autres laboratoires en faisant varier la composition de l'atmosphère primordiale, mais c'est toujours la présence de méthane, de monoxyde de carbone (CO) ou de dioxyde de carbone (CO_2), mélangés à l'hydrogène qui produisent le plus d'acides aminés. Antoine Jérôme Boulay

(1802-1876), en 1830, avait déjà observé que l'acide cyanhydrique (HCN) pouvait se transformer en une masse noirâtre dont on sait aujourd'hui qu'il s'agit de polymères de la molécule¹.

Les faiblesses de l'expérience de Miller

Le bilan actuel de ces recherches n'est absolument pas satisfaisant. En effet si l'on arrive à produire une dizaine des vingt acides aminés constituant les protéines actuelles, dont l'alanine et la glycine en abondance, il manque surtout dans la synthèse des éléments absolument indispensables, en particulier les trois acides aminés : l'arginine, la lysine et l'histidine. Par contre, on obtient également une centaine d'autres acides aminés qui n'existent pas dans la biosphère terrestre, dont certains se comporteraient même comme des poisons pour le vivant. En effet, des molécules voisines des composés du vivant risquent de les remplacer dans les réactions biochimiques et de bloquer ainsi ces réactions, ou d'en provoquer d'autres sans intérêt biologique. Il manque aussi les acides gras ou lipides qui interviennent dans la formation des membranes et les co-enzymes² responsables du métabolisme grâce à leurs propriétés autocatalytiques. En outre les glucides ne sont pas produits en quantité suffisante, notamment le ribose. Mais surtout les nucléotides, qui renferment des bases pyrimidiques indispensables pour former les acides nucléiques, n'ont jamais pu être synthétisés. *La conclusion est sans appel : cette approche n'explique pas complètement l'origine spontanée de la vie ; elle est trop incomplète.*

L'autoréplication du monde des ARN

L'un des grands problèmes est celui du passage des monomères (nucléotides) aux polymères (acides nucléiques) sans l'intermédiaire des catalyseurs naturels que sont les enzymes. Leslie Eleazer Orgel (1927-) a montré que cette réaction était possible si une amorce de brin d'acide nucléique était présente, ce qui complique le scénario. Enfin la polymérisation des acides nucléiques et des protéines implique l'élimination d'une molécule d'eau, ce qui est paradoxal en milieu aquatique.

-
1. Les tétramères de cet acide en solution avec de l'ammoniac peuvent conduire à des dérivés cycliques, avec par exemple une cinquième molécule d'acide cyanhydrique qui constitue l'adénine, l'une des deux bases puriques essentielles dans la formation de l'ADN.
 2. Les enzymes sont formés en deux parties, une apoenzyme protéique codé par les gènes et une petite molécule organique, la *coenzyme*, non protéique, mais essentielle pour la catalyse et souvent dérivée de vitamines.

Joan Oro (1923-2004), un spécialiste de la contribution cométaire à la chimie prébiotique, aurait obtenu de l'adénine et de la guanine à partir du cyanure d'ammonium. Des travaux récents du laboratoire de Miller se sont consacrés à la production de *pantetheine* intermédiaire dans la formation du *coenzyme A* essentiel pour la formation de protéines¹. L'un des problèmes majeurs apparus avec la compréhension de la biologie moléculaire est la nécessité de partir d'une molécule qui soit autocatalytique, c'est-à-dire capable d'une réaction chimique qui est catalysée par l'un des produits de la réaction. En effet, l'ADN pour se répliquer et exprimer l'information génétique a besoin de protéines enzymatiques, mais ces protéines enzymatiques ne sont codées que par l'ADN ! C'est un véritable paradoxe de constater que l'ADN pour s'exprimer a besoin de protéines placées sous sa dépendance. Il faut également que la molécule se réplique et pour faire évoluer le système, qu'elle soit capable, au moment de la réplication d'intégrer des erreurs modifiant ce système.

La découverte en 1983, par Sydney Altman (1947-) et Thomas R. Cech (1939-) des ribozymes, des ARN autocatalytiques, chez le microorganisme *Tetrahymena thermophila* a ouvert des possibilités pour élucider ce problème. Ces ARN, qui « *seraient* » apparus les premiers, ont donc une double fonction, celle de porter de l'information et de s'autorépliquer en possédant une activité enzymatique. Cette découverte² suggère, qu'à l'origine, les ARN auraient pu précéder l'ADN, car plus stables chimiquement que ces derniers, une idée déjà évoquée par Alexander Rich en 1962, Carl Woese en 1967, Walter Gilbert en 1986 qui avait envisagé un « *monde des ARN* » et Thomas H. Jukes (1906-1999) qui avait travaillé sur le code génétique primitif.

Une autre approche, celle de Manfred Eigen, voudrait que les protéines soient apparues les premières. Freeman Dyson suggère que la vie « *aurait* » une double origine, d'une part les *protéines pour le métabolisme* et d'autre part un *mécanisme de réplication pour les nucléotides*.

Quant à Jeffrey L. Bada, il retient, contre toutes les données connues, l'idée d'une soupe glacée où la vie précellulaire aurait débuté ; une hypothèse peu probable.

Tous ces résultats montrent qu'aujourd'hui la *chimie prébiotique* avec une *soupe originelle* ou un *bouillon de molécules organiques*, n'a pas encore permis de résoudre le problème de l'origine de la vie.

1. Cet élément a été synthétisé en chauffant à 40° du pantoyl lactone, de la bêta-alanine et de la cystéamine supposés présents dans les mares primordiales.

2. Tous deux ont obtenu le prix Nobel de chimie en 1989 pour cette grande découverte.

D'autres théories ont proposé une approche fondée sur la chimie de surface des solides, en particulier de celle des argiles, que nous allons examiner maintenant.

Les théories de l'origine métabolique minérale de la vie

Dans son livre sur *L'Origine de la vie* parue en 1967, John Desmond Bernal (1901-1971) suggère d'utiliser les propriétés autocatalytiques des surfaces minérales, notamment des argiles, dans la formation de la matière organique.

► Les argiles et la théorie de la relève génétique de Cairns-Smith

Dans son livre *Seven Clues to the Origins of Life* paru en 1985, Alexander Graham Cairns-Smith (1931-) a tout d'abord montré qu'une *soupe prébiotique* serait si riche en molécules variées, chimiquement proches, qu'elles deviendraient finalement des poisons pour la vie naissante. Puis, reprenant les idées de Bernal selon laquelle le fond argileux des océans aurait pu jouer un rôle de catalyseur et de support de polymérisation, il a développé une théorie selon laquelle une simple étape intermédiaire séparerait la matière inanimée de la vie organique qui consisterait en l'autoréplication de cristaux d'argile en solution. Les argiles, comme la plupart des minéraux cristallins, ont en effet la propriété de pouvoir se multiplier. C'est sa *théorie de la relève génétique* (*genetic takeover*) qui serait l'une des phases majeures d'initiation de la vie.

Selon Cairns-Smith, les argiles qui se forment spontanément à partir de silicates en solution auraient joué le rôle de catalyseur pour former les premières molécules organiques. Ces minéraux ont en effet tendance à perdre des électrons et cet emplacement peut servir d'amarrage aux molécules organiques. La surface des silicates pourrait alors piéger des molécules à leurs surfaces selon un processus de sélection, notamment les molécules qui pourraient entraîner l'autoréplication, ce qui aurait pour effet de multiplier également les molécules absorbées. A. Weiss avait montré que pendant la croissance des cristaux de smectite (une argile montmorillonite), l'information condensée dans les feuillets en densité de charges électriques était transmise aux feuillets dérivés. C'est-à-dire que les cristaux argileux seraient capables de changer de forme en fonction de leur environnement par des multiplications. Des molécules proto-organiques seraient ainsi catalysées à la surface de ces silicates soumis à des alternances de phases humides et sèches. C'est l'exemple du mélange glycine-kaolinite qui, soumis à des phases de

déshydratation et de température, produit des pentamères de la glycine, alors que sans argile, il ne se produit que des traces de diglycine. Cela signifie que les argiles sont capables de catalyser la formation de chaînes peptidiques d'au moins cinq acides aminés. À un certain moment, ces molécules se détacheraient de leur support argileux, ce qui serait la première *exaptation*¹ du vivant, celle de molécules organiques ayant acquis la possibilité de se dupliquer. Les argiles joueraient alors le rôle de catalyseur (accélérateur de réaction chimique), d'enzymes minérales ancestrales pour former les molécules organiques. Selon cette théorie, un matériel initial de réplication de nature géochimique aurait été remplacé par un matériel organique, celui des *gènes*. Les cristaux d'argiles dupliqués seraient alors remplacés par les bases de l'ARN et de l'ADN ou d'un autre intermédiaire.

Pour André Brack, des molécules carbonées simples, un milieu réducteur et une source d'énergie seraient des conditions suffisantes pour que l'on obtienne spontanément des acides aminés qui, ensuite, s'agenceront pour former des protéines.

Les recherches sont très actives dans ce domaine où l'on essaie de constituer des molécules simples autorépliquatives. On peut remplacer, par exemple le sucre ribose par un composé acyclique de la glycérine (glycérol), l'érythrol (ou érythrite obtenu par la décomposition de l'érythrine de certains lichens) ou encore par l'acroléine, pour fabriquer des chaînes simples répliquatives. Les travaux de Christof Böhler, Peter E. Nilsen et Leslie E. Orgel en 1995 ont abouti à la formation d'un analogue d'acide nucléique (ARN ou ADN) appelé *Peptide-Nucleic-Acid* (PNA), constitué d'unités de (2-aminoethyl) glycine servant de squelette peptidique, ou polyamidique, sur lequel les bases des acides nucléiques peuvent se fixer. Ces analogues auraient la propriété d'appariement avec des oligodésoxyribonucléotides. Cela indique que les différences de structures entre les acides nucléiques et les protéines ne seraient pas incompatibles. Dans la recherche des précurseurs de la synthèse des protéines, Albert Eschenmoser (1952-) a testé un modèle d'*oligopeptide de pyranosil-RNA* (p-RNA), où le sucre est remplacé par le pyranose, qui a la propriété essentielle de l'appariement pour assembler des chaînes de polypeptides et n'a pas l'inconvénient de s'enrouler en spirale qui implique l'existence d'enzymes, absents aux tous débuts de la vie. Ce processus qui requiert

1. S. J. Gould et E. Vrba ont montré que le terme d'adaptation recouvrait des phénomènes très différents. En créant le terme nouveau, d'exaptation, ils voulaient dire qu'un caractère possédant une fonction particulière chez des formes ancestrales, a pu être utilisé ultérieurement, chez les formes descendantes, pour effectuer une autre fonction.

deux transferts inter-nucléotides et un transfert intra-nucléotide a été testé avec succès dans ses deux premières contraintes. À suivre...

► La théorie de Günter Wächtershäuser et les pyrites

La théorie de Günter Wächtershäuser, qui complète celle de Cairns-Smith, attache également beaucoup d'importance au métabolisme se réalisant à la surface des particules solides et à leurs propriétés autocatalytiques, seule possibilité selon lui, de permettre l'apparition de la vie si le milieu est réducteur. Pour cet auteur, les sulfures de fer (pyrites), pourraient constituer un milieu préférentiel d'origine de la vie aux voisinages des sources hydrothermales où le soufre sous forme d'hydrogène sulfuré jouerait également un rôle majeur comme intermédiaire dans les réactions d'oxydo-réduction de l'oxyde de carbone sur le sulfure de fer. Des particules organiques de petite taille se fixeraient sur des fragments de pyrite à charge électrique positive, et dans un bain de sulfure d'hydrogène, elles pourraient alors fixer du dioxyde de carbone pour agrandir la chaîne carbonée. De Duve a également retenu ce scénario où le soufre joue un grand rôle dans les liaisons chimiques, notamment dans le *groupement thiol* et les *thioesters* formés d'une chaîne carbone — soufre — hydrogène. Les thioesters rendent compte de la génération d'une petite partie d'ATP¹ grâce aux couplages qu'ils permettent entre les oxydations d'aldéhyde et d'acide α -cétonique et l'assemblage d'ATP. Mais ils sont surtout associés au métabolisme où ils interviennent dans les voies glycolytiques et le cycle de Krebs².

Granick estimait, dans ses spéculations sur l'origine de la photosynthèse, qu'elle devait se produire également dans des processus de chimie de surface de solides impliquant le soufre au cours des réactions d'oxydoréduction indispensables.

Un autre intermédiaire minéral, celui des *zéolithes*³, a été proposé par Joseph V. Smith en 1998. Ces zéolithes sont des aluminosilicates hydratés de métaux alcalins et alcalino-terreux qui se présentent sous des formes cristallisées très poreuses (stibine, chabasite, natrolite, analcime) qui leur permettent de piéger et fixer à leurs surfaces dans les pores, par adsorption, des molécules variées et de filtrer les molécules dont le diamètre est supérieur à celui des pores. Ce sont donc des auxiliaires de

1. ATP ou Adénosine TriPhosphate.

2. Il s'agit d'un cycle de l'acide citrique qui produit un certain nombre d'intermédiaires dans la fabrication de l'ATP au sein de la chaîne respiratoire. Il contribue aussi à la dégradation de différents métabolites.

3. Du grec *zéo*, « bouillir » et *lithos*, « pierre » : « les pierres qui fondent et bouillent », des roches qui perdent de l'eau sous forme de vapeur quand on les chauffe.

la catalyse et ils ont pu jouer un rôle dans les premières structurations. Il existe environ 50 zéolithes naturelles, mais 600 zéolithes artificielles très utilisées dans le milieu industriel. Selon Smith, ces zéolithes provenant de cendres volcaniques, auraient pu filtrer les éléments de la soupe primordiale et les catalyser en polymères en forme de spaghettis comme structures de base des protocellules.

La théorie de Wächtershäuser a été complétée par le scénario de William Martin et Michael Russell en 2002 qui considère que les « *fumeurs noirs* » des fonds océaniques, orifices où l'eau chaude associée à de nombreux minéraux sort des fissures volcaniques, « pourraient » être l'un des lieux privilégiés où la vie aurait pu apparaître. De fait, dans l'océan dépourvu d'oxygène, ces environnements où se rencontre une très grande variété chimique représentent des endroits privilégiés d'origine potentielle. Et aujourd'hui les plongées dans ces environnements profonds y ont révélé une vie exubérante imprévue.

Le scénario des transformations homéotopiques de Danchin

Antoine Danchin retient le modèle du métabolisme de surface minérale où les charges électriques des éléments de surface peuvent permettre une véritable sélection naturelle des charges opposées. Danchin voit une confirmation de cette hypothèse dans le fait que le métabolisme met en jeu des molécules électriquement chargées riches en carboxylates et en phosphates et des coenzymes également chargés électriquement, bien que la charge n'intervienne pas dans la fonction catalytique.

Pour Danchin, il faut considérer l'existence de réactions chimiques voisines sur les particules solides, des variations sur un thème donné avec des radicaux chimiques différents, ce qu'il a appelé les *transformations homéotopiques*. Cette idée a été confirmée par le séquençage des génomes où l'on constate par exemple que des acides aminés comme la cystéine (*UGC* et *UGU*) et le tryptophane (*UGA*) pourraient être considérées comme la conséquence d'une transformation homéotopique de la serine et par l'existence d'un vingt et unième acide aminé, la sélénocystéine (*UGA*). Tous ces acides aminés semblent constituer une famille de transformations homéotopiques où les ARN de transfert auraient remplacé les surfaces et seraient en quelque sorte les « *substituts de ces surfaces* ». Il en veut pour autre preuve les fonctions où apparaissent les ARN de transfert, comme la synthèse de l'hème de l'hémoglobine¹

1. Il lui donne sa couleur rouge.

ou de la chlorophylle qui donne la couleur verte aux plantes. Un autre exemple de support est fourni par les ARN de transfert qui permettent la synthèse des peptides, ce qui suggère que la synthèse des peptides aurait pu précéder la traduction des ARN messagers. Danchin en déduit habilement que « *le code génétique pourrait être alors la conséquence accidentelle de la catalyse par homéotopie de la liaison peptidique* ».

Cette approche implique de comprendre comment ont pu se faire les nucléotides, les précurseurs des ARN. On revient à ce point essentiel de l'existence des nucléotides. Ces molécules impliquent l'existence d'acides aminés précurseurs. Il existe effectivement, un coenzyme, le *4-phospho-pantetheine*, qui peut transporter des acides aminés sur des supports soufrés pour former des liaisons thioesters, déjà évoquées par de Duve. Ce composé a la propriété de favoriser la synthèse de peptides qui semblent jouer un rôle important dans la synthèse des lipides, les constituants indispensables des membranes. Danchin envisage aussi la formation des nucléotides par une réaction inverse d'un processus autocatalytique utilisant la ptéridine-phosphate pour assurer la fixation de l'azote. Ce sont là, de nouvelles pistes à approfondir. À suivre...

James G. Ferry et Christopher H. House ont proposé récemment une hypothèse alternative combinant les aspects majeurs des deux théories. Cette approche est fondée sur les observations faites sur le génome de *Methanosarcina acetivorans* et suggérant que la conservation de l'énergie était une voie qui aurait pu diriger l'évolution cellulaire primordiale.

► Bilan de la soupe primordiale et de l'exobiologie

Si l'on tente un bilan de ces deux grandes approches de la soupe primordiale et de l'exobiologie, force est de constater que l'émergence de la vie précellulaire et sa transformation en une cellule bactérienne la plus simple possible n'est pas résolue et qu'aucun consensus n'a été reconnu. Le code génétique ne codant que pour les protéines, il faut découvrir d'où viennent les précurseurs des acides nucléiques, les nucléotides. La formation des membranes reste une autre énigme à résoudre.

Les pistes retenues jusqu'ici seraient-elles mal orientées ? inadaptées ? trop actualistes ? D'autres phénomènes entrent nécessairement en jeu. Lesquels ? Une autre approche inexplorée serait-elle possible ? Et si les lois de la physique intervenaient par une contribution structurante ? *Ce sont les nouvelles perspectives offertes par la théorie de la relativité d'échelle.*

2.4

L'apport de la théorie de la relativité d'échelle : une structuration physico-chimique spontanée de la vie sur Terre, comme conséquence des diverses contraintes de l'espace-temps ?

La vie est constituée par des molécules groupant des assemblages souvent complexes de particules, d'atomes possédant eux-mêmes des électrons qui suivent les lois de la physique quantique. Ces agglomérats de molécules constituent à plus grande échelle les gènes alignés sur des chromosomes. Les mutations variées entraînent des modifications du développement des organes constituant les organismes. Cette organisation du vivant correspond à une *hiérarchie de structuration du vivant*.

Ce qui est étonnant, c'est le fait que les éléments constitutifs les plus petits, les atomes, suivent les lois de la physique quantique, alors que les organismes finis, macroscopiques, suivent en partie les lois de la physique classique. Il y a là un semblant de contradiction, car le quantique ne semble pas pouvoir intervenir aux échelles du vivant, qui sont beaucoup trop grandes. Tout tient donc dans la conception que les spécialistes ont des limites du passage du quantique au classique. Ceci expliquerait peut-être en grande partie pourquoi la question de l'origine de la vie n'a pu être résolue jusqu'ici. Examinons les approches qui font référence au domaine quantique.

Première approche quantique sommaire...

On doit à Erwin Rudolf Joseph Alexander Schrödinger (1887-1961), en 1944, un livre merveilleux d'intuition et de perspicacité, intitulé *Qu'est-ce que la vie ?* Il y a expliqué que la vie ne peut exister que sous forme macroscopique et que, sans la mécanique quantique, il n'y aurait pas de vie. Dans ce livre, il aborde les problèmes de l'hérédité, des muta-

tions génétiques, de l'existence d'un « *cristal aperiodique* » qui ne sera découvert qu'en 1950 (l'ADN) et en conséquence de celle, nécessaire, d'un « *code génétique* » (également inconnu à son époque), qui serait parallèle au code morse. Il consacre également un chapitre au problème fondamental de l'entropie et du vivant... Un livre qui a beaucoup influencé les chercheurs.

Cet aspect quantique de l'évolution a ultérieurement été évoqué par Cairns-Smith et Johnjoe McFadden (1956-). En reprenant les idées de Schrödinger, ces auteurs envisagent la possibilité que les mutations « puissent » se faire au niveau quantique. On sait que la dynamique des électrons, des protons et des autres particules fondamentales est placée dans le cadre d'une physique particulière, celle de la mécanique quantique. Et contrairement à ce que l'on pensait, ce ne seraient pas uniquement les très petites particules qui pourraient lui être soumises, mais aussi des ensembles plus considérables comme les molécules de fullerène formées de 60 atomes de carbone. Comme ces molécules ont un diamètre identique à celui de l'ADN, ces chercheurs ont proposé l'hypothèse selon laquelle l'ADN, et donc dans le prolongement le code génétique lui-même, pourrait avoir un « *comportement quantique* ». C'est-à-dire que les mutations ne se feraient pas uniquement selon un pur hasard, mais seraient contraintes, facilitées par les organismes, quand les cellules supportent des stress qui augmentent le taux de mutation pour se maintenir, comme l'auraient montré Hugues John Cairns¹ (1922-), Julie Overbaugh et Stanley Miller en 1988. Pour ces auteurs, *l'évolution quantique* serait une *force* qui compléterait la *sélection naturelle*. Ces idées n'ont pas eu grand succès, en partie à cause du manque de justification et de développement théorique d'une telle application potentielle de la mécanique quantique au vivant et d'arguments précis décisifs relatifs au vivant.

Cette question peut être, maintenant, reposée de manière différente, dans le cadre de la nouvelle *théorie de la relativité d'échelle* de Nottale décrite en première et quatrième parties. En effet, celle-ci parvient à la conclusion de la *possibilité d'une nouvelle mécanique macroscopique de type quantique qui ne reposerait plus sur la constante microscopique de la mécanique quantique standard (celle des atomes et des particules élémentaires), la constante de Planck $\hbar$, mais sur des constantes macroscopiques propres aux systèmes considérés.*

1. Celui qui le premier a démontré en 1963 la structure du génome d'*Escherichia coli* en une seule molécule d'ADN et sa réplication.

L'application de la théorie de la relativité d'échelle au problème de l'origine de la vie et de son évolution

Dans son exposé de la *relativité d'échelle* (première partie), nous avons vu que Nottale a été amené à introduire à côté de l'*espace-temps standard*, désormais classique d'Einstein, un *espace des échelles* qui est l'*espace des résolutions* et de leurs transformations, c'est-à-dire l'*espace des zooms* et des transformations entre les diverses échelles. La structuration en échelles des objets fractals se déploie dans cet espace. Les structures observées sont considérées comme des solutions d'*équations différentielles d'échelle* agissant dans cet *espace des échelles*. Nottale a pu alors décrire une *physique de l'espace des échelles* qui a des versions de plus en plus complexes, depuis la physique classique, « galiléenne », « newtonienne » (en analogie avec la physique correspondante du mouvement), jusqu'à une *description quantique*. L'*espace des échelles* est donc l'espace où se déploient les structures internes de ce qui correspondait à des *points* dans l'*espace-temps standard* et qui n'étaient donc pas structurés dans les théories précédentes de la relativité restreinte et générale.

Les effets de type quantique de la relativité d'échelle dans l'espace standard

Nottale a montré que dans cette nouvelle approche très générale, la *dynamique classique* se transformait en une dynamique nouvelle ayant un *caractère quasi-quantique* naturellement et spontanément capable de *morphogenèse*. On entend par là une description en termes de *densité de probabilité* qui est donnée par le carré du module d'une « *fonction d'onde* », elle-même solution d'équations du *type Schrödinger* ou *Schrödinger non-linéaire*. Mais cette *mécanique macroquantique* n'inclut pas d'autres propriétés spécifiques du domaine quantique standard (qui sont en fait souvent liées à l'éléментарité), tels l'indiscernabilité de particules identiques ou le *paradoxe EPR*¹.

C'est ainsi que l'on s'attend, dans ce cadre, à voir apparaître des morphologies comme les matérialisations des zones de plus hautes probabilités. C'est-à-dire que l'on aborde ici une théorie très générale de l'auto-organisation, en particulier au niveau de la morphogenèse et de l'évolution morphologique.

1. Voir le formalisme mathématique de la théorie de la relativité d'échelle (quatrième partie).

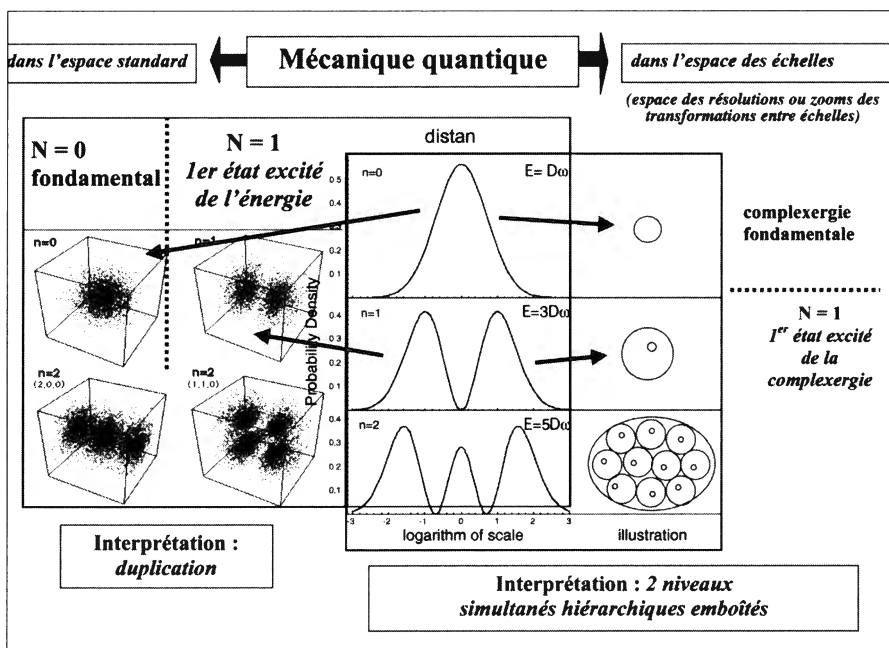


Figure 2.6. Les effets de la relativité d'échelle dans l'espace standard et l'espace des échelles.

Duplication (à gauche) et structures hiérarchisées (à droite) dans l'espace standard et des échelles. Représentation (en densité de points) des solutions de « l'équation de Schrödinger » pour le potentiel de l'oscillateur harmonique tridimensionnel isotrope agissant dans l'espace standard. Pour obtenir cette figure, on a jeté des particules au hasard dans la densité de probabilité donnée par le carré du module de l'amplitude de probabilité y . On voit que les particules s'organisent naturellement en amas et en ensembles d'amas. Quand l'énergie augmente d'un facteur $5/3$, le système fondamental unique n'augmente pas de taille, mais se divise en deux sous-systèmes et un système double apparaît ; c'est une duplication spontanée. L'augmentation d'énergie ne permettra pas l'apparition d'une nouvelle structure avant qu'elle n'ait atteint son niveau de quantification suivant ($N = 0$ est l'énergie fondamentale et $N = 1$ est le premier état excité de l'énergie). À droite, l'approche quantique dans l'espace des échelles montre les solutions de « l'équation de Schrödinger » où la complexergie passant de la complexergie fondamentale ($N = 0$) à $N = 1$, le premier état excité de la complexergie, fait apparaître deux niveaux simultanés hiérarchiquement emboîtés (d'après Nottale, 2002).

Une application de cette nouvelle *mécanique quantique macroscopique* déduite de la relativité d'échelle concerne les effets d'une *augmentation d'énergie du système dans l'espace standard*. Elle ne se traduit pas, comme on pourrait s'y attendre d'un système classique, par une augmentation de taille du système, mais par un *changement de structure* se réalisant par un *saut*. L'augmentation d'énergie ne permet pas l'apparition d'une nouvelle structure avant qu'elle n'ait atteint son niveau de quantification naturel suivant, un seuil défini (voir fig. 1.2. et 2.6). Par exemple, dans le

cas d'un potentiel d'oscillateur harmonique tridimensionnel isotrope, quand l'énergie augmente d'un facteur $5/3$ (en passant du niveau fondamental qui correspond à $3/2$ du quantum d'énergie au premier niveau excité qui vaut $5/2$ de ce quantum), le système fondamental unique se divise en deux sous-systèmes et un système double apparaît. *C'est une duplication spontanée.*

Des applications au vivant sont *potentiellement possibles* sous une forme nouvelle, qui prend en compte le fait que ce sont des systèmes hors équilibre, et pourrait peut-être être significatives pour certaines duplications dans le vivant, comme celle de *la duplication de certaines molécules, en particulier des acides aminés (ARN et ADN), ainsi que la division cellulaire ou certains autres types de duplications*. Il ne s'agit pas bien sûr d'« expliquer » ces duplications de systèmes biologiques, qui dépendent aussi de nombreux paramètres d'essence biologique, mais de suggérer l'existence d'un lien profond entre duplication et énergie quantifiée. Nous y reviendrons plus loin à propos de la cellule.

Les effets quasi quantiques de la relativité d'échelle dans l'espace des échelles

Dans l'espace des échelles, on peut passer d'une description classique déterministe à une description de type quantique à l'aide d'une équation de Schrödinger agissant maintenant dans cet espace, permettant de rendre compte de manière probabiliste d'une *organisation hiérarchique*. En ce qui concerne l'espace des échelles, la discrétisation des structures possibles, qui décrit une organisation hiérarchique, exprime les sauts d'une nouvelle quantité dite conservative, que Nottale a dénommé la *complexergie* n'est pas une énergie, mais l'équivalent pour les échelles de ce qu'est l'énergie pour le mouvement. Des résultats très surprenants sont alors possibles.

Il faut bien distinguer les effets *quantiques macroscopiques déjà connus* (tels la supraconductivité), au sens de la *mécanique quantique standard* fondée sur la *constante microscopique universelle de Planck*, de la proposition d'une nouvelle sorte d'*effets quasi-quantique macroscopique* déduits de la relativité d'échelle et fondés sur une *constante d'auto-organisation* qui est propre au système considéré et n'a plus de raison d'être microscopique. Cette nouvelle *mécanique macroquantique dans l'espace des échelles* pourrait vraisemblablement s'appliquer au vivant de la façon suivante : *La vie et ses premières structures* pourraient n'être qu'une conséquence des *diverses solutions* de l'équation généralisée de Schrödinger agissant dans l'espace ordinaire et

dans l'espace des échelles et correspondant à un nombre croissant de niveaux hiérarchiques imbriqués respectivement et successivement, les coacervats, les procaryotes, les eucaryotes avec l'apparition de la membrane nucléaire et enfin les pluricellulaires.

Le rôle structurant de la relativité d'échelle ne s'arrêterait pas là, mais interviendrait ensuite plutôt dans l'espace standard en de nombreuses occasions, lors de la mécanique propre de la réplication de l'ADN avec ses erreurs, les mutations qui, par le biais de la sélection naturelle, « optimiserait » le vivant dans son créneau environnemental contemporain. La répartition des codons codant les acides aminés que nous avons examinée plus haut, pourrait résulter de ce même phénomène.

Première étape du scénario relativiste d'échelle de l'apparition de la vie

L'apparition de la vie pourrait être le résultat d'une structuration physique macroquantique spontanée, s'étant effectuée à une période déterminée de l'histoire de la Terre, vers 3,8 milliards d'années, lorsque les paramètres énergétiques du système inorganique sont entrés dans les zones de probabilité permettant la structuration spontanée du système. Au niveau $n = 0$ de *complexergie fondamentale* (état du « vide », *vacuum* en anglais¹), le système aurait fait apparaître spontanément des cloisonnements, d'emblée pas forcément vivants. C'est au sein de la vaste variabilité de ces cloisonnements et essentiellement en fonction du contenu de leurs inclusions moléculaires, que la vie proprement dite a pu apparaître. Certaines molécules autorépliquatives et autocatalytiques (ARN et ADN) pourraient tenir cette capacité des effets macroquantiques de duplication de la relativité d'échelle dans l'espace standard.

Deuxième étape du scénario relativiste d'échelle de l'apparition de la vie

La combinaison des effets quantiques dans l'espace des échelles et dans l'espace standard permet d'associer la structuration hiérarchique du vivant à celle des processus de duplication, indispensables pour la reproduction du vivant. On peut se demander si l'auto-organisation spontanée des lipides en globules (micelles) n'est pas l'expression macroscopique de l'équation de Schrödinger généralisée dans l'espace des échelles.

1. De *vacuus*= vide ; état de ce qui est vide ou fait d'être vide.

L'état du système vivant unicloisonné procaryote, de type bactérien, a duré longtemps, depuis environ -3,8 milliards d'années jusqu'à l'apparition des eucaryotes, vers -1,5 à -1,4 milliard d'années. Ce passage majeur s'est réalisé (fig. 2.6) par un saut depuis l'état fondamental de complexergie ($n = 0$) à un premier état excité de cette complexergie ($n = 1$). Ce saut structural s'est traduit aussi par l'apparition d'une membrane nucléaire autour du noyau, désormais lui aussi cloisonné ; c'est un cloisonnement emboîté. Notons que c'est à ce moment-là qu'apparaissent aussi dans les cellules les mitochondries et les chloroplastes, qui sont respectivement les usines à énergie des cellules animales et végétales également cloisonnées. *Serait-ce ce nouvel apport d'énergie à la cellule qui, décisif, aurait permis ce saut quantitatif et l'apparition des eucaryotes ? Ce cloisonnement, dans un cloisonnement, correspond à une invariance d'échelle, à une structuration fractale.* Notons que le passage des procaryotes aux eucaryotes se traduit par une augmentation de taille des cellules de $1\ \mu\text{m}$ à $10\ \mu\text{m}$, donc d'un facteur 10.

Plus tard encore, le système Vie est passé à un nouvel état excité de la complexergie ($n = 2$) qui a permis l'apparition d'une nouvelle structuration fractale du vivant, celle des organismes pluricellulaires, qui s'est réalisée un peu avant -1 milliard d'années. *Serait-ce la mise en commun des énergies cellulaires, coordonnées par la division du travail selon chaque type de cellules, qui aurait facilité cette structuration en régulant et en accroissant la complexergie ?*

Avec ces trois niveaux de complexergie, le vivant avait achevé, il y a environ -1 milliard d'années, sa structuration générale emboîtée en procaryotes, eucaryotes et pluricellulaires. La suite de l'évolution s'est réalisée par une diversification au sein de chacun de ces types structuraux de base.

La répartition actuelle des tailles du vivant est, comme nous l'avons vu plus haut, fréquente entre 0 et $100\ \mu\text{m}$, rare entre $100\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$ et de nouveau fréquente entre $1\ \text{mm}$ et $100\ \text{m}$). Cette répartition pourrait résulter de l'existence de ces pics de probabilités exprimant les niveaux successifs d'énergie et de complexergie. Chez les pluricellulaires, les tailles varient de 10^{-3} à 10^2 , ce qui correspond à une augmentation pouvant aller de 1 à 100 000, ce qui est énorme, hyper exponentiel...

La répartition des dates d'apparition de ces trois structures majeures trouve également un sens dans le cadre la théorie de la relativité d'échelle. *Les effets induits par les structures dans l'espace-temps standard permettent de construire en effet des lois d'échelle de complexité croissante, par la prise en compte de niveaux de complexité croissant pour les équations différentielles qui décrivent ces phénomènes, en allant du linéaire au non linéaire à comportement fractal.*

Il s'agit de lois d'échelle linéaires avec le comportement fractal le plus simple, autosimilaire, ou invariant d'échelle, correspondant à une dimension fractale constante. C'est ce que nous venons de constater avec les trois structurations majeures emboîtées du vivant.

Une autre application de la relativité d'échelle concerne le comportement autosimilaire avec des corrections log-périodiques. Ce comportement log-périodique se rencontre dans de nombreux systèmes biologiques ou inorganiques organisés de façon hiérarchique arborescente, comme l'arbre de la vie et ses diverses composantes.

Les trois premières structurations générales du vivant suivent effectivement une loi log-périodique d'accélération vers un temps critique, comme nous l'avons montré en 1999¹ avec la répartition des dates des événements biologiques majeurs du vivant sur lesquels nous reviendrons plus loin.

Nous allons examiner, point par point, le rôle potentiel de la relativité d'échelle dans la structuration et la morphogenèse du vivant.

1. Note à l'Académie des sciences de Paris : 1999, Chaline J., Nottale L. & Grou P., *L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ?*, *Le Point sur...* C.R. Ac. Sc., Paris., série 328 : 717-726.

2.5

Le rôle potentiel de la relativité d'échelle dans la morphogenèse du vivant

La relativité d'échelle intervient à de nombreux moments décisifs de la morphogenèse du vivant. Nous allons examiner ceux qui semblent effectifs aux diverses échelles, en partant des échelles les plus petites vers les plus grandes, respectivement celle des *éléments* ou *composants biochimiques cellulaires*, puis de la cellule pour constituer les organes, puis les organismes, c'est-à-dire des individus, l'ensemble constituant le niveau classique de la *microévolution*. Ensuite nous analyserons le comportement des populations et des communautés pour aborder au-delà, celle des *clades*, c'est-à-dire de la *macroévolution*. Nous terminerons en examinant le niveau de la *biosphère* qui constitue le niveau de complexité le plus élevé et le plus global du vivant.

Les données paléontologiques : de LUCA, premier organisme théorique anaérobie ancestral aux trois principales formes de vie

Les plus anciennes roches conservées et reconnues sont les gneiss d'Acasta au Canada, datés de -3,952 milliards $\pm$ 3 millions d'années. Mais il est vraisemblable que la vie n'existait pas encore sur notre planète à ce moment-là. La température de surface des océans devait être alors de 70°C.

LUCA/DACU et les procaryotes

Le dernier ancêtre commun à l'origine de tous les êtres vivants a été appelé **LUCA**¹ (*Last Universal Cell Ancestor*) ou **DACU** (*dernier ancêtre commun universel*). C'était une *protocellule* réalisée par le cloisonne-

1. Ce terme remplace celui de *Progénote* de Woese (1977), signifiant un ancêtre précurseur très archaïque. Il a été proposé aux réunions des Treilles en 1997 par Christos Ouzounis.

ment d'une molécule dans un *espace confiné*, une espèce de vésicule. C'est la première étape du scénario théorique décrit plus haut. Mais il ne faudrait pas croire que LUCA était la première cellule formée sur Terre et qu'il était seul. LUCA a été précédé de nombreuses formes et de populations qui n'ont pas forcément donné de descendants, mais il représente la dernière forme de la lignée ayant donné naissance aux trois grands domaines du vivant. On peut, avec Forterre *et al.* (2005), distinguer trois étapes dans le développement du vivant : 1. le monde précellulaire arrivant à une première cellule sans ARN et ensuite à une cellule avec ARN, 2. le monde post-cellulaire et pré-LUCA et 3. le monde post-LUCA qui est le nôtre actuellement. Ce LUCA portait un certain nombre de caractéristiques homologues dont ont hérité tous ses descendants, mais qui peuvent avoir subi ensuite une évolution par remplacements analogues et avoir même été perdues. LUCA aurait déjà possédé des milliers de gènes et autant de protéines différentes. On estime à environ entre 60 et 80 le nombre de protéines universelles provenant de LUCA. Elles ont des fonctions majeures puisqu'elles interviennent dans la traduction (protéines ribosomiques, protéines d'élongation des chaînes polypeptidiques, synthétases, enzymes d'ARN de transfert). Cela signifie que déjà LUCA possédait une machinerie de production des protéines proche de l'actuelle. En outre LUCA devait posséder une membrane cytoplasmique et peut-être des membranes endocellulaires, comme en témoignent les présences du complexe ribonucléoprotéique *Signal Recognition Particle (SRP)*, du récepteur membranaire *Sra* nécessaire à la translocation membranaire des protéines et les ATP synthétases membranaires. LUCA aurait pu avoir les mécanismes de transferts d'électrons comme ceux de la respiration de l'oxygène alors que celui-ci était quasi-absent. Les virus à ARN pourraient être les descendants d'organismes cellulaires antérieurs à LUCA. L'invention de l'ADN implique l'existence d'une enzyme, la *ribonucléotide réductase (RNR)* fabriquant les précurseurs de l'ADN à partir de ceux des ARN avec l'élimination d'un oxygène du ribose de l'ARN pour former du désoxyribose. L'existence de trois classes de RNR suggère une enzyme commune ancestrale et donc que LUCA possédait déjà de l'ADN. Par contre on ne trouve pas d'enzymes communes du métabolisme, ce qui ne permet pas d'évaluer celui de LUCA.

La position systématique de LUCA est loin d'être établie et reste l'objet de nombreuses conjonctures. Et son âge géologique reste contesté entre -3,5 et -2 milliards d'années. L'utilisation des horloges moléculaires, dont on sait qu'elles varient de molécules à molécules et chacune d'elles au cours des temps géologiques, explique ces dates si divergentes.

Les organismes vivants les plus anciens étaient vraisemblablement des *bactéries anaérobies hyperthermophiles* (archéobactéries éocytes et eubactéries thermotogales toutes dépendantes du soufre). Ils ne pouvaient vivre que dans une atmosphère sans oxygène, aux abords des sources chaudes bouillonnantes, entre 60° et 90°, des fonds océaniques. Ces bactéries conservent leur ADN malgré la température qui normalement le dénature à ces températures, grâce à des enzymes, comme les gyrases, et les gyrases inverses, qui ne fonctionnent qu'à des températures élevées. On trouve également des bactéries anaérobies dans les eaux stagnantes à boues noires rendues malodorantes par la putréfaction des organismes.

La paléontologie nous apprend que la vie n'est apparue que vers -3,8 à -3,4 milliards d'années au moment où les conditions terrestres étaient devenues compatibles avec les contraintes physiques des premières formes de vie. À quelle étape du développement de la vie appartenaient les plus anciens organismes fossiles ? Vraisemblablement au stade Pré-LUCA, vu l'âge considéré.

Les premiers organismes bactériens fossiles ont été trouvés en 1953 dans une roche siliceuse, le chert¹ de Gunflint, au bord du Lac Supérieur au Canada, par Stanley Tyler et J. William Schopf et en Russie dans des dépôts un peu plus récents, par B.V. Timofeev. Ce sont des coccoïdes, de 0,5 à 60 µm de diamètre, aux formes arrondies ou en filaments, appelées *Archaeosphaeroides*, *Gunflintia*, *Paleolyngbya*, *Isuasphaera* et *Eosphaera*.

Les plus anciens êtres vivants identifiés actuellement sont des empreintes cellulaires de bactéries fossiles appelées *Eobacterium isolatum* d'Afrique du Sud (Onvervacht, Swaziland) et de cyanobactéries de type *Nostoc* à Warrawoona (Australie), datées par Schopf en 1986 de -3,4 milliards d'années. Les plus anciens organismes seraient des archéobactéries et des eubactéries. Ces organismes vivent aux dépens de composés chimiques souvent nocifs comme le gaz carbonique, l'acide sulfhydrique, les sulfates, l'azote, le fer, dont les produits de dégradation sont le méthane (méthanogènes), le gaz sulfhydrique et d'autres, qui devaient, à ces époques reculées, donner au ciel une couleur rose et aux mers une couleur brune. Ces procaryotes se reproduisaient par *simple division cellulaire*, par *duplication asexuée* de leur matériel génétique.

Mais des vestiges de matière organique auraient été identifiés dans des dépôts très anciens du Groenland, d'Afrique du Sud et d'Australie, entre -3,8 et -3,4 milliards d'années. Si cette matière organique est bien d'origine vivante, cela signifierait que la vie serait apparue très

1. Le chert est une roche sédimentaire à grain fin, riche en silice, qui ressemble à du silex.

rapidement après le refroidissement de la planète, vraisemblablement près des sources océaniques très chaudes, les *trous souffleurs*, riches en molécules élémentaires. En effet des origines jusqu'à -470 millions d'années (Ordovicien moyen), la vie a été exclusivement aquatique. À l'Ordovicien supérieur, apparaissent les premières plantes terrestres.

La preuve d'autres traces de la vie est fournie par la présence à l'Antécambrien de dépôts calcaires très particuliers, les *stromatolithes*, correspondant à des biofilms produits par des bactéries, le plus souvent des cyanophycées photosynthétiques (algues bleues et vertes) formant des empilements de couches concrétionnées par la cimentation des grains sédimentaires. Ces dépôts peuvent atteindre plus de 1 000 m d'épaisseur sur plusieurs centaines de kilomètres dans la Province du Cap et le Basutoland.

La formation de l'oxygène par la photosynthèse des végétaux s'est réalisée ultérieurement grâce à la présence de protéines dans les *chloroplastes*, les *antennes collectrices*, qui emmagasinent une quantité importante de pigments, les *chlorophylles a* et *b* et les *caroténoïdes* captant les longueurs d'ondes rouges et bleues. Ensuite, des *centres réactionnels* transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique.

Les deux grandes étapes de la vie fossile, eucaryotes et multicellulaires

L'apparition de la *membrane du noyau* concrétise l'apparition des eucaryotes. C'est vers -1,5 à -1,4 milliard d'années, que se constitue cette nouvelle étape de complexification qui voit en même temps la mise en place de la *reproduction sexuée* qui, grâce à la méiose et à la mitose, assure un brassage génétique considérable, nouvelle source prodigieuse de variabilité, d'innovations et d'évolution (fig. 2.7).

L'intégration des organites énergétiques dans les eucaryotes, les *mitochondries* pour les formes animales et les *chloroplastes* pour les végétaux, proviendraient, selon Lynn Margulis, des symbioses respectives avec des bactéries pourprées et des prochlorophycées, proches des algues bleues (cyanobactéries). Certaines bactéries photosynthétiques ont utilisé ce pigment pour capter l'énergie solaire et extraire l'hydrogène de l'eau et le lier au gaz carbonique en formant des hydrates de carbone, du glucose et de l'oxygène. Rappelons cependant que, pendant la nuit, en l'absence de rayons lumineux, les plantes rejettent du dioxyde de carbone, alors qu'elles l'utilisent de jour. Ces apports symbiotiques ont donné au vivant de nouvelles potentialités par le gain d'énergie réalisé.

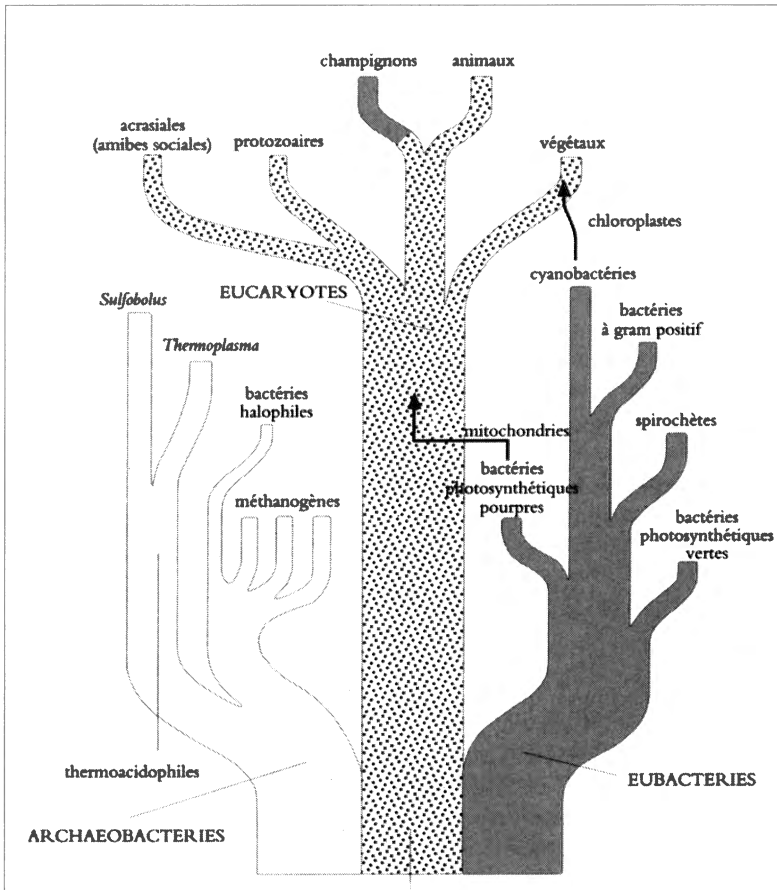


Figure 2.7. L'arbre du vivant.

La vie s'est diversifiée en trois grands groupes : les Archéobactéries, les Eubactéries et les Eucaryotes (d'après C.R. Woese et E. Fox, 1977, modifié).

Cet oxygène a tout d'abord été fixé par le fer ferreux dissous dans les océans avant d'être libéré dans l'atmosphère. Autrement dit, la Terre a tout d'abord subi une phase de rouille intense. Cet épisode est fossilisé au travers des six cent mille milliards de tonnes de minerais de fer rubané qui se sont accumulées, entre -2,5 milliards et -1,8 milliard d'années, sur des couches parfois épaisses de plus d'un kilomètre sur des distances de centaines de kilomètres, comme à Warrawoona (Australie).

Vers -2,5 milliards d'années, le taux d'oxygène a fortement augmenté dans l'atmosphère entraînant la formation de la couche d'ozone. C'est le début de la planète bleue, le ciel qui était alors de couleur rose étant devenu bleu et la mer étant passée du brun au bleu.

L'accumulation d'oxygène pourrait marquer un point de rupture dans l'histoire de la Terre en interdisant peut-être définitivement de nouvelles apparitions de la vie à cause de l'oxydation potentielle de l'atmosphère

car, comme nous l'avons déjà dit, l'oxygène est un poison mortel pour les *bactéries anaérobies*, seules capables d'apparaître aux conditions initiales dans un environnement qui en était dépourvu.

L'apparition des organismes pluricellulaires est source de diversification, puisque les fonctions vitales qui étaient assurées par une seule cellule vont se répartir entre des types variés de cellules spécialisées.

Il semble que les eucaryotes aient donné naissance, à plusieurs reprises, à des organismes multicellulaires dont le plus vieux représentant connu est l'empreinte fossile décrite sous le nom de *Grypania* du Michigan (âgé de -2,1 milliards d'années?), mais sa structure feuilletée est plus ancienne que les grandes cellules eucaryotes considérées comme ancestrales des multicellulaires et datant de -1,8 milliard d'années (des kystes Acritarches). Une incertitude réelle subsiste donc à ce niveau.

C'est sans doute avant un -1 milliard d'années qu'a dû se produire la séparation des premiers embranchements invertébrés/vertébrés, des algues rouges, vertes, dorées, jaunes et brunes, des chlorophycées (diatomées), des champignons et des futures plantes terrestres comme le suggèrent les comparaisons établies sur plusieurs molécules¹ qui donnent des âges de séparation compris entre -0,88 et -1,20 milliard d'années ! On a cité des traces discutables d'algues multicellulaires dans le Montana à -1,3 milliard d'années, mais les vraies activités biologiques n'ont pas laissé de traces antérieures à -1 milliard d'années.

On s'est demandé si cette diversification explosive n'était pas due à l'apparition de la *sexualité*. Cela paraît judicieux puisque la reproduction sexuée permet par le mélange des génomes, l'apparition de nouveautés morphologiques, mais il faut également prendre en compte la diversification évolutive des *gènes de régulation Hox* qui aurait permis la dérivation des premiers *grands plans d'organisation* complexes par leurs mutations à *effets macroévolutifs*, puisque les structures étaient encore très simples. Le développement de la sexualité implique l'utilisation de formes d'énergie importantes pour la division sexuelle des cellules : la *méiose* que nous évoquerons plus loin.

Les archives paléontologiques n'ont pas livré beaucoup de restes fossiles avant -600 millions, à cause de la tectonique des plaques qui a effacé les fossiles en enfouissant les couches géologiques de surface dans les profondeurs très chaudes où ces roches fondent. Les plus anciens êtres pluricellulaires animaux connus, les métazoaires, sont en effet des êtres mous en impressions discoïdes, des méduses (cnidaires),

1. ATPase, Cytochrome c, Cytochrome oxydase 1 et 2, β hémoglobine, NADH, et le 18Sr NA.

des vers (annélides) et animaux énigmatiques et des traces produites par des organismes à symétrie bilatérale ainsi que des arthropodes à carapace, provenant d'Ediacara en Australie dans des sédiments datés de -580 millions. Les autres plans d'organisation correspondent à des structures disparues. Mais il faut citer les œufs et embryons phosphatés provenant de Chine du Sud, dans la Formation Doushantuo, datée également de -580 millions, qui constituent sans doute les meilleures preuves de l'existence des métazoaires dès cette époque.

L'histoire de la Terre a connu à ces époques de nombreuses vicissitudes. Le continent unique et gigantesque qui existait au Précambrien a commencé à se disloquer, à partir de -800 millions d'années en blocs, ou *cratons*, pendant une période de très grands refroidissements, les *glaciations* les plus fortes jamais enregistrées sur Terre (-600 millions d'années). On estime actuellement que ces glaciations seraient dues à la consommation très forte du gaz carbonique, un gaz à effet de serre, par les organismes photosynthétiques qui, en revanche, produisaient beaucoup d'oxygène. Cette période de transition marque aussi le déclin des stromatolithes. Le développement d'êtres multicellulaires importants, de plusieurs centaines de cellules, exigeait en effet beaucoup plus d'oxygène qu'il n'en existait encore à cette époque.

Les plus anciens êtres pluricellulaires indiscutables sont des organismes mous provenant du site d'Ediacara en Australie, datés de -580 millions d'années renfermant 31 espèces de 21 genres (méduses, vers, arthropodes primitifs, trilobites, etc.). Cette faune, ou une partie de cette faune, est connue aussi dans de nombreux autres gisements à travers le monde. Mais une autre faune, celle de Chengjiang (Chine), datée du Cambrien inférieur, montre une multiplication considérable du nombre des plans d'organisation que l'on retrouvera, à l'exception des Vertébrés, dans la célèbre faune de Burgess, de -515 millions d'années. Au moins une vingtaine de ces plans d'organisation n'existent plus actuellement (*Xenusion*, *Microdiction*, *Wiwaxia*, etc.).

C'est donc, au cours de la période géologique appelée *Vendien* ou *Ediacarien*, entre -600 et -545 millions d'années, qu'apparaissent les nombreuses nouvelles caractéristiques animales qui définissent des *niveaux hiérarchiques emboîtés au sein des métazoaires*.

Toutes ces innovations anatomiques entraînent une nette complexification de l'écosystème marin impliquant l'existence d'une chaîne alimentaire déjà assez bien structurée (encore beaucoup de filtreurs et de détritivores). Mais on y distingue déjà, des prédateurs nageurs, des formes vivant sur le fond ou à l'intérieur même du sédiment.

Une première division concernant l'état d'organisation des populations de cellules entraîne la distinction entre les *Parazoaires*¹ ou *Placozoaires* (dont le genre *Trichoplax* est un célèbre représentant actuel), sans tissus, ni organes, et les *Eumétazoaires* où les cellules sont arrangées en tissus et organes (fig. 2.8).

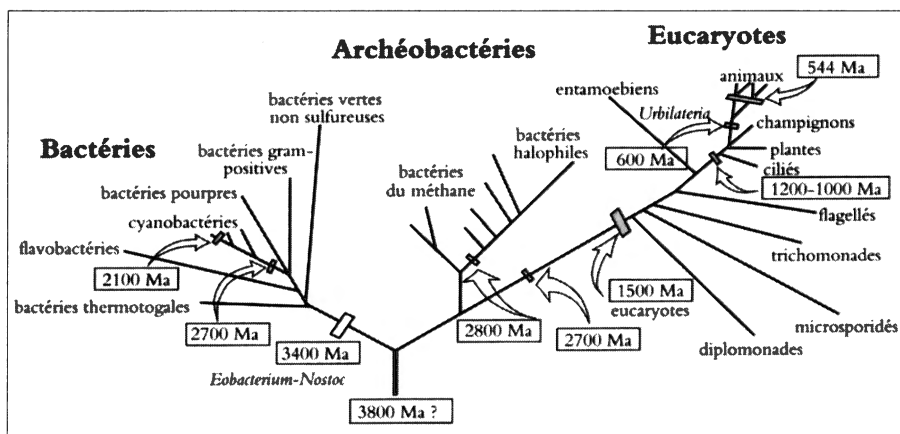


Figure 2.8. Cladogramme du vivant.

Ce schéma montre l'apparition datée des événements biologiques les plus considérables de l'histoire de la vie. Dans la branche des eucaryotes, nous pouvons constater que l'apparition d'Urbilateria (-600 Ma.) et celle des animaux (-544 Ma.), sont relativement tardives par rapport aux 3,8 milliards d'années de la durée totale de l'histoire de la vie (d'après Knoll, 1999, modifié).

Une nouvelle structuration intervient au niveau des groupements des cellules embryonnaires, entre les *diploblastiques* à deux couches tissulaires (ectoderme-endoderme) des Cnidaire et Cténaire et les *triploblastiques* à trois couches cellulaires (ectoderme-mésoderme-endoderme) des autres animaux. Les diploblastiques ont une structure radiale et les triploblastiques une symétrie bilatérale. L'apparition du coelome, une cavité dans le mésoderme des triploblastiques chez les *Coelomata*, est une nouvelle innovation qui les distingue des organismes possédant seulement un *pseudo-coelome* (Nématodes).

1. Groupe animal ne possédant pas de tissus : ni muscles, ni nerfs (Spongiaires).

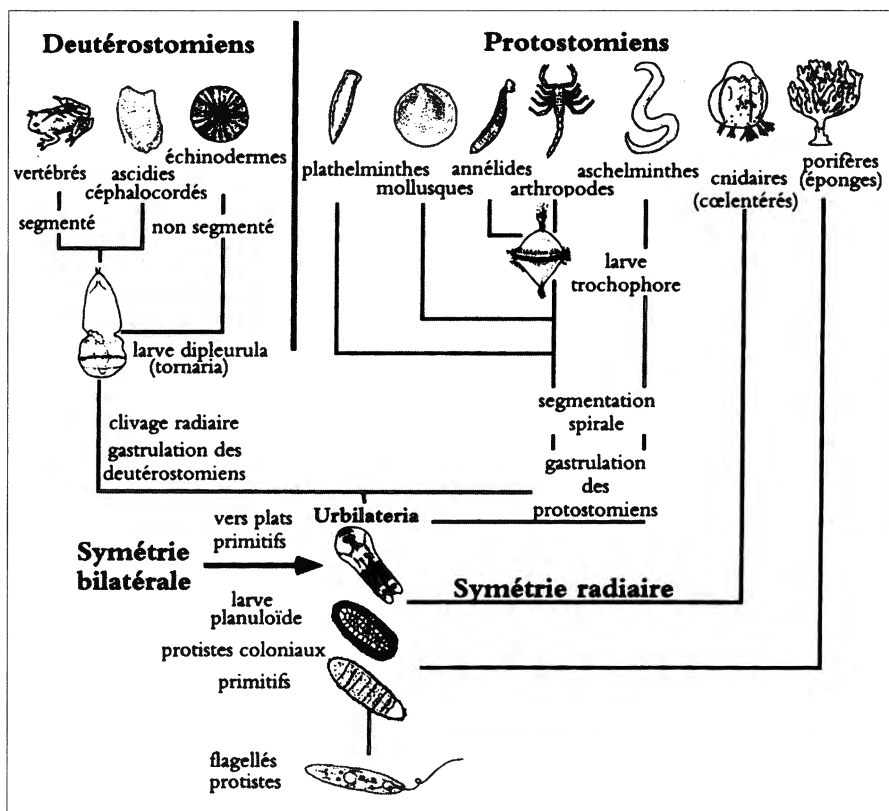


Figure 2.9. Cladogramme des Bilateria.

Parmi les Métazoaires, il faut distinguer les Radiata qui acquièrent une symétrie radiaire : méduses, coraux, et les hydres (cnidaires) et les cténophores. Les autres métazoaires ont une symétrie bilatérale, d'où leur nom de Bilateria, mais présentent deux types de développement qui introduisent des différences importantes. Dans le premier groupe (mollusques, arthropodes et vers), la bouche se forme en premier, ce sont les Protostomiens. Dans l'autre groupe, (échinodermes et les cordés), c'est l'anus qui se forme en premier là où se formait la bouche chez les Protostomiens, et la bouche se constitue en second, d'où leur nom de Deutérostomiens. Chez les Deutérostomiens, la segmentation des blastomères se réalise selon un schéma radiaire, alors que chez les Protostomiens, elle est spirale. Ces différences précoces sont probablement à l'origine des grands plans d'organisation (d'après Gilbert, 1996, modifié).

C'est à ce niveau de complexité que doit se placer l'ancêtre commun aux invertébrés et vertébrés, *Urbilateria* (fig. 2.9). Ce devait être un petit animal, à symétrie bilatérale, à polarité dorso-ventrale, avec un développement par clivage radial, possédant un cœlome et des appendices tentaculaires antérieurs, des expansions de ce cœlome. Dès cette époque, les gènes de régulation étaient obligatoirement présents (*Hox*, *Pax*, *distalless*, *engrailed*, etc.).

La *segmentation de l'œuf* localisant les organes détermine la division entre les *Protostomiens*¹ et *Deutérostomiens*² et ces différences précoces sont sans doute à l'origine des grands plans d'organisation du vivant. Elle a dû s'effectuer au moins 100 millions d'années avant l'apparition de la symétrie bilatérale caractéristique des *Bilatériens*. Ils vivaient sans doute, il y a au moins -600 millions d'années, avant les faunes d'Ediacara.

Chez les Protostomiens, le coelome régresse. Il y a *apparition d'une coquille externe* chez les mollusques. Le premier animal connu avec un exosquelette minéralisé est *Cloudinia*. Il est formé par un empilement de petits cônes emboîtés de carbonate de calcium, de quelques centimètres, l'animal qui habitait le tube étant sans doute un polype. Il est daté à Ediacara de -580 millions d'années. De cette époque, on connaît également des petites coquilles comme les *Anabarites* (à symétrie triradiée) et les *Protohertzina*. Entre -550 et -540 millions d'années se rencontrent également les *Archéocyates*, formant des cônes perforés assemblés en véritables récifs. Avec eux apparaissent aussi les premières éponges. Le coelome peut se maintenir et aboutir alors à une *métamérisation* ou division du corps en segments (métamères) qui peuvent rester distincts (Annélides) ou fusionner en plusieurs groupements (Arthropodes). Il apparaît aussi une *cuticule sclérifiée* qui joue le rôle de *squelette externe*.

Chez les Deutérostomiens, où le coelome persiste, le corps peut rester indivisé et s'entourer d'un *squelette interne calcifié* à symétrie radiale ou bilatérale (Echinodermes). L'un des premiers échinodermes *Helicoplacus* était doté de trois sillons spiralés séparant des plaques de calcite.

Une autre tendance se dessine, celle des formes à organes métamérisés où se développe un *axe interne, la corde*, avec un double choix, selon que la prédominance est donnée, soit au *développement viscéral* (Céphalocordés), soit au *squelette interne* osseux et cartilagineux (Vertébrés).

Après l'apparition de la vie, des cellules procaryotes, des cellules eucaryotes et des organismes pluricellulaires, on peut dire que plus de 30 *plans d'organisation* étaient en place après *l'explosion biologique* du Cambrien inférieur (-550 Ma.). Au sein des Cordés, le plan des Vertébrés, le dernier des grands plans d'organisation, apparaîtrait lui aussi au Cambrien inférieur, et non au Cambrien supérieur, grâce à la découverte en Chine dans la faune de Chengjiang, d'un cordé crâniote ayant des similitudes avec les lamproies actuelles (*Haikouella lanceolata*) possédant les filaments branchiaux, une corde neurale et des organes des sens de type vertébré.

1. La bouche se forme en premier.

2. L'anus se forme en premier là où se formait la bouche chez les Protostomiens et la bouche se forme en second.

De nombreuses étapes peuvent être distinguées dans l'évolution du plan d'organisation particulier des Vertébrés. Nous choisissons ce plan parce qu'il a laissé une marque très particulière dans l'histoire de la vie dans la mesure où c'est celui qui a acquis la plus grande diversification et complexité avec au terme actuel, l'apparition de la pensée réfléchie. Mais nous aurions pu en choisir d'autres qui ont acquis eux aussi des diversifications étonnantes, comme la fabuleuse radiation des arthropodes par exemple, la plus extraordinaire de toutes, avec son aboutissement actuel de plus d'un million d'espèces, au sein de laquelle les insectes seront les premiers animaux à avoir acquis des ailes et colonisé le milieu aérien.

Chez les Vertébrés, de nombreuses innovations marquent les étapes successives. Après l'apparition des squelettes internes, *la régulation osmotique* est une étape qui, peu avant -500 Ma., a permis une grande diversification dans le milieu aquatique (Agnathes et Gnathostomes). L'apparition du *poumon* a offert la possibilité de respirer l'air en dehors du milieu aquatique, *une aptation*, c'est-à-dire une fonction potentiellement utilisable, si les conditions de l'environnement l'imposaient. L'apparition *des pattes* qui caractérise les Tétrapodes et d'autres caractères associés permettent une première conquête partielle du milieu terrestre par les vertébrés, mais la reproduction impliquait toujours un retour obligatoire au milieu aquatique. Ces animaux, les amphibiens, auront donc une double vie, une vie larvaire aquatique et une vie adulte terrestre. Les plus anciens tétrapodes sont *Acanthostega* et *Ichthyostega* de la fin du Dévonien (-380 Ma.), bien que des traces suggèrent déjà leur apparition à la fin du Silurien (-410 Ma.). Ces formes malgré leurs pattes utilisées comme des palettes pour nager, vivaient encore comme un poisson avec des branchies fonctionnelles. Cela montre bien que les innovations apparaissent d'abord et qu'elles permettent ensuite par exaptation, avec un certain décalage temporel, de nouvelles fonctions comme ici la marche terrestre.

L'apparition des *annexes embryonnaires*¹ de l'*œuf amniote* apportera aux tétrapodes une indépendance définitive vis-à-vis de l'eau et leur permettra une conquête effective des continents. Le plus ancien reptile connu date du début du Carbonifère (-350 Ma.).

L'apparition de l'*homéothermie* qui nécessite un plus grand besoin d'énergie met les animaux à l'abri des aléas des variations de température de leur environnement et représente une innovation majeure de survie chez les Synapsides ou reptiles mammaliens de la fin du Carbonifère

1. Ce sont les organes qui permettent à l'embryon ses fonctions vitales et sa survie.

(-290 Ma.). Elle s'accompagne du développement corrélé du diaphragme et des poumons activant la respiration et le métabolisme. On note aussi l'apparition des phanères comme les poils et les plumes. L'apparition de la *plume* est une innovation très particulière qui assure le maintien de la température (homéothermie) chez les ancêtres des oiseaux. Plus tard, la réutilisation de cette *aptation* novatrice pour une autre fonction (*exaptation*), a permis le vol aux oiseaux. La colonisation du milieu aérien était déjà réalisée depuis longtemps par les insectes et les reptiles volants (Ptérosaures). Et il faudra attendre l'Eocène inférieur/moyen pour que les chauves-souris, par le biais d'autres aptations, colonisent les airs.

À ces changements sont associées également les constitutions du crâne, des mâchoires et oreilles moyennes de type mammalien à la fin du Trias (-210 Ma.). Les premiers mammifères connus sont datés de -225 à -220 Ma. L'apparition de la *viviparité* chez les marsupiaux est une innovation qui implique une forte liaison mère-progéniture et l'apparition de molécules de régulation inhibant le rejet durable du fœtus chez les Placentaires. L'apparition des mamelles, contemporaine de celle du placenta caractérise les placentaires (Euthériens) vers -120 Ma. *Ce sont de nouvelles complexifications de la reproduction.*

Le *plan d'organisation Mammifère* a subi ensuite une large diversification des diverses structures en de nombreux groupes qui présentent des variations sur un thème commun, touchant soit le crâne, le squelette post-crânien, et presque toujours les dents. C'est la raison pour laquelle les dents constituent le meilleur critère d'identification des espèces de mammifères.

L'apparition enfin de la *pensée réfléchie* chez l'homme, représente une nouvelle innovation biologique. Elle apparaît au terme de la lignée très particulière des primates, par des contractions crânio-faciales successives (prosimiens, simiens, grands singes supérieurs, australopithèques et l'homme) en réduisant la face et en augmentant le volume crânien.

Comme Gould l'a bien montré, l'arbre de la vie est un arbre à développement buissonnant où la sélection naturelle et les décimations ont élagué de très nombreuses branches qui avaient un avenir potentiel ramenant l'arbre du vivant à un *bonsaï biologique*. Aucun rameau n'est privilégié dans cet arbre où toutes les branches ont gagné la survie par la sélection naturelle.

Toute l'histoire de la vie se manifeste ensuite comme une succession de phases de multiplications du nombre d'espèces (*la biodiversité*) à l'intérieur du petit nombre de plans d'organisation qui ont survécu (*la disparité résiduelle*), entrecoupées de six grandes phases d'*extinctions en masse* qui ont fait disparaître un grand nombre de rameaux de l'arbre de

la vie (fig. 2.10). Ces extinctions aveugles, notamment en milieu marin, ont été mises en évidence par Newell, à la fin des étages Cambrien, Ordovicien, Dévonien, Permien, Trias et Crétacé.

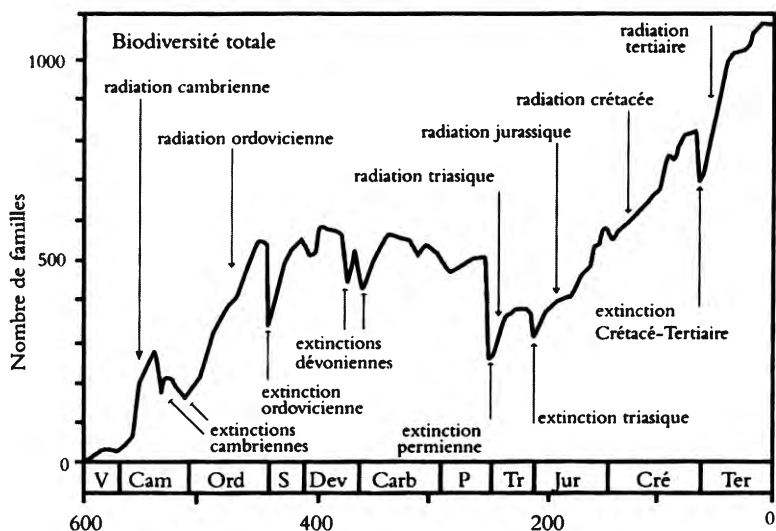


Figure 2.10. Radiations et extinctions du vivant dans l'histoire géologique.

Les variations de la biodiversité au cours des temps géologiques. Cette variation du nombre des espèces a été réalisée en milieu marin. Elle fait apparaître les phases de multiplication du nombre des espèces ou radiations et celles de disparition brutale ou extinction en masse. La plus importante en nombre a été celle de la fin du Permien, mais la plus célèbre est celle de la limite Crétacé-Tertiaire à cause de la disparition médiatisée des dinosaures (d'après Jablonsky, 1999).

Par chance pour nous, le plan d'organisation des vertébrés avec *Haikouella lanceolata* et *Pikaia gracilens* a échappé à la première décimation, autrement il n'y aurait jamais eu de poissons, d'amphibiens, de reptiles, de mammifères et d'hommes ! À quoi tient notre existence ? à la survie d'une espèce et donc à la contingence de l'évolution. Autrement le monde serait celui des bactéries, des algues, des plantes, des éponges, des méduses et coraux, des vers, des insectes, des brachiopodes, des mollusques, des vers et des oursins. Autant de formes de bactéries et d'arthropodes qui dominent d'ailleurs la planète par leurs nombres gigantesques d'individus et d'espèces.

La vie est un phénomène très original et on ne sait pas s'il s'est manifesté sur d'autres planètes, en raison des nombreuses conditions contraignantes requises à son apparition et à son maintien. De toute façon si la vie existait, ou avait existé à partir des briques universelles, à une

certaine période sur d'autres mondes comme Mars, ou Titan¹ à atmosphère dense *a priori* favorable à la formation de molécules prébiotiques, il est bien évident qu'en fonction de la *contingence* du phénomène dans des environnements différents, la vie aurait pris d'autres cheminements aléatoires, d'autres formes imprévisibles et inimaginables.

Des expressions morphologiques précellulaires actuelles de la vie au vivant dans tous ses états

L'exploration du vivant actuel, qui se trouve dans des conditions très différentes de celles qui ont régné au tout début des temps géologiques terrestres, à cause de la présence de l'oxygène, le poison des formes anaérobies, montre que les formes les plus simples, sont des *sphères*, situées à la limite du vivant et de l'inorganique.

Les expressions précellulaires de la vie actuelle

Certaines macromolécules, lorsqu'elles se trouvent dans un environnement aqueux, s'organisent spontanément en *structures sphériques précellulaires, non vivantes*, qui présentent cependant quelques particularités du vivant. Ce sont les *coacervats* et les *microsphères* auxquels il est possible d'ajouter des molécules particulières qui utilisent les êtres vivants parasités pour se dupliquer, les *prions*, les *virus* et les mystérieux *nanobes*, formes problématiques fossiles que nous évoquerons par la suite.

► Les coacervats

Ce sont des gouttelettes colloïdales de 2 à 700 microns riches en polymères se formant dans un milieu aqueux. Ils étaient considérés par Oparin comme des modèles particuliers de comportement chimiques complexes naturels, mais ce ne sont pas encore des êtres vivants. Le glucose peut entrer dans le coacervat où il est transformé en amidon par l'enzyme phosphorylase qui s'y trouve et grâce à l'énergie de la liaison phosphate glucose. L'amidon est découpé ensuite par une autre enzyme (une amylase), en un autre sucre (le maltose) qui est expulsé à l'extérieur avec le phosphate. *L'amidon s'accumule et la gouttelette grossit et se divise spontanément en donnant plusieurs gouttelettes filles ; peut-il y avoir là une contribution des effets de relativité d'échelle (duplication spontanée par saut d'énergie) ?* On ne sait pas si les *Isuasphera* du Groenland daté de -3,8 milliards d'années étaient des coacervats ou des cellules ancestrales.

1. Le gros satellite de Saturne.

► Les microsphères

Ce sont des éléments qui apparaissent lorsque l'on laisse refroidir des solutions chaudes de *proténoïdes*, des protéines thermiques, des polymères d'acides aminés. Réalisés par Sidney W. Fox (1912-1998) en 1958, en chauffant pendant trois heures à sec des acides aminés en conditions appropriées de pH et de salinité, ces proténoïdes ont des propriétés catalytiques.

Les microsphères qui apparaissent ont entre 1 et 2 micromètres de diamètre. Bien que dépourvus de lipides, les microsphères, ont une double couche interface hémiperméable, renfermant une solution interne de sels et de protéinoïdes. Elles peuvent également bourgeonner, se diviser et se reconjuguier. Lorsque les protéines internes ont des activités catalytiques, elles peuvent accélérer les réactions chimiques et surtout si elles renferment des protéines basiques riches en lysine et arginine, elles peuvent s'associer à des polynucléotides sélectionnés par leur propre information. Elles pourraient ainsi être à l'origine du système de codage précédant l'acquisition du système énergétique ATP/ADP.

► Les prions

Il existe des *particules infectieuses protéiniques (Proteinaceous virions)* correspondant à des mutations d'origine inconnue de la glycoprotéine *PrP-c*¹ une protéine de surface cellulaire qui intervient dans de nombreux phénomènes du vivant. Elle intervient notamment dans le développement du système embryonnaire, dans la différenciation cellulaire et la mort cellulaire programmée, l'*apoptose*, dans le fonctionnement du cerveau, dans la façon dont les protéines se replient en structures complexes, souvent fractales. La forme pathologique *PrP-res* se traduit par un changement dans la structure tridimensionnelle de la protéine (plus de feuilletés plissés que dans *PrP-c*) qui semble modifier son comportement en dépôts auto-aggrégatifs s'accumulant dans l'encéphale, en échappant au catabolisme cellulaire qui détruit les molécules, et entraînant la mort neurale. Ce sont les *prions* qui causent les maladies neurodégénératives² de la tremblante du mouton, de la maladie des vaches folles et de la maladie de Creutzfeldt-Jakob décrite en 1920. Ce sont des molécules apparemment capables de se reproduire sans nucléotide, avec ou sans acide nucléique caché dans un polynucléotide. On les considère comme des agents transmissibles non conventionnels (ATNC). Ce sont les ADN de l'hôte qui possèdent apparemment les séquences

1. Gène PrP situé sur le bras court du chromosome 20.

2. Encéphalopathies spongiformes transmissibles avec l'apparition de vacuoles dans le corps et le prolongement des neurones.

nécessaires pour coder les protéines du prion. Il s'agit là d'une forme élaborée de parasitisme moléculaire, comme celle des virus, mais sans enveloppe protéinique.

► Les virus

Ce sont des *formes aux frontières du vivant, mais sans l'être*, à structure de cristal, sans cellule, sans métabolisme. Plus petits que les bactéries, ils sont formés d'une molécule d'acide nucléique (ARN ou ADN), composée de 3 500 nucléotides d'ARN à 166 000 paires de nucléotides d'ADN entourée d'une enveloppe de quelques centaines de protéines. Ils ne peuvent se reproduire de façon autonome, mais seulement dans des cellules-hôtes par réplication des acides nucléiques, puis des protéines. Certaines enveloppes de virus contiennent des lipides et des glucides, des enzymes comme la *transcriptase reverse* des *rétrovirus*. Les virus ont un rôle évolutif important dans la mesure où ils permettent le transfert horizontal de gènes entre espèces. Les virus ont deux types d'actions cellulaires. Dans le cycle lytique, ils entraînent la cellule à les dupliquer jusqu'à contenir 1 000 virus avant d'éclater. Dans le cycle lysogénique, la cellule-hôte ne réplique pas de nouveaux virus qui sont à l'état latent, mais intègre le génome du virus dans le génome de la cellule qui se reproduit normalement. S'il s'agit d'un virus à ARN, le virus effectue une transcription réverse en ADN. Parfois un cycle lysogénique peut devenir lytique. C'est de cette façon que les génomes des vertébrés ont été envahis par des éléments de rétrovirus, qui peuvent être profitables à l'espèce, à l'exemple de la séquence qui régule de gène de l'amylase produite dans la salive humaine, ou parfois néfastes¹.

► Les nanobes

Les *nanobes* ou *nanobactéries*, *nano-organismes* ou encore *nanoparticules calcifiantes*, sont des formes qui ressemblent à des bactéries de très petite taille entre 20 et 150 nm (nanomètres). C'est-à-dire que les nanobes auraient la taille de 10 atomes d'hydrogènes accolés.

Ces nanobes ont été découverts par le géologue Robert L. Folk (université du Texas à Austin) en 1990, dans des dépôts de roches carbonatées précipitant dans les eaux chaudes thermales à Viterbe (Italie). Ce sont de petites sphères, découvertes dans des argiles, des silicates et des grès, qui se lient en chaînes comme les bactéries.

La plus petite bactérie reconnue, *Mycoplasma genitalium* mesurant environ 200 nm est celle qui a le plus petit génome connu (580 nucléo-

1. Le passage d'une infection lytique à lysogénique s'appelle une *transduction*.

tides). *Nanoarchaeum equitans*, qui appartient aux *Archaea*, a des cellules de 400 nm et se développe dans des sources hydrothermales d'Islande dans l'eau sub-bouillante. Son ARN ribosomal de la petite sous-unité 16S¹ des procaryotes est indétectable par les méthodes classiques et contient seulement 490 885 nucléotides.

Sur la côte occidentale de l'Australie, un sondage de 3 000 m de profondeur dans des grès, à des températures de 150° et des pressions de 2 000 atmosphères, s'est révélé infecté par des structures filamenteuses minuscules. Philippa J.R. Unwins et ses collègues (université du Queensland) estiment que ces structures sont des nanobes composés de carbone, d'oxygène et d'azote et seraient vivants, car ils croissent très vite et ont des membranes cellulaires. Ils seraient capables de se reproduire et contiendraient des acides nucléiques, en raison de la réaction positive avec trois marqueurs de l'ADN. Ils forment des fibrilles enchevêtrées comme un mycélium de champignon (Actinomycètes).

Des nanobes aux formes sphériques ou en filaments ont également été découverts autour de la source thermique radioactive François-Joseph (radium 226 et radon 222) de Badgastein (Autriche) à 45,6°, contenant de l'aluminium, du silicium, du magnésium, du potassium, du phosphore, du calcium, du soufre et du cuivre. De nombreuses formes de bactéries y ont été observées par Weidler *et al.* en 2006 : (*Chrenarchaeota*, *Probacteria*, *Euryarchaeota*, *Bacteroidetes*, *Planctomycetes*, *Nitrospira*). L'une des conclusions majeures de ces travaux est la démonstration que les bactéries peuvent pénétrer dans des milieux jusqu'ici considérés comme stériles, par les pores et les fissures des roches. La taille réduite de ces éléments serait liée à une grande variété de processus géochimiques. Compte tenu du fait que la vie nécessite au moins une taille de 140 nm dans un environnement contenant 20 % à 70 % d'eau, les auteurs se posent la question de savoir si la solution stratégique pour arriver à un organisme viable ne serait pas l'association structurale des sous-unités (sphères, segments et hexagones) en un réseau auto-organisé de nanobes constituant un véritable microbe.

Depuis cette découverte, des nanobes de 20 à 200 nm auraient été identifiés en 1996 par Mc. Kay dans une météorite d'origine martienne de l'Antarctique, *ALH84001*, formée il y a 4,5 milliards d'années, mais tombée en Antarctique il y a seulement 13 000 ans. Ils auraient également été retrouvés, selon Folk, dans la météorite martienne *Dhofar*. Les images des nanobes australiens ressemblent beaucoup à ceux décou-

1. Cette sous-unité de 1 500 nucléotides contrôle la fidélité de la correspondance de la séquence génétique en protéine lors de la traduction.

verts dans la météorite martienne ALH 848001 et dans les météorites non martiennes d'*Allende* (État du Chihuahua, au nord du Mexique), de *Murchison* (Australie) et de *Foum-Tataouine* (Sud-tunisien, 1931). Dans cette dernière, des globules carbonatés observés par Alix Barrat 50 ans après, et identiques à ceux de la météorite ALH84001, n'existaient pas sur les fragments collectés au moment de la chute et conservés au Muséum d'histoire naturelle de Paris. Il y aurait donc eu une pollution postérieure de globules carbonatés retrouvés dans le sable environnant par P. Gillet. Une analyse microbienne de cette météorite par Benzerara *et al.* (2003), montre effectivement des images de micro-organismes du type des nanobactéries en filaments qui ressemblent à ceux de la météorite ALH84001, mais ces images correspondent selon les auteurs à des cristaux simples de calcite de tailles micrométriques. Ces recherches, comme celles de Kirkland *et al.* (1999), mettent donc en doute la présence originale des nanobes dans les météorites. En effet, ils ont réalisé plusieurs expériences de précipitation de calcite en milieu inorganique, organique et biotique avec des bactéries et les résultats ont effectivement montré l'apparition le premier jour d'objets ronds ressemblant beaucoup aux nanobes.

Des nanobes existeraient également dans le corps humain (calculs rénaux, plaques athéromateuses et le sang...). O. Kajander, N. Ciftcioglu et ses collègues finlandais ont montré en 1998, que *Nanobacterium sanguineum*¹ pourrait expliquer la formation de calcifications du foie (apatite). Ces particules s'auto-répliqueraient en cultures microbiologiques et les chercheurs auraient identifié une séquence d'ADN. Un dentiste, John Cisar, a suggéré que l'auto-réplication pourrait correspondre à une forme inhabituelle de croissance cristalline. Des nanobactéries pourraient aussi intervenir dans la calcification des artères coronaires comme le suggèrent les travaux réalisés à la clinique Mayo (Minnesota) en 2004 qui, par des évidences indirectes, ont montré que ces particules de 0,2 nm, qui avaient la forme de cellules au microscope électronique, se dupliquaient spontanément et qu'elles produiraient de l'ARN en raison du fait qu'elles avaient absorbé des quantités importantes d'uridine, l'un de ses composants. Des travaux faits à la NASA en 2005 ont montré que ces nanobactéries se reproduisaient trois fois plus vite en environnement à faible gravité dans l'espace et qu'elles pourraient représenter un risque pour les astronautes en favorisant la formation de concrétions calcaires dans le foie.

1. Organisme Gram négatif.

Ces données ont été très critiquées et rejetées par la communauté scientifique qui estime que ces formes sont trop petites pour être des formes vivantes. Des structures chimiques sans vie croissent également et certains estiment qu'il s'agit de contamination ou d'artefacts d'origine minérale, voire des fragments de bactéries.

En effet, la vie actuelle nécessite la présence d'ADN, de ribosomes et d'enzymes. Une enquête diligentée par la NASA en 1998 a abouti au rapport *Limits of Very Small Micro-organisms*. Compte tenu du fait qu'un ribosome a, par exemple, une taille de 25 à 30 nm, et comme une cellule vivante actuelle renferme au moins plusieurs centaines de milliers de ribosomes, les experts en ont conclu, comme l'affirme A. Knoll, que toute forme inférieure à 200 nm ne saurait être considérée comme appartenant au vivant.

Sachant que les conditions de vie, à ses débuts, étaient très différentes de l'Actuel, et que les sources thermales ont pu être impliquées dans l'origine des premiers organismes, ces observations, qui demandent à être confirmées et documentées, ouvrent peut-être une nouvelle fenêtre sur des solutions inédites de la vie à des échelles extrêmement petites qui pourraient survivre en formant des « *réseaux vivants* » à partir de « *particules minérales non vivantes* ». À suivre...

Le monde des cellules

Nous avons vu que la forme de base du vivant était la *cellule* ; c'est l'*unité fondamentale du vivant*. Cet état cellulaire est passé par plusieurs stades, tout d'abord par un stade *procaryote*, puis par un stade *eucaryote*, dépassé ensuite par celui des *multicellulaires*.

La cellule est une *structure très organisée*. Bien que soumise aux principes de la thermodynamique et de la gravité, la cellule introduit de l'ordre dans un environnement désordonné où l'entropie augmente. Mais comme elle échange des molécules et de l'énergie avec l'extérieur, c'est un *système thermodynamiquement ouvert*.

La cellule procaryote

Elle se caractérise par la présence d'une *membrane* isolant un espace clos intérieur (le *cytoplasme*) de l'environnement extérieur. La membrane protège la cellule des variations de la pression osmotique.

► Les morphologies des procaryotes

Elles semblent résulter d'une adaptation à leur environnement et à leur mobilité. Les formes des procaryotes varient depuis des sphères parfaites, les *coques* (*Staphylococcus*), aux formes aplaties ou ovoïdes, jusqu'à des formes étirées en flammes de bougies (*Streptococcus*). Des morphologies cylindriques se rencontrent chez les bacilles, droites ou incurvées (*Vibrio*), mais parfois aussi ramifiées (Actinomycétales). Enfin des formes spiralées se rencontrent chez les Spirochaetales ou chez *Helicobacter*. Ces cellules procaryotes se groupent en chaînes, en amas asymétriques, cubiques, voire en palissades ou en paquets d'épingles, ou encore en formes de V ou de L.

► Les membranes

Les *membranes plasmiques* ont globalement une structure identique constituée d'une *bicouche de lipides*. Les lipides sont des molécules très particulières constituées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène qui ont une densité inférieure à celle de l'eau.

Les lipides des membranes sont des phospholipides qui *s'auto-organisent en double couche*¹ avec des terminaisons *polaires hydrophiles* constituées de groupements phosphates chargés négativement tournées vers l'extérieur et des terminaisons *apolaires hydrophobes*, constituées d'acide gras saturés² et d'acide gras insaturés, très fluides et tournées vers l'intérieur. Ces lipides dans des solutions aqueuses forment spontanément des *globules*, les *micelles*. Cette propriété exceptionnelle a sans aucun doute facilité la formation du compartimentage cellulaire. La tension superficielle de la membrane qui en résulte est nulle. Les membranes qui ont en général une épaisseur de 7,5 nm sont des *structures asymétriques* avec une *asymétrie de fonction*.

Les membranes cytoplasmiques renferment non seulement des lipides, mais aussi des sucres et 25 à 75 % de protéines (protéines globulaires transmembranaires en structure alpha, des protéines canaux de transport (porines) qui utilisent de l'énergie sous la forme d'ATP, des canaux ioniques de transferts d'ions, des protéines réceptrices spécifiques, des enzymes tels ceux de chaînes respiratoires, des ATPases, des aquaporines³. Le transport des molécules à travers la membrane peut

1. Structure amphiphile.

2. Atomes de carbone entièrement saturés en hydrogène des graisses animales ou végétales. Les acides gras présentent une hydrophobicité proportionnelle à la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras insaturés sont responsables de la fluidité membranaire, à l'opposé du cholestérol.

3. Qui assurent le transfert d'eau dans le phénomène d'osmose.

se réaliser de différentes façons. Les petites molécules hydrophobes (glycérol, O_2 , N_2) traversent les membranes par simple diffusion à travers la bicouche de lipides. En outre la membrane est une barrière sélective qui, grâce à des récepteurs membranaires, reconnaît les hormones ou diverses protéines et entraîne des phénomènes de signalisation cellulaire enclenchant une réaction cellulaire. Les ions comme le potassium et le sodium, ne traversent pas la paroi de lipides de la membrane cellulaire, mais passent à travers des protéines formant des canaux ioniques de passage fluctuant à la manière d'un interrupteur oscillant entre ouverture et fermeture. L'histogramme des durées de fermeture et d'ouverture est auto-similaire et fonctionne selon des lois de puissance.

Les phospholipides et les protéines de la membrane possèdent une propriété importante, celle de se déplacer dans la membrane. Celle-ci peut ainsi se déformer, onduler dans l'espace et en fonction de la température, peut former une phase liquido-cristalline, ou un gel. Il n'y a pas de stérols (cholestérol) chez les procaryotes¹ sauf chez les mycoplasmes, alors qu'ils sont souvent présents chez les eucaryotes. Chez les *Bacteria* et certains *Archaea*, une paroi rigide et solide entoure le cytoplasme et sa membrane.

Certaines cellules procaryotes possèdent des *organites*² particuliers, les *magnétosomes*, qui méritent de retenir notre attention. C'est le premier indice de *compartiment subcellulaire* observé chez un procaryote. Ce sont des organites contenant des particules minérales magnétiques (magnétite, greigite) enrobées dans une bicouche de lipides. Les bactéries magnétotactiques (*Aquasprilla magnetotactum* = *magnetotacticum*) ont été découvertes en 1975 par l'Australien Richard P. Blakemore qui avait placé des bactéries dans un champ magnétique faible. Il avait constaté que certaines d'entre-elles se déplaçaient le long des lignes de champ. Ces magnétosomes forment des chaînes alignées en constituant un dipôle magnétique³, au sein de la cellule de *Magnetospirillum magnetotacticum*, qui leur permet de s'aligner tout le long du gradient magnétique pour se déplacer. Chez *Magnetospirillum gryphiswaldense*, Scheffel et al. en 2006 ont montré que la protéine *MamJ*, inter-réagirait plus ou moins avec la surface du magnétosome pour aligner les magnétosomes le long d'une structure protéinique filamenteuse (*mamK*) de type cytosquelette. Et

-
1. Chez les bactéries, la membrane est une enveloppe rigide formée de peptidoglycane, un hétéropolymère constitué de chaînes glucidiques liées par des chaînes de peptides qui forme un sac autour de la bactérie.
 2. Ou organelles.
 3. D'intensité comprise entre 300 et 450 oersteds selon Rafal Dunin-Borkowski et Peter Buseck.

comme le gradient d'oxygène est aligné le long du gradient vertical du champ magnétique, les cellules peuvent ainsi trouver les régions les plus oxygénées. Néanmoins Komeili *et al.* en 2006, ont montré que les membranes de ces magnétosomes n'étaient en fait que des *invaginations de la membrane interne*¹ qui se sont individualisées pour donner des vésicules libres. Ces magnétosomes doivent se rencontrer chez nombre d'animaux qui se déplacent sur de très grandes distances, comme les oiseaux, les baleines et les dauphins ou les anguilles. Ainsi, donc contrairement à ce que l'on avait supposé, les magnétosomes ne sont pas des organites à membrane propre, puisqu'ils correspondent à des membranes dérivées de la membrane interne par invagination.

Cependant, on a découvert chez une catégorie de bactéries, les Planctomycétales, et plus particulièrement dans les genres *Anammox*, *Pirellula*, *Brocadia* et *Gemmata*, un compartimentage intracellulaire très spécialisé, appelé l'*anammoxosome*, qui est délimité par une membrane et où se réaliserait, selon C. Brochier, l'oxydation anaérobie de l'ammoniaque. Pour J. A. Fuerst et R. I. Webb, le *nucléoïde*, désignant des régions de confinement des régions fibrillaires contenant l'ADN des procaryotes, par opposition au *noyau vrai* des eucaryotes, n'est en principe pas bordé par une membrane, bien que des associations d'ADN bactérien avec des membranes aient été rapportées avec une certaine incertitude, mais une exception de taille semble exister chez une bactérie Planctomycétale (Eubactérie) du Queensland, *Gemmata obscuriglobus*. Les auteurs ont montré que cette espèce possède une région contenant l'ADN nucléaire en double rang et des fibres bordées par deux membranes nucléaires. La structure de cette membrane autour du nucléoïde fibrillaire est constituée d'une zone de granules dense en électrons (ressemblant à des ribosomes), enveloppée par deux membranes nucléaires séparées par un espace transparent aux électrons. On note une absence totale de peptidoglycane dans les membranes qui sont simplement constituées de protéines. Cette bactérie possède aussi à sa surface, une structure originale en petits puits circulaires cratériformes². Cela prouverait l'inadéquation affirmée par Woese de la dichotomie procaryotes/eucaryotes et rendrait compte d'une polyphylie³ d'origine des membranes. Avec l'existence d'organismes dépourvus de mitochondries (*Vairimorpha necatrix* et *Guardia lamblia*),

-
1. Structures organisées par les protéines *MamK* et *MMPs* ressemblant à de l'actine placé sous le contrôle des gènes *mamJ* et *mms*. Ces protéines ne semblent pas avoir d'équivalents dans les organismes non magnétiques. Les phospholipides et les acides gras sont en proportions différentes de ceux de la membrane cellulaire.
 2. Ne seraient-ce pas des invaginations membranaires ?
 3. Ce caractère est une ressemblance qui n'a pas été héritée d'un ancêtre commun.

ces observations suggèrent l'existence d'un groupe très ancien d'eucaryotes, les *Archaezoa*. Les mêmes structures apparaîtraient chez *Brocadia anammoxidans* avec deux membranes autour du nucléoïde, avec une seule membrane chez *Pirellula marina* et une membrane supplémentaire invaginée chez *Planctomyces maris* et *Isosphaera pallida*.

Les mycoplasmes sont des *bactéries procaryotes dépourvues de paroi*, très présentes dans la nature. D'après leur ARN ribosomique 16S, ils pourraient être considérés comme dérivés de *bactéries à Gram positif* du type *Clostridium* par la perte de la paroi et une réduction du génome. Ces procaryotes sphériques, à enroulement hélicoïdal et parfois ramifiés, ne peuvent pas synthétiser le peptidoglycane ou muréine¹, un polymère qui forme, en un maillage serré, la paroi des bactéries à *Gram+* et *Gram-*. Ils pourraient donc avoir une origine antérieure à la formation de ce polymère. De petite taille, de l'ordre de 300 nm, ils contiennent un petit génome et quelques ribosomes. Ils se dupliquent en dehors des cellules, mais à leurs surfaces. La famille des Mycoplasmes rassemble des formes parasites, souvent pathogènes, comme le *Mycoplasma pneumoniae*, responsable des pneumonies atypiques ou des mycoplasmoses dans les voies génitales (*Ureaplasma urealyticum*) de l'homme et cause des infections chez les bovins. Les *Spiroplasma* parasitent les plantes.

Les *magnétosomes* seraient alors les premiers organismes qui « *auraient pu* » acquérir une véritable compartimentation intracellulaire. Ce seraient potentiellement eux, ou des formes analogues, qui auraient pu subir les effets du *saut quasi-quantique de complexergie* faisant apparaître un confinement du matériel nucléaire à l'intérieur d'une *membrane nucléoïde*², c'est-à-dire un deuxième niveau dans la hiérarchie d'organisation du vivant.

La cellule eucaryote

Ces cellules possèdent un *vrai noyau* et de très nombreux *organites* entourés d'une membrane à la différence des procaryotes.

Beaucoup de ces cellules eucaryotes sont fractales, c'est-à-dire qu'elles accroissent ainsi considérablement leur surface. On a démontré par exemple que la forme des cellules nerveuses, les neurones, avec leurs

-
1. Signalons que la pénicilline, en s'intercalant dans le polymère, bloque la formation de peptidoglycane et empêche les bactéries de proliférer.
 2. Cette structuration implique, si elle est vérifiée, l'existence d'un cytosquelette, d'introns et de *spliceosomes*, ces petits assemblages d'organites de ribonucléoprotéines [snRNPs] et de petits ARN nucléaires [snARNs] en : U1, U2, U3, U4, U5, U11, U12, ou snurps) qui excluent les introns non codants (par excision) de la réplication (le splicing) en liant les introns en boucles inopérantes.

nombreux prolongements, les axones, correspondaient à des **structures fractales**. On sait par exemple que la dimension fractale des neurones du système nerveux central de vertébrés dans un milieu de culture augmente au fur et à mesure de leur développement, cette valeur atteignant finalement $1,68 \pm 0,15$. Une autre étude sur les formes des neurones de la rétine montre une analogie avec les phénomènes d'agrégation limitée par la diffusion¹. La dimension fractale du branchement des vaisseaux sanguins de la rétine de l'œil humain atteint 1,70, une dimension fractale qui tend vers 1,72 et semble très caractéristique des développements de formes en deux dimensions.

Nous analyserons en premier leurs *enveloppes*, puisque le passage des procaryotes aux eucaryotes tel qu'il s'interprète en termes de relativité d'échelle, fait intervenir des *endomembranes*, des membranes emboîtées au sein des membranes, selon une *structuration typiquement fractale*. Ces endomembranes qui découpent la cellule en nouveaux compartiments, les *organites*, très nombreux dans le cytoplasme (ou cytosol) *sont constituées d'une double couche de lipides*.

Ensuite, nous examinerons la division cellulaire impliquant le phénomène de la *réplication* aux niveaux des gènes et des cellules en nous limitant aux aspects pouvant être liés à l'approche relativiste d'échelle de ces questions.

► La membrane plasmique

C'est la membrane qui sépare le cytoplasme de l'extérieur. Elle est formée de deux feuillets de phospholipides et de glycolipides qui sont liés par leur polarisation hydrophobe et sur lesquels sont fixées des protéines ou que les protéines traversent. Des molécules variées et mobiles, dont le cholestérol chez les animaux, sont fixées entre les molécules des deux couches et lui donnent sa souplesse. Sur ces molécules internes se fixent les éléments d'un *cytosquelette* discuté plus loin.

► La membrane nucléaire

C'est l'apparition de cette enveloppe qui se concrétise chez les eucaryotes par la formation du *noyau*. Nous avons dit qu'elle pourrait, selon la proposition faite en théorie de la relativité d'échelle d'une nouvelle mécanique de type quantique dans l'espace des échelles, résulter d'un saut du niveau de la *complexergie fondamentale* ($n = 0$ ou état du « vide »)

1. (DLA pour Diffusion Limited Aggregation), voir Dubois et Chaline. *Le Monde des fractales*. Ellipses. 2005.

à un *premier état excité de cette complexergie* ($n = 1$) donnant ce premier compartimentage emboîté.

L'enveloppe nucléaire est très différente de la membrane plasmique et du nucléoïde avec lequel elle présente cependant des analogies. Elle sépare le cytoplasme du *nucléoplasme* et est constituée de deux membranes distinctes séparées par un espace important de 75 Å (angströms). La membrane externe, au contact du cytoplasme, prolonge le *reticulum endoplasmique granuleux* (REG), car il supporte les *ribosomes* en grains. Il structure un *réseau interne* du cytoplasme qui est en relation directe avec les autres organites intraplasmiques comme *l'appareil de Golgi* et permet le transfert des protéines formées dans les ribosomes. Quant à la membrane interne du nucléoplasme, elle est doublée et bordée par un maillage de fibrilles homologues des *filaments intermédiaires* du *cytosquelette*, le *nucléosquelette* ou *lamina nucléaire*, d'une épaisseur d'environ 20 nm. Il s'agit d'un réseau de fibrilles de polypeptides, les *lamines*, constituées de complexes protéiques énormes (nucléosporines) en un agencement complexe en 3 anneaux de 8 fibrilles symétriques, qui permettent les échanges entre le cytoplasme et le noyau et sont reliés au cytosquelette cytoplasmique englobant 3000 à 5000 *pores nucléaires* par noyau. La *lamine* se désassemble au moment de la mitose¹ pour se reformer ensuite par des phénomènes de phosphorylation et de déphosphorylation. Elle servirait d'attache aux diverses chromatines.

► Les organites intracellulaires à membrane

Cet emboîtement des membranes eucaryotes ne concerne pas uniquement le noyau, mais aussi tout un assortiment d'organites indispensables au bon fonctionnement de la cellule que sont les *mitochondries**, les *plastides* avec en particulier les *chloroplastes**, le *nucléole**, *l'appareil de Golgi*, le *reticulum endoplasmique*, les *ribosomes*, les *vacuoles*, les *lysosomes*, les *endosomes*, les *peroxysomes*, les *vésicules de transport*, le *protéasome* et la *paire de centrioles**. Nous n'analyserons que les exemples utiles à notre approche, ceux portant une astérisque en caractères normaux, les moins intéressants étant présentés en petits caractères. Des *minimyosines* servent à transporter les organites dans la cellule comme nous le verrons plus loin.

1. Pour avoir une idée du fonctionnement de ces pores, il faut savoir que cette mitose nécessite l'importation de 500 000 protéines par les pores pour réexporter ensuite 14 000 sous-unités ribosomales (débit de 100 protéines et 3 ribosomes/minute/pore).

• Le nucléole

Dépourvu de membrane, il se situe dans le noyau sous la forme d'une zone plus dense à cause des nombreux ribosomes qui s'y forment et de l'hétérochromatine compacte, structurée en deux zones concentriques, la zone fibrillaire interne et la zone granulaire externe. La zone fibrillaire décompactée se présente sous la forme d'*arbres de Noël* découverts par Miller dont le tronc est de l'ADN (fractalité), les branches des ARN ribosomiques reliées au tronc par des globules de protéines (ARN polymérases). C'est le lieu de la transcription des ARN ribosomiques et de la synthèse des ribosomes avec les protéines. Nous verrons que le nucléole disparaît lors de la mitose. *La fractalité est liée à une question de surface.*

• L'appareil de Golgi

Cet organe cellulaire de forme discoïde est composé d'empilements de replis en petits sacs (sacculs) de l'endomembrane, les *dictyosomes*, reliés à un réseau de canaux. C'est dans l'appareil de Golgi, que les protéines formées dans les ribosomes sont modifiées par les enzymes nécessaires, soit par addition de phosphates, comme le mannose-6-phosphate pour les lysosomes (phosphorylation), soit par addition de résidus glycanes (glycosylation), soit encore par sulfatation (par des sulphotransférases). Cet organe régule aussi le trafic des vésicules.

• Le réseau ou réticulum endoplasmique

Cet organe a une membrane différente de la membrane endoplasmique qui se trouve en continuité avec la membrane nucléaire et l'appareil de Golgi. La partie externe de la membrane nucléaire est souvent accolée à celle de la membrane de ce réseau. Dans la partie externe granuleuse, recouverte de ribosomes, les acides aminés sont assemblés en protéines qui deviennent ensuite des macromolécules. Le réseau endoplasmique participe aussi, avec d'autres organites, à la formation des lipides nécessaires aux cloisonnements, qui sont associés à des vésicules d'exocytose livrant directement les lipides aux cloisons en fusionnant avec elles. Il régule aussi le calcium.

• Les ribosomes

Ce sont eux qui synthétisent les protéines en décodant l'ARN messager. Ils sont composés de deux parties en forme de tunnel qui se déplacent sur l'ARN messager en utilisant de l'énergie par hydrolyse du GTP, une petite partie qui déchiffre la séquence et une plus grande qui compose la protéine en alignant les acides aminés.

• Les mitochondries

Ce sont des organites intracellulaires des formes animales dont la taille voisine le micromètre (1 à 10 μm x 0,5 à 1 μm). Ce sont les *usines à énergie des cellules animales* dont le nombre varie selon les besoins en énergie de la cellule, de 5 à 10 fois. Elles sont constituées de deux couches phospholipidiques. La couche externe perméable renferme des porines¹. La couche interne plus imperméable renferme un phospholipide double, la *cardiolipine* qui la rend imperméable aux ions. Les molécules ne peuvent la traverser que si elles trouvent un transporteur. *La membrane interne forme de nombreux replis, une structuration fractale*, qui augmente la surface de phosphorylation oxydative et accroît ainsi considérablement la quantité de *quanta bioénergétiques* pouvant être produits par l'ATP. Une mitochondrie peut transformer une molécule de glucose en 38 molécules d'ATP. C'est là aussi que se déroulent les étapes du cycle de Krebs, les béta-oxydations et les phosphorylations. Les ribosomes mitochondriaux sont plus petits que ceux des cellules (70S au lieu de 80S contenant une dizaine de gènes). Les mitochondries ayant leur propre ADN spécifique dit mitochondrial seraient les produits endosymbiotiques de bactéries pourprées, comme Lynn Margulis l'a suggéré dès 1966. Comme les mitochondries des spermatozoïdes ne passent pas dans l'ovocyte au moment de la fécondation, ou très rarement, les mitochondries proviennent donc exclusivement de la mère.

• Les chloroplastes

Les plastes sont des organites en forme de disques aplatis dont la taille varie de 2 à 10 μm et dont l'enveloppe plastidiale est formée d'une membrane externe et d'une membrane interne séparée par un espace inter-membranaire. Le chloroplaste par exemple est structuré en enveloppes aplaties empilées qui renferment les pigments verts de la chlorophylle fixés sur des protéines particulières, les antennes, et les pigments rouges des caroténoïdes. La chlorophylle permet de capter la lumière pour effectuer la fonction de photosynthèse², c'est-à-dire de transformer l'eau et la CO_2 en matière organique carbonée, en sucre, et en libérant beaucoup d'oxygène³, cet oxygène qui a envahi l'atmosphère

-
1. Protéines formant des canaux aqueux transmembranaires formées de 16 feuilletts béta constituant des canaux protéiques au travers de la couche de lipides permettant aux molécules hydrophyles de petite taille de passer : nucléotides, acides gras, ions.
 2. La photosynthèse est le processus qui permet aux végétaux de synthétiser de la matière organique à partir de l'énergie solaire.
 3. $6 \text{ CO}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O} + \text{lumière} > \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$.
La réaction photochimique qui correspond à une conversion de l'énergie électromagnétique en énergie chimique se réalise par captage d'un photon (molécule P680 de chlorophylle)

terrestre après l'apparition de ces organites. *Les chloroplastes sont les usines à énergie des végétaux.* Ils dériveraient, selon Lynn Margulis, de bactéries prochlorophycées, voisines des cyanobactéries endosymbiotiques, c'est-à-dire coopérant sous la forme de symbiose et dont l'un d'entre eux se trouve à l'intérieur de l'autre.

• Les vacuoles

Ce sont des organites intra-celulaires pauvres en protéines engendrés par le *réticulum endoplasmique lisse (REL)* où s'accumulent les éléments nutritifs de la cellule, glucides (saccharose, fructose), acide oxalique, ou particuliers (latex, opium, tannins) et de l'eau. Les vacuoles peuvent être contractiles ou servir à la phagocytose pour éliminer les proies extérieures dangereuses pour la cellule.

• Les lysosomes

Formés par l'appareil de Golgi et présentes dans le liquide à l'intérieur de la cellule, appelé le *cytosol* des cellules eucaryotes, à l'exception des hématies, à environnement acide, qui contiennent des enzymes digestives pour utiliser les macromolécules. Les résidus de digestion s'accumulent dans le lysosome, comme les globules blancs à durée de vie limitée.

• Les endosomes

Ce sont des sous-compartiments cellulaires sur lesquels se fixent des vésicules d'endocytose situées en surface de la cellule qui font pénétrer dans la cellule les molécules externes. Les endosomes sont des lieux de collecte où se réalisent les tris sélectifs de ces molécules qui peuvent être renvoyées à la membrane plasmique ou détruites par dégradation ou transmises à d'autres organites, comme le système de Golgi par exemple.

• Les peroxysomes

Ces organites, appelés aussi microbodies, de 0,15 à 1 μm chez les animaux, peuvent atteindre 1,7 μm chez les plantes. Ils sont entourés d'une membrane simple, et, dépourvus de génome, ils proviendraient

qui excite un électron pigmentaire qui est capté immédiatement par la phéophytine et sera repris ensuite par d'autres molécules réductrices (plastoquinone). La molécule est dirigée vers les cytochromes b_6/f qui recevront ses électrons et libéreront les protons dans le lumen, ce qui produit l'énergie indispensable à la production d'ATP en passant par le canal de l'ATP synthase. L'énergie de l'ATP fixe le carbone du gaz carbonique à l'hydrogène de l'eau qui est ensuite réduit en glucide par adjonctions d'électrons et de protons. C'est une biochimie fort complexe.

du réticulum endoplasmique. Leur rôle est de dégrader les molécules toxiques, notamment le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) produit par les mitochondries et les acides gras, en eau. Ils « pourraient » provenir de l'endosymbiose d'un procaryote ayant perdu son matériel génétique !

• Les vésicules cytoplasmiques de transport

Il s'agit d'un très petit compartiment isolé du cytosol par une simple bicouche de lipides comme celle de la membrane cytoplasmique. Formées dans l'appareil de Golgi, le réticulum ou réseau endoplasmique, ou par une invagination de la membrane plasmique, elles jouent un rôle majeur dans le métabolisme en servant à transporter des enzymes, et diverses molécules notamment les déchets cellulaires. Elles peuvent également stocker diverses molécules comme des neurotransmetteurs dans les neurones.

• Le protéasome

Structure enzymatique à multiprotéines, il se rencontre dans le cytosol, le noyau et le réticulum endoplasmique. Son rôle est de dégrader les protéines défectueuses ou toxiques au moyen des protéases et de l'ubiquitine qui marquent ces molécules à éliminer. Sa structure en tuyau digestif entoure une cavité par quatre anneaux, dont deux intérieurs et deux extérieurs composés chacun de sept protéines.

• La paire de centrioles

Chez les animaux, il existe deux centrioles non adjacents qui constituent le centrosome à proximité du noyau et qui jouent un rôle capital dans la division cellulaire où ils forment l'appareil mitotique. Lors de la mitose, chaque centriole se duplique et forme l'un des pôles d'un *aster*, reliés par un réseau de microtubules constituant le *fuseau mitotique*.

Que conclure de ces observations dans le contexte de la relativité d'échelle ? C'est un changement d'*état de complexergie* qui aurait permis théoriquement le passage de la cellule procaryote à la cellule eucaryote. Nous avons vu que l'organisation de la cellule eucaryote faisait appel à de nombreuses *sources d'énergie* qui n'existaient pas chez les formes ancestrales procaryotes. Ces gains d'énergie sont possibles grâce à la symbiose avec les mitochondries et les chloroplastes dont les âges exacts d'apparition se situent vers -1,5 à -1,4 milliard d'années. La symbiose est tout à fait compatible avec la relativité d'échelle.

Il faut remarquer que les membranes sont globalement constituées de deux couches de lipides associant de nombreuses protéines, mais dont la structure relève d'une formation quasi-spontanée en fonction

des propriétés hydrophiles et hydrophobes des lipides. Les réseaux de canaux des appareils de Golgi ou du réticulum endoplasmique résultent des replis membranaires en structures fractales qui ont la propriété d'accroître les surfaces d'interaction. La zone fibrillaire des nucléoles en arbre de Noël est également une structuration fractale.

La formation d'enveloppes autour des organites crée-t-elle un nouveau niveau hiérarchique de parois emboîtées de type fractal, après ceux de la membrane plasmique et de la membrane nucléaire ? À moins que ces deux dernières ne soient du même second ordre hiérarchique fractal, compte tenu de leurs apparitions synchrones chez les eucaryotes.

La cellule eucaryote, le cytosquelette et la division cellulaire

Nous allons en analyser le fonctionnement, ainsi que celui de la division cellulaire.

► Les microtubules

Le réseau des fibres intracellulaires microscopiques qui constituent le *cytosquelette* des cellules eucaryotes et le matériau de base de constitution des *fuseaux mitotiques* sont les *microtubules*. Il pourrait exprimer, dans la cellule, *la matérialisation optimisée des trajectoires, identifiées à des géodésiques fractales entre divers points de la cellule*. Le fonctionnement de ces microtubules qui permettent le mouvement des organites au sein des cellules est une petite merveille biochimique.

Les procaryotes n'ont pas de cytosquelette, à l'exception des spirochètes qui ont des molécules semblables, mais n'ont pas les mêmes effets. La raison pourrait en être tout simplement un manque de molécules énergétiques indispensables à leur fonctionnement.

● Le cytosquelette

Ce sont de longs polymères protéiques complexes et hautement instables. Ils sont constitués de plusieurs grandes familles de protéines, les filaments épais de tubuline, les microtubules, les filaments fins d'actine et enfin les filaments intermédiaires. Leur fonctionnement est une petite merveille technique récemment élucidée que nous analyserons en détail.

● La structure des microtubules

Les microtubules et les microfilaments ont une charpente microprotéique constituée par la polymérisation de molécules de protéines apparentées stabilisées ou déstabilisées par d'autres protéines. Les

microtubules sont des cylindres creux de 25 nm (10^{-9} m) de diamètre, leur lumière étant de 14 à 10 nm.

Constituants d'un des trois réseaux de filaments du cytosquelette, les *microtubules* sont des polymères complexes, des tubes creux de longueur variable et en perpétuelle recomposition dont l'unité de base est le *dimère de tubuline α et β* , chacune étant composée de 450 acides aminés. Une *tubuline α* s'associe avec une *tubuline β* et forme un doublet, un *hétérodimère de tubuline*. Sur la *tubuline β* se lie une source d'énergie, le *guanosine triphosphate* (GTP¹), en présence d'ions Mg^{2+} , qui a un effet de stabilisation à une extrémité (*le capping*) et dont un changement de conformation permet de former le *protofilament*. Il y a généralement 13 colonnes de dimères de tubuline dans chaque microtubule.

Le GTP peut être converti en adénosine triphosphate (ATP). Le GDP est conservé dans la structure des microtubules. Chaque dimère a une dimension de $8 \times 4 \times 4$ nm et son nombre atomique est de 11×10^4 , ce qui implique de nombreux nucléons et sa masse en unité absolue est de 10^{-14} . Chaque dimère de tubuline peut exister sous au moins deux conformations. Dans l'une, ils se courbent en torsion à environ 30° par rapport à la direction du microtubule formant une espèce de ventilateur.

Les deux extrémités ne sont pas équivalentes et l'addition de dimères se fait de façon stochastique, mais toujours avec une cinétique d'élongation supérieure côté [+] par rapport au côté [-]. Les microtubules sont interconnectés avec leurs voisins par des ponts de protéines d'association de microtubules (PAPs).

Les kinases apportent de l'énergie qui permet la polymérisation de la tubuline en présence de GTP. La GTP peut s'hydrolyser pour former du GDP et le microtubule devient alors instable et se dépolymérise en quelques secondes. Deux protéines peuvent se fixer sur le microtubule, la dynéine (cf. les cils et flagelles) et la protéine *tau*. La *stathmine* est aussi une protéine qui joue un rôle dans l'assemblage et le désassemblage. La colchicine est un composé pharmaceutique qui en se liant à la tubuline empêche sa polymérisation en microtubules.

Le désassemblage des microtubules est accéléré par un flux de pulsations de lumière infrarouge, car il dépend de la longueur d'onde. Ce ne sont pas les microtubules eux-mêmes qui y sont sensibles, mais cer-

1. Le guanosine triphosphate est un nucléotide purique utilisée comme substrat pour la synthèse de l'ARN dans la transcription et comme source d'énergie pour la synthèse des protéines = signal de transduction des protéines G ou il est traduit en GDP ou guanosine diphosphate. L'énergie est ainsi stockée dans les liaisons pyrophosphates : la réaction d'hydrolyse de l'adénosine triphosphate en adénosine diphosphate et phosphate est une réaction exergonique : la variation d'enthalpie libre standard est égale à 30 kJ/mol.

tains composants cellulaires sensibles à la lumière, vraisemblablement la paire de centrioles situés dans le centrosome.

Certains isomorphes de tubulines sont importants pour le battement des flagelles et sont présents dans les fuseaux mitotiques précoces, tandis que d'autres isomorphes en sont totalement absents. Ainsi plusieurs isoformes ont des fonctions différentes dans la mitose. Des isoformes particuliers sont essentiels pour l'activité motrice des kinésines, des dynéines impliquées dans le mouvement des chromosomes. La dynéine serait responsable de la traction des microtubules astraux vers le cortex imposant ainsi l'orientation du fuseau mitotique qui est essentielle aussi bien pour les divisions symétriques qu'asymétriques.

Il y a dans la cellule un *Centre Organisateur des MicroTubules*, le *COMT*, constitué d'un *centrosome* entouré d'un ensemble de protéines mal connues avec des granules denses aux électrons à la périphérie. La présence de COMT modifie les propriétés des microtubules. L'extrémité [-] est à proximité de COMT et la [+] est la plus éloignée. La concentration nécessaire à la polymérisation est abaissée et cette baisse ne diminue pas leur longueur, mais leur nombre.

Les microtubules prennent naissance au niveau des centrosomes. Ce centrosome contient deux centrioles disposés à angle droit. Les centrioles sont constitués de deux cylindres de 9 triplets de microtubules où les cylindres forment une espèce de T. Les deux centrioles se séparent et chacun d'eux déclenche la synthèse d'un autre pour reconstituer un centrosome complet. Il « *pourrait* » être d'origine endosymbiotique, mais ne serait ni une bactérie, ni une archéobactérie. Peut-être un spirochète procaryote ?

Les microtubules sont organisés en deux spirales opposées respectivement de 5 dextres et de 8 senestres et les doubles microtubules renferment le *nombre suivant de Fibonacci* de colonnes de tubuline. Ces nombres pourraient jouer un rôle dans leur alternative de polarisation électrique dans la transmission de signaux liés aux variations des forces de Van der Waals ? Les microtubules peuvent être doubles, ou triples, lorsque trois microfilaments communs se trouvent au point de jonction.

Les protéines constitutives existent sous deux formes dans la cellule, sous une forme monomérique soluble dans le cytoplasme ou sous une forme de filaments insolubles. Les filaments se forment au-dessus d'un certain seuil de concentration des monomères, en dessous, ils se dépolymérisent.

Les trois systèmes de cytosquelette animal utilisent les constituants protéiques suivants : 6 actines mammaliennes et plus de 70 protéines liant actine ; 6 tubulines de vertébrés et environ une douzaine de pro-

téines liantes; 31 protéines humaines de filaments intermédiaires et 5 familles de protéines associées...

• Les microfilaments

Ce sont des filaments fins de 9 nm constitués d'actine et parfois ramifiés. Ils sont impliqués dans les mouvements de grande ampleur déformant la structure cellulaire comme la contraction, la migration, les pseudopodes, sauf les mouvements des flagelles et des cils, dont le moteur est la seule tubuline. Leurs polymérisations et dépolymérisations permettent à la cellule de contrôler la fluidité du cytoplasme et de générer des mouvements qui permettent à la cellule de se déplacer grâce aussi à des protéines motrices.

Ils sont constitués d'un cœur d'*actine* associé à des protéines accessoires. Le monomère d'actine est l'*actine G* (pour globulaire). Sa polymérisation produit un brin en forme de double hélice. L'*actine F* (pour filament) est stabilisée par un filament de *tropomyosine* inséré dans le large sillon de la double hélice. Diverses protéines assurent le coiffage du filament en bout de filament pour stabiliser sa longueur. Les propriétés contractiles des filaments d'actine sont dues à une famille de protéines motrices spécifiques, les *myosines* très diversifiées. Le monomère de myosine est constitué d'une longue queue portant deux têtes flexibles à une extrémité, la molécule est en forme de Y. La tête flexible possède un site de liaison à l'actine et un site pour l'ATP et c'est elle qui est responsable de l'aspect moteur de la protéine; la queue ayant une fonction d'ancrage. En présence de calcium et d'ATP, la tête de la myosine s'accroche au filament d'actine et l'hydrolyse de l'ATP provoque la rotation de la tête et sa séparation du filament d'actine. Le départ de l'ADP de la tête de la myosine lui permet de reprendre sa forme initiale. À la fin du mouvement, la molécule de myosine a glissé le long du filament d'actine. Le sens d'accrochage du filament d'actine par rapport à la myosine est polarisé.

Les molécules de myosine forment trois types de structures. Elles se disposent tête-bêche pour former un dimère et des cylindres pour constituer un filament épais comme dans les muscles striés. Les dimères peuvent former un ruban comme dans les muscles lisses et les cellules musculaires. Enfin les minimyosines servent à transporter les organites dans la cellule.

Les *microfilaments* sont inclus dans le réseau sous-membranaire, ce qui permet à la cellule de contrôler sa forme et de participer au déplacement. Il faut y ajouter des filaments d'actine qui ancrés à la membrane plasmique traversent la cellule et sont disposés en réseau pour résister aux forces qui s'exercent dans la cellule; ce sont les *câbles du stress*.

• La dynamique des microtubules

Ils sont à l'origine de multiples mouvements cellulaires, transport axonal, ou la motilité par exemple et surtout ils fournissent le matériau de base pour la constitution du fuseau mitotique.

La présence ou l'absence d'un champ faible, comme la gravité, à un moment critique précoce dans le processus d'auto-organisation, détermine l'état qui va se développer. Les préparations des microtubules s'auto-organisent ainsi spontanément, par des processus de réaction-diffusion. Les morphologies qui se forment dépendent de la présence de la gravité au moment critique précoce du processus. En condition d'apesanteur les microtubules ne s'auto-organisent pas.

La molécule de tubuline est instable par nature. En présence de protéine kinase¹, sa taille s'accroît (polymérisation² GTP indépendante), mais en présence de phosphatase, elle décroît (dépolymérisation par phosphorylation). La phosphokinase *cdk1* est l'agent qui apporte le phosphate qui dépolymérise la tubuline.

Ces filaments sont polarisés, avec un côté [+] qui croît ou se dépolymérise plus vite que le côté [-]. Il existe une plage de concentration pour laquelle le côté [+] croît, alors que le côté [-] décroît, ce qui entraîne une migration du filament à travers la cellule ou le déplacement des filaments les uns par rapport aux autres. C'est ainsi que la différenciation du gamète femelle non mature (oocyte) nécessite le transport des centrioles, des ribosomes et des protéines de l'ARNm de la cellule mère dans le futur oocyte maternel. Ce transport se réalise par le biais des microtubules au travers de canaux en anneaux.

Ce phénomène fondamental crée une sorte de tapis roulant. Polymérisation et dépolymérisation consomment de l'énergie. La cellule contrôle en outre la valeur des seuils assurant la polymérisation ou la dépolymérisation.

Certaines molécules qui consomment de l'énergie appartiennent à l'ensemble des moteurs. Elles possèdent un point d'ancrage sur les filaments et peuvent migrer le long de ceux-ci et un autre point d'ancrage qui leur permet de transporter des protéines et des organites le long du réseau. Si la protéine fixée est un moteur associé à un filament, elle peut organiser la structure du cytosquelette pour déplacer les filaments les uns par rapport aux autres. Cette dynamique du cytosquelette le fait parfois considérer comme des cytomuscles, soit comme le système

-
1. La kinésine-13 régule les microtubules de l'interphase, la dynamique microtubulaire du fuseau mitotique et les flagelles chez le parasite *Giardia intestinalis*.
 2. Formation de grosses molécules (polymères) à partir de petites molécules (monomères).

nerveux de la cellule en raison des influx qui traversent la cellule. En outre les microtubules jouent un rôle majeur dans la transmission axonale de l'influx nerveux. Le centrosome en est considéré comme le « cerveau », les centrioles comme les « yeux », les microplastides comme les « muscles » et les microtubules comme les « nerfs » de la cellule.

● L'exemple du centre du flagelle

Il est formé par un doublet de microtubules enveloppé d'un manchon protéique. Ce doublet est entouré de 9 doublets de microtubules partiellement fusionnés, car reliés entre eux par des bras de dynéine et avec le doublet central par des bras rayonnants. Les flagelles battent par glissement des doublets de microtubules entre eux et c'est la dynéine qui, en hydrolysant l'ATP, assure ce glissement. Les microtubules sont associés à un moteur protéique constitué de kinésine. *Ce moteur utilise les microtubules comme rails pour déplacer les organites* ou d'autres microtubules et sont donc le système majeur de répartition intracellulaire.

● Les gènes impliqués

La famille des actines implique 6 gènes d'actines fonctionnels, plus de 20 pseudogènes et 6 familles de protéines liées à l'actine (*Arps*) codées par 9 gènes. En ce qui concerne les protéines motrices que sont les myosines et les kinésines, on a découvert environ 40 gènes de la myosine et 40 gènes des kinésines. Des traitements avec des drogues ont pu mettre en évidence le rôle des gènes dans la polymérisation et l'accroissement de l'ARNm de la tubuline. L'expression de deux gènes de la bétatubuline (*BTU1*) a été identifiée chez *Tetrahymena thermophila*. Les cellules qui ont un excès de tubuline (15 % chez le gène de la tubuline *TUB3*) sont supersensibles aux drogues de dépolymérisation. Le haut niveau de tubuline [-] cause le désassemblage rapide des microtubules et la mort de la cellule. Mais la cellule est protégée par *Rbl2p* contre les excès de tubuline [-]; elle se lie avec la tubuline [-] et forme un hétérodimère *Pac 10p* qui régule l'expression de la tubuline.

➤ Les étapes de vie de la cellule et de la mitose et le rôle des microtubules

Les cellules banales de notre corps, les *cellules somatiques*, se divisent en deux pour donner deux cellules filles plus petites, strictement identiques au point de vue génétique, selon le mécanisme de la *mitose*. Autrement dit, il n'y a qu'un seul parent qui produit son *clone cellulaire*

et *génétique*, une véritable *cellule jumelle*. Au rythme d'une division toutes les demi-heures, une bactérie peut produire en une seule journée des colonies de millions de bactéries.

Les *cellules sexuelles* suivent une voie différente de division, celle de la *méiose*, c'est-à-dire la formation d'une cellule à l'aide de deux parents génétiquement distincts qui mélangent leurs génomes en constituant un être différent d'eux-mêmes.

► Le rôle de la relativité d'échelle dans la vie cellulaire

Nous avons déjà évoqué la nouvelle mécanique montrant certaines propriétés quantiques macroscopiques qui peuvent être déduites de la relativité d'échelle concernant l'augmentation d'énergie du système dans l'espace standard.

Elle ne se traduit pas comme on pourrait s'y attendre dans une description classique par une augmentation de taille du système, mais par un *changement de structure* se traduisant par une *discontinuité*. L'augmentation d'énergie ne permet pas l'apparition d'une nouvelle structure avant qu'elle n'ait atteint son niveau de quantification naturel suivant, c'est-à-dire le *pic de probabilité* suivant établissant un nouveau seuil. Le système est stationnaire pour les valeurs quantifiées de l'énergie et instable entre ces valeurs, ce qui implique un saut rapide d'une morphologie à une autre, comme cela a été montré dans le chapitre précédent (fig. 1.2).

Par exemple, dans le cas d'un système plongé dans un potentiel d'oscillateur harmonique tridimensionnel isotrope, Nottale a montré que quand l'énergie augmente d'un facteur $5/3$, le système fondamental unique se divise en deux sous-systèmes et un système double apparaît. *C'est une duplication spontanée*. Ce phénomène nous intéresse ici très directement puisque dans le vivant, les duplications sont multiples et à diverses échelles, notamment au niveau de la division cellulaire. Ils se manifestent alors au moment de la réplication de l'ADN du génome, de la duplication de certains gènes et lors de la duplication de la cellule où avec la duplication du centrosome, apparaît en outre avec le *fuseau mitotique* ce qui pourrait être une *manifestation quantique macroscopique* de relativité d'échelle : *une telle hypothèse de travail pourra être testée par des expériences futures*.

► Les étapes du cycle cellulaire

Plusieurs étapes ont été identifiées pour décrire la vie cellulaire¹.

► Les étapes clés de la division cellulaire somatique asexuée, la mitose

Plus de 20 étapes ont été distinguées pour décrire la division cellulaire des cellules non sexuelles ou somatiques de l'organisme, la *mitose*. C'est une reproduction asexuée². *La cellule mère se divise en donnant deux cellules filles qui seront génétiquement identiques*. Le gène *CDC2* intervient

1. **Phase G0.** Période de repos, dite de quiescence, plus ou moins longue où la cellule est en repos non prolifératif. Ces cellules dites diploïdes contiennent $2n$ chromosomes.

Phase G1. Phase la plus longue et la plus variable selon les cellules, durant de 90 minutes à plusieurs jours. Ce temps est inversement proportionnel au taux de prolifération. Lorsque les conditions externes ne sont pas favorables, les cellules s'arrêtent en G1. La cellule s'accroît en taille et fabrique les protéines cytoplasmiques qui seront ensuite divisées pour les cellules filles.

Phase S de réplication de l'ADN. De durée variable, de quelques minutes pour les cellules embryonnaires à quelques heures pour les cellules somatiques. Pendant cette phase, la cellule continue à transcrire activement les protéines dont la cellule a besoin pour survivre et maintenir les fonctions spécialisées. Le centrosome nécessaire à la migration des chromosomes se dédouble également. Ils migrent alors autour du noyau et se positionnent de façon symétrique aux pôles de la cellule.

Phase G2. C'est la phase séparant la synthèse d'une copie de l'ADN nucléaire de la séparation physique des deux cellules. Sa durée est constante et courte, de quelques heures (3 à 4h). Il s'agit d'une phase automatique. Les cellules entrées en *phase S* aboutissent toujours à la *phase M*. C'est une phase de contrôle de la bonne transcription du matériel génétique impliquant des gènes et des protéines importantes pour le bon déroulement de la mitose.

Phase M. de division cellulaire. C'est la mitose décrite ci-dessous, la division cellulaire où l'ADN passe de $4n$ à $2n$. Sa durée très courte est inférieure à 1 heure.

2. **Interphase.** Les chromosomes ne sont pas individualisés. Le matériel génétique est sous la forme de chromatine. Le centrosome MTOC ou COMT est composé de deux centrioles perpendiculaires entourés de matériel péricentriolaire. Le centrosome a été dupliqué en fin d'interphase. Ici intervient le processus de duplication dans l'espace-temps standard.

Début Prophase. Les chromosomes s'individualisent.

Suite 1 Prophase. Les chromosome s'épaississent et se raccourcissent (ex. : $2n = 4$; deux maternels et deux paternels). Chaque chromosome est constitué de deux chromatides qui restent liées entre-elles aux niveaux des centromères kinétochores.

Suite 2 Prophase. Chromosomes courts et épais. Les deux centrosomes vont se séparer.

Suite 3 Prophase. Les deux centrioles accompagnés de microtubules rayonnants constituent les asters qui migrent vers les deux pôles de la cellule en se repoussant l'un l'autre grâce à des moteurs agissant sur les microtubules chevauchant.

Suite 4 Prophase. Les deux asters sont aux deux pôles opposés. Les microtubules émis par chacun d'eux les maintiennent en place et constituent le fuseau mitotique. Des microtubules de même type existent évidemment dans les autres plans de l'espace.

Suite 5 Prophase. La membrane nucléaire disparaît. Les chromosomes ne sont plus dans le noyau, mais emprisonnés dans la cage constituée par les fibres tutoriales.

Prométaphase début. La membrane nucléaire a complètement disparu. De nombreux microtubules dynamiques sont polymérisés à partir des deux pôles.

en codant une protéine-kinase qui contrôle d'une part l'entrée en mitose, mais intervient également dans l'entrée en phase S¹.

Prométaphase 1. Ces microtubules s'allongent en direction des chromosomes. Lorsque l'un d'eux rencontre un centromère kinétochore d'un chromosome, il le capture par attachement unipolaire, tandis que les autres microtubules continuent de chercher des centromères libres.

Prométaphase 2. Le chromosome est capturé par un autre microtubule venant de l'autre aster. L'attachement du chromosome au fuseau est maintenant bipolaire.

Prométaphase 3. Par le jeu des polymérisations et des dépolymérisations des microtubules et grâce à des moteurs, le chromosome capturé est placé à l'équateur. Le chromosome migre le long du microtubule vers le centrosome puis s'en éloigne, trouvant une position d'équilibre au niveau de la plaque métaphasique. En fait 15 à 40 microtubules s'attachent au kinétochore d'un chromosome de mammifère.

Prométaphase 4. Un autre chromosome est capturé.

Prométaphase 5. Il est placé à son tour à l'équateur.

Prométaphase 6. Le dernier chromosome vient d'être capturé de manière unipolaire et les autres chromosomes déjà positionnés l'attendent. La séparation des chromosomes répliqués ou chromatides est bloquée tant que tous les chromosomes ne sont pas tous capturés, alignés et reliés aux deux pôles. Un chromosome mal attaché envoie un signal inhibiteur.

Métaphase. Tous les chromosomes sont placés à l'équateur du fuseau et constituent la plaque équatoriale. Les signaux inhibiteurs des chromosomes sont éliminés. L'ensemble est vérifié par un « Check up » et attend un signal pour déclencher l'anaphase.

Anaphase début. D'un seul coup, tous les kinétochores se séparent. Les microtubules attachés aux kinétochores se dépolymérisent et les chromosomes suivent un mouvement vers les pôles grâce à leurs moteurs.

Anaphase 1. Les deux lots de chromatides, qui maintenant sont bien individualisés, sont des chromosomes qui gagnent les pôles du fuseau en remontant le long des microtubules. Lorsque les chromatides se séparent, les kinétochores agissent comme des kinésines et transportent les chromatides vers le pôle positif. On retrouve au niveau de ces kinétochores un moteur protéique régulé par une phosphatase de type 1.

Anaphase 2. Les deux lots de chromosomes sont rassemblés aux pôles car ils sont guidés par la cage formée par le fuseau lui-même. Un cercle de fibres contractiles (de l'actomyosine) apparaît autour de la cellule dans le plan de l'équateur.

Télophase début. Ces fibres se contractent et réalisent une *sphincter* qui resserre le diamètre de la cellule au niveau de l'équateur. (Voir un comportement de ce type dans le modèle de duplication développé en relativité d'échelle, cf. fig. 4.26).

Télophase 1. Le processus se poursuit et la cellule se partage en deux progressivement.

Télophase 2. La cellule est presque entièrement partagée et la membrane nucléaire se reconstitue autour de chaque lot de chromosomes.

Télophase fin. Les chromosomes se décondensent progressivement.

Deux cellules. Les chromosomes poursuivent leur décondensation. Chaque chromosome fils est constitué d'une seule chromatide, alors qu'au début de la mitose chaque chromosome était formé de deux chromatides. Les cellules vont poursuivre leur cycle et parfois après la duplication de leur ADN entrer à leur tour dans une phase mitotique suivante. À titre d'exemple, les cellules de la levure *Schizosaccharomyces pombe* se divisent toutes les 3 h à 50°.

1. Cette découverte des clés universelles de la division cellulaire a valu à P. Nurse, L. Harwell et T. Hunt le prix Nobel de médecine 2001.

► Les étapes clés de la division cellulaire des cellules sexuelles, la méiose

Contrairement à la mitose, la division des cellules sexuelles ne donne pas naissance à deux cellules filles génétiquement identiques, mais à deux cellules génétiquement différentes par le mélange des génomes du père et de la mère. La méiose aboutit à la production de gamètes (spermatozoïdes mâles et ovocytes femelles), des cellules haploïdes (à n chromosome), à un *chromatide*¹, destiné à la reproduction sexuée.

On distingue dans la méiose deux divisions successives d'une cellule diploïde. La première division appelée *méiose réductionnelle* se déroule en quatre phases². La seconde division en quatre phases est dite *méiose équationnelle*³. Autrement dit la méiose aboutit à 4 cellules génétiquement différentes.

► Le fuseau mitotique de la mitose ou de la méiose

Il intervient dans la mitose ou la méiose pour séparer les deux jeux de chromosomes entre les deux cellules filles. Avant cette mitose, les structures microtubulaires cellulaires se dépolymérisent, cils et flagelles compris. Au départ, *l'aster*, situé à proximité du noyau, se divise et chaque *aster* se déplace à une extrémité de la cellule, aux deux pôles du fuseau, en filant derrière eux le fuseau mitotique. Chaque *aster* est en réalité un *centrosome*, ayant un aspect en étoile en raison du fait que tous les centres de nucléation (là où les microtubules poussent) sont occupés. Les autres filaments rayonnants sont les *fibres astrales*. Le centrosome est constitué de deux centrioles perpendiculaires l'un à l'autre

-
1. Une chromatide est une molécule d'ADN en forme de bâtonnet, le nucléofilament.
 2. **Prophase I** : L'enveloppe nucléaire disparaît et la chromatine se condense en chromosomes qui s'apparient deux à deux avec des brassages intra-chromosomiques, le crossing-over. Le résultat en est $2n$ paires de chromosomes à 2 chromatides reliées par le centromère.
Métaphase I : Les paires de chromosomes homologues se détachent et vont se positionner de part et d'autre du plan dit équatorial cellulaire, cela se réalise au hasard et constitue un nouveau brassage inter-chromosomique.
Anaphase I : chacun des chromosomes s'écarte de son homologue et se dirige vers le pôle opposé du faisceau mitotique, entraîné par les phénomènes de polymérisation/dépolymérisation des filaments d'actine.
Télophase I : la cellule se divisant en deux, forme deux cellules haploïdes à n chromosomes à deux chromatides.
 3. **Prophase II** : Après la disparition des enveloppes des chromosomes la chromatine se recondense et correspond à une chromatide divisée par deux.
Métaphase I : Les chromosomes se placent sur la plaque équatoriale du faisceau mitotique avec leur centromère à l'équateur.
Anaphase II : les chromatides de chacun des chromosomes sont entraînés vers les pôles opposés du faisceau mitotique.
Télophase II : La cellule se divise en deux formant deux nouvelles cellules à n chromosome et à 1 chromatide.

et chaque centriole est constitué de 9 groupes de trois microtubules. Les microtubules internes sont complets, mais les microtubules médians et externes sont incomplets. Un système central et des rayons associent les différents groupes de microtubules. En outre les microtubules internes sont reliés aux microtubules externes d'un autre groupe. Le centrosome est entouré d'un matériel péri-centriolaire qui constitue le centre organisateur des microtubules. C'est à partir de là que s'effectue la nucléation des microtubules construits à partir de ce centre.

Les filaments du fuseau mitotique vont se fixer par leur extrémité [+] à une structure particulière du centromère des chromosomes condensés, le *kinétochore*¹. Chaque kinétochore reçoit une quarantaine de filaments.

Quand tous les centromères des chromosomes sont fixés à des microtubules, les deux chromatides de chaque chromosome se séparent. Les microtubules se rétractent et entraînent les chromatides avec elles. Ce sont les chromatides qui migrent le long du microtubule, grâce aux molécules des kinésines présentes dans le kinétochore, le filament se dépolymérise juste derrière lui.

On connaît les gènes impliqués puisque le *mutant tub1-729* empêche l'attachement entre les microtubules et les kinétochores, et que le *mutant tub1-724*, sensible au froid bloque l'apparition des microtubules.

À la fin de la mitose, les deux jeux de chromosomes sont séparés, chacun à une extrémité de la cellule. *Le fuseau mitotique se désorganise et la tubuline va servir à reconstruire le cytosquelette des deux nouvelles cellules filles*. Après la séparation des cytoplasmes, la cellule reconstitue toutes ses structures microtubulaires (flagelles et cils).

La séparation des deux cellules-filles se réalise par des fibres formant un *sphincter* qui, en se contractant, resserre le diamètre de la cellule au niveau de l'équateur et les sépare en deux. Un comportement de ce type existe dans le modèle de duplication développé en relativité d'échelle (voir les fig. 1.2 et 4.26).

En résumé de ce long paragraphe technique, on peut faire l'hypothèse, à mettre à l'épreuve dans des analyses théoriques et expérimentales futures, que les multiples divisions, ou *duplications*, qui interviennent dans les cellules, notamment au moment crucial de la division cellulaire, ne font qu'exprimer *les potentialités physiques de la relativité d'échelle dans l'espace ordinaire*. Lorsque l'énergie cellulaire atteint un certain seuil quantifié, elle entraîne spontanément une duplication du système plutôt qu'une augmentation de sa taille.

1. Le kinétochore est un complexe de protéines qui s'assemble sur le centromère.

Dans ce cadre, la forme du fuseau mitotique pourrait représenter, à une grande échelle, une autre manifestation relativiste d'échelle, celle de la répartition macroscopique idéalisée des géodésiques fractales entre deux points particuliers de l'espace-temps non différentiable. Ici les chromatides suivent, grâce aux microtubules, les cheminements les plus probables des lignes constituant le fuseau mitotique se déduisant d'une équation de Schrödinger généralisée et s'exprimant selon la courbure de l'espace-temps fractal, mais ici à l'échelle cellulaire, après sans doute l'optimisation réalisée par la sélection naturelle. Il faut noter ici, que la division cellulaire, qui ferait ainsi intervenir la structuration quasi-quantique macroscopique peut se réaliser grâce aux propriétés d'auto organisation des microtubules où intervient la présence ou l'absence, d'un champ faible, comme la gravité, à un moment critique, précoce dans le processus, qui en détermine l'état et enclenche spontanément des processus de réaction/diffusion. La sélection naturelle agit sans doute dans ce phénomène comme le prouve le fait qu'en apesanteur, cette auto-organisation ne se réalise pas.

Du niveau cellulaire, passons au niveau d'intégration supérieur, celui des organismes pluricellulaires ou des organes.

Le niveau d'organisation des organes et des organismes pluricellulaires

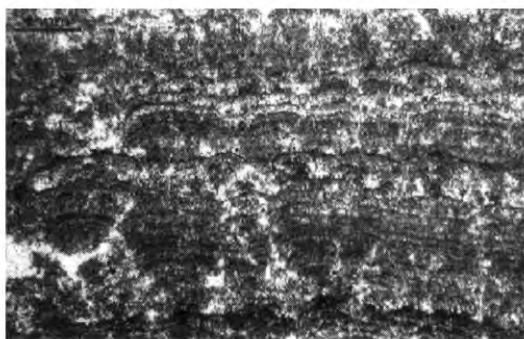
Nous avons vu que les formes ayant une taille comprise entre 40 et 100 μm étaient soumises aux contraintes de la *tension superficielle*, de la *viscosité* et du *mouvement brownien*, mais que la *gravité* était négligeable à ces tailles. Par contre les formes de taille supérieure à 100 μm sont soumises à la *gravité* et aux contraintes d'*exploitation des sources d'énergie*, que ce soit la lumière ou les proies. Nous avons vu que les tailles entre 100 μm et 1 000 μm (= 1 mm.) renferment peu d'organismes et que la plupart des organismes pluricellulaires ont des tailles comprises entre 1 mm et une centaine de mètres chez la baleine. Soumis à la gravité, ils présentent une *polarité verticale* avec un dessus, un dessous, un haut, un bas, une face et un dos. La gravité nécessite une base d'autant plus solide, que l'organisme est plus lourd. La raison de cette répartition peut s'expliquer par des contraintes physiques incluant celles de la relativité d'échelle. Elle pourrait exprimer de fait, l'existence probable de pics de probabilité faisant intervenir les paramètres de contraintes gravitaire et énergétique au sein de l'équation de Schrödinger généralisée dans l'espace standard (pic 1 entre 0-100 μm et pic 2 entre 1 000-100 000 mm, les organismes, dont la taille varie entre 100 et 1 000 μm , étant beaucoup moins probables).

► Les structures fractales au niveau des populations cellulaires ou des organes

La relativité d'échelle se manifeste à ces échelles essentiellement par des *structurations fractales*. Ces structures fractales biologiques correspondent généralement à des systèmes ou organes¹ construits par des *successions de bifurcations* qui se manifestent, soit dans la formation d'une *géométrie autosimilaire* des organes, soit dans l'*évolution temporelle* de la *physiologie* de ces organes.

• Les structures des colonies de bactéries

La mise en culture de bactéries se réalise dans une boîte de Pétri sur un substrat nutritif, un gel d'agar avec peptone. La croissance des colonies de bactéries s'effectue selon un processus ressemblant au système de *croissance d'agrégats limités par la diffusion* (système DLA), connu en physique et en chimie dans la solidification et les dépôts électrochimiques. On passe ainsi d'un individu à une colonie dont le motif a une dimension fractale de 1,72 ; une dimension déjà évoquée et désormais classique que l'on retrouve souvent dans le vivant.



1. Un organe est constitué d'un ensemble de petites structures qui sont « organisées » en systèmes et chargées de réaliser une fonction donnée comme l'élimination des déchets par les reins, la circulation sanguine par le système cardio-vasculaire, la respiration par les poumons, etc.

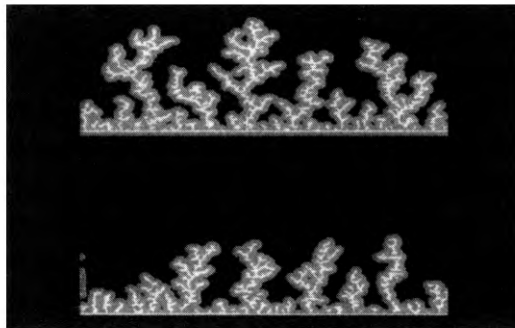


Figure 2.11. Stromatolithes et simulations de stromatolithes.

1. Stromatolithes fossiles du Maroc avec des concrétions calcaires superposées en lamelles ondulantes (coussinets). 2. Leur croissance peut être simulée par des modèles aléatoires d'agrégation par diffusion limitée (système DLA-CA Growth). 3. Cette simulation entraîne le développement de groupements dendritiques identiques à ceux de la nature (d'après Verrecchia, 1996).

Certaines bactéries, qui vivent dans les mares d'eau périodiquement asséchées, produisent un dépôt de calcaire. Les diverses couches superposées de calcite forment de véritables roches, qui se conservent à l'état fossile ; ce sont les *stromatolithes*. Eric P. Verrecchia en 1996 a montré que les couches superposées se répartissent selon une loi de puissance dont la dimension fractale est égale à 1,73 et il a pu simuler la croissance de ces stromatolithes par un processus stochastique d'itérations successives (fig. 2.11). Pattisina et Verrecchia (2002) ont simulé leur croissance par de nouveaux modèles aléatoires d'agrégation par diffusion limitée (système DLA-CA Growth).

Certaines amibes, telles *Dictyostelium discoideum*, en l'absence de nourriture changent de structure d'organisation. Martiel et Goldbeter en 1987 ont montré qu'au lieu d'être isolées, les amibes s'agrègent pour former un long fil spiralé grâce à la synthèse d'une molécule (*cAMP* : *adésine monophosphate cyclique*) dont la forte concentration a la propriété d'attirer les amibes. Selon Lombry, certaines autres peuvent former une entité qui ressemble à un ver, mais avec une structure non linéaire.

• Les morphologies végétales

La répartition des cellules dans un organisme végétal (concombre, framboise, asperge, etc.) a le plus souvent une distribution qui est fractale. Les ramifications des végétaux, des arbres et des plantes, ainsi que celles des racines suivent des lois de puissance et ont souvent une structure fractale. Les exemples ne manquent pas. Galilée avait utilisé les lois de puissance pour expliquer que les arbres ne pouvaient pas

monter jusqu'au ciel¹. Si on multiplie hauteur et diamètre par 2, le poids est multiplié par 8. Il a ainsi montré que la limite théorique de la taille d'un arbre était d'environ 150 m, taille que peuvent atteindre les plus grands arbres du monde, les séquoias et les eucalyptus avec leur hauteur record de 127 m.

Léonard de Vinci qui s'était également intéressé à la représentation mathématique des arbres avait montré que le diamètre du tronc initial était égal à la somme des diamètres des branches issues de la première bifurcation². L'exposant du diamètre est égal à 2 chez les arbres. Il faut également prendre en compte l'angle *alpha* fait par les deux branches à leur bifurcation. Selon les valeurs de l'angle *alpha*, on peut simuler toutes les formes d'arbres existant dans la nature. C'est-à-dire que la nature a exploité, au gré des mutations de la phyllotaxie, les meilleures formules de répartition des branches et des feuilles. Nottale a calculé, en 1980, la structuration fractale du sureau noir. Cet arbre se développe par des bifurcations régulières successives s'effectuant selon un rapport d'échelle constant égal à 1,41 (racine de 2) (fig. 2.12).

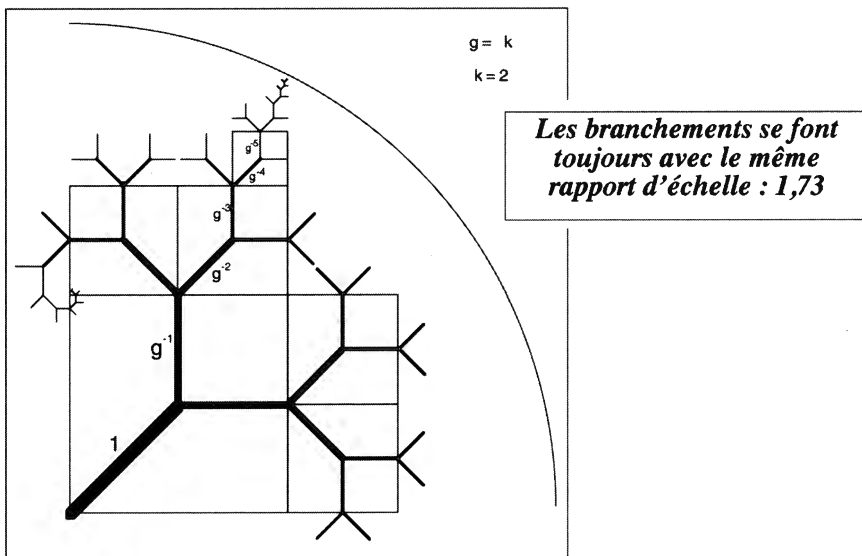


Figure 2.12. Sureau noir (d'après Nottale, 1980).

Cet arbre se développe par des bifurcations régulières successives s'effectuant selon un rapport d'échelle constant égal à 1,41 (racine de 2) (d'après Nottale, 1980).

1. Un tronc de hauteur « *h* » et de diamètre « *d* » a un poids égal à « hd^2 ».
2. L'équation très simple qui relate cette relation entre les diamètres est la suivante : $D0 = D1^a + D2^a$ où l'exposant du diamètre est *alpha* (a).

On a constaté que la symétrie d'ordre 5 existe uniquement pour la matière vivante, chez les fleurs, les échinodermes (crinoïdes, étoiles de mer, oursins irréguliers, etc.) : cette symétrie 5 est une véritable caractéristique du vivant, puisqu'elle est absente dans le monde des cristaux, où son impossibilité semblait démontrée. C'est pourquoi, la découverte en 1984, par D. Levine et P. Steinhardt, d'un solide possédant à la fois les caractéristiques d'un cristal et cette symétrie 5, a mené à la notion de « *quasi-cristal* ». Ce phénomène très paradoxal montre l'existence d'objets non-périodiques. Si l'on coupe la pente du réseau par une droite, on obtient une séquence de segments courts et longs qui suivent une répartition non périodique de Fibonacci !

Les fougères sont un autre très bel exemple de structure fractale. Sur la fougère mâle, on observe trois niveaux de morphologies autosimilaires de taille décroissante, constitués par une tige centrale portant latéralement des tiges de plus petite taille portant elles-mêmes des feuilles.

Les choux-fleurs sont un autre exemple classique de structures fractales. L'un des exemples le plus spectaculaire est la variété de chou-fleur Romanesco (fig. 2.13). Globalement, il se présente comme constitué de cônes disposés selon deux spirales opposées. Ces spirales opposées, décrites en premier par Fibonacci, qui partent de la pointe du chou-fleur, sont constituées de cônes de plus en plus grands à mesure que l'on s'éloigne de cette pointe. Chaque cône des spirales est lui-même constitué de deux spirales opposées de cônes qui deviennent de plus en plus grands en partant de la pointe du cône, et ainsi de suite de façon autosimilaire.

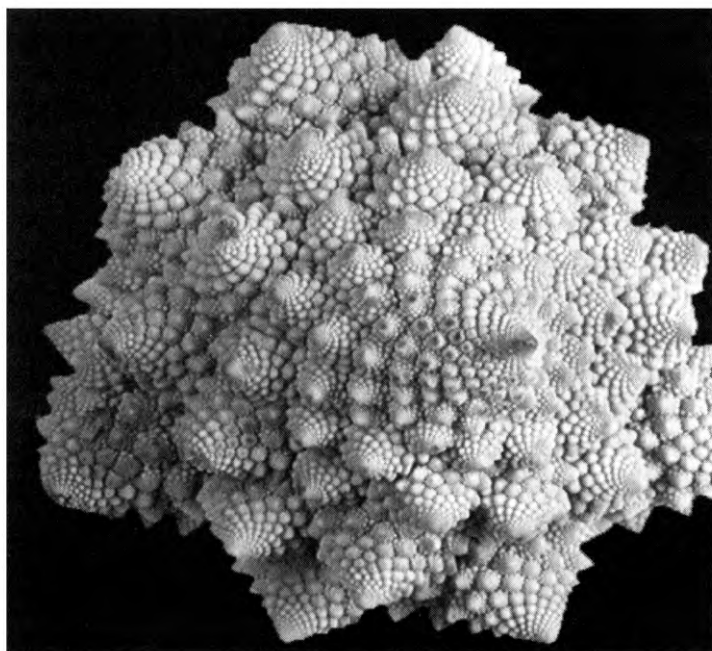


Figure 2.13. Chou-fleur Romanesco.

Ce chou-fleur présente une structure fractale typique. On observe à partir du sommet, une double spirale primaire (opposée) de cônes de plus en plus gros, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sommet. Ces cônes sont eux-mêmes, constitués de cônes secondaires, disposés en spirale, depuis les plus petits jusqu'aux plus grands. Ces derniers cônes présentent la même structure en cônes tertiaires. On distingue donc le même motif, à trois échelles différentes d'observation, depuis la plus grande à la plus petite. Cette configuration correspond à une structure fractale typique autosimilaire, puisque le même motif s'observe aux diverses échelles de la structure. (Cliché F. Gasquez, Trans'ytipal, UMR CNRS 5561, Bio-géosciences, Dijon.)

Ces structures coniques sont parfaitement autosimilaires à trois échelles successives visibles. C'est-à-dire qu'elles ont une forme identique, à la taille près. Lorsqu'on les coupe en deux, les choux-fleurs présentent en général 13 branchements successifs se faisant selon le même rapport d'échelle, leur dimension fractale étant liée au rapport de dilatation, ou d'homothétie¹.

Nous avons déjà vu, que le nombre de pétales des fleurs suivait le plus souvent la suite de Fibonacci, avec semble-t-il, une *optimisation de certaines répartitions*, sans doute retenues par la sélection naturelle. Des spirales identiques à celles des choux-fleurs sont visibles sur d'autres fleurs comme les tournesols avec 21 spirales dans un sens et 34 dans l'autre, les marguerites et les cônes de pin, etc.

1. $D = \log 13$ (13 branches) / $\log 3$.

• Application de la relativité d'échelle au végétal

La relativité d'échelle a permis de simuler la *morphogenèse d'une structure florale* comme solution d'une équation de la dynamique de croissance sous des conditions de fractalité et d'irréversibilité locale. Une telle équation, après changement de variable, prend la forme d'une équation de Schrödinger généralisée. Un nouveau changement de variable la transforme en système d'équation de la mécanique des fluides classique, mais incluant un « potentiel quantique » supplémentaire. Cette approche rejoint ainsi celle de Fleury, mais avec la possibilité d'évolution ponctuée apportée par l'existence de ce potentiel. Les formes obtenues auront ainsi tendance à passer d'un plan d'organisation à un autre plutôt que de se déformer de manière continue. Nottale en 2001 a pu décrire un processus de croissance à partir d'un centre, avec une brisure de symétrie haut-bas et avec une force constante dirigée vers le bas. Les pétales, les sépales et les étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale (fig. 1.22 ; voir aussi la fig. 4.24). Cette structure florale existe dans la nature, ce sont les fleurs d'un arbre appelé le *Tulipier de Virginie* (*Liriodendron tulipifera*), une Magnoliacée. En inversant le paramètre de la force constante dans l'équation de Schrödinger, Nottale a obtenu une courbure des pétales (fig. 2.14 en haut). Or cette morphologie existe dans la nature, c'est celle d'une fleur banale de nos jardins, la *Campanule à grandes fleurs* *Platycodon* (*Platycodon grandiflorus* ou *grandiflora*) ; Campanulacée originaire d'Extrême-Orient (fig. 2.14 en bas). Ce qui est étonnant dans cette simulation mathématique (fig. 4.24), c'est que les changements de paramètres réalisés aboutissent à deux fleurs appartenant à des familles différentes et très éloignées phylogénétiquement. C'est cette morphogenèse florale obtenue à partir de *l'équation de Schrödinger généralisée* que nous avons choisie pour rendre hommage à Erwin Schrödinger en lui dédiant ce livre *Des fleurs pour Schrödinger*.

Quelle conclusion peut-on tirer de cette simulation ? Elle suggère que certaines *morphologies florales* pourraient être les expressions de contraintes physiques majeures auto-organisatrices, en particulier des *solutions particulières de l'équation de Schrödinger généralisée dans l'espace des échelles*. Selon les valeurs des paramètres, la morphologie florale résultante pourrait même appartenir à des familles végétales distinctes, comme ici aux Magnoliacées ou aux Campanulacées en faisant varier un seul paramètre.

Cette découverte suggère également que la répartition des pétales, des sépales et les autres variations des organes floraux de la phyllotaxie, dont nous avons vu qu'ils se répartissaient selon *la suite de Fibonacci*,

« pourrait correspondre » à des solutions de l'équation de Schrödinger généralisée s'exprimant selon des pics de probabilité optimisés par la sélection naturelle.

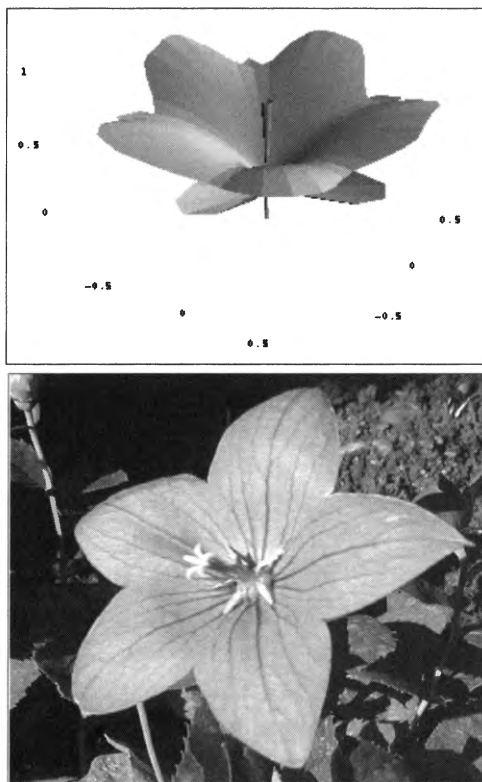


Figure 2.14. Simulation d'une Campanule à grandes fleurs, Platycodon (Platycodon grandiflorus ou grandiflora) et sa réalisation dans la nature.

En haut, solution d'une « équation de Schrödinger » décrivant un processus de croissance à partir d'un centre avec une brisure de symétrie haut-bas et une force constante vers le bas. Les pétales, sépales et étamines émergent tous de la même solution et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale. Ici, la force constante de tension a été inversée ce qui détermine une courbure (d'après Notatale, 2001). En bas, la fleur de Platycodon de nos jardins ressemblant au modèle théorique (© cliché J. Chaline).

• Les morphologies animales

Les structures fractales sont très nombreuses parmi les morphologies animales. La raison en est simple ; elles permettent d'augmenter les surfaces de façon maximale dans un espace réduit. C'est la raison de leur présence dans les organismes vivants où les phénomènes de surface sont essentiels pour faciliter les échanges entre les divers systèmes, par exemple entre l'atmosphère et le système sanguin.

* **Les invertébrés** présentent de nombreuses structures fractales facilement identifiables. Les méduses ont des bras dont les bifurcations suivent des lois de puissance. Il en va de même des systèmes des canaux gastrovasculaires des Automéduses (Scyphozoaires). Les animaux coloniaux comme les coraux dits « *brocoli* » de la grande barrière d'Australie, ont des ramifications fractales. Basillais avait montré, en 1997, que les colonies de coraux (*Pocillopora*, *Acropora*, *Porites*) se développant sur les pentes externes de l'atoll de Tikehau en Polynésie Française, possédaient une dimension fractale voisinant 2,64. Les spécialistes des formes fossiles et actuels des coraux¹ ont montré que chaque espèce avait une dimension fractale caractéristique. C'est ainsi que Martin-Garin, Lathuillière, Verrecchia et Geister (2007) ont utilisé les dimensions fractales pour caractériser non seulement la forme des coraux mais aussi pour quantifier la plasticité phénotypique des organismes dans leurs divers environnements (fig. 2.15 et 2.16).

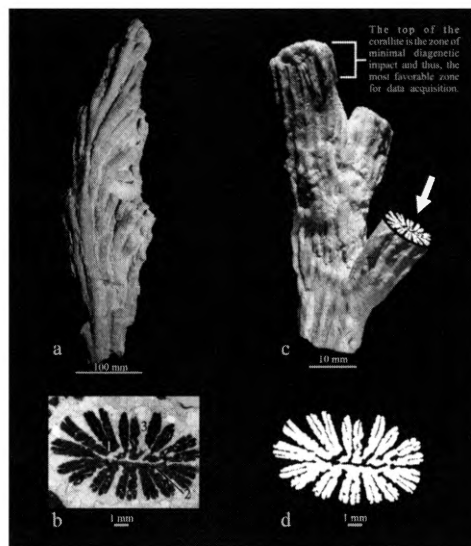


Figure 2.15. Coraux.

Morphologie caractéristique des coraux du Jurassique supérieur *Aplosmilia spinosa*. a : sommet d'une colonie (Euville, Lorraine, France) ; b : détail d'un corail en coupe transversale (Pagny-sur-Meuse, France) ; c : détail des structures internes du corail visible (flèche blanche) ; d : image Bitmap des interfaces entre le squelette et le corps mou du polype (d'après Martin-Garin et al., 2007).

1. Cnidaires fixés ou Anthozoaires à symétrie radiée de type 6 (Hexacoralliaires à 6 tentacules ou un multiple) ou 8 (Octocoralliaires à 8 tentacules).

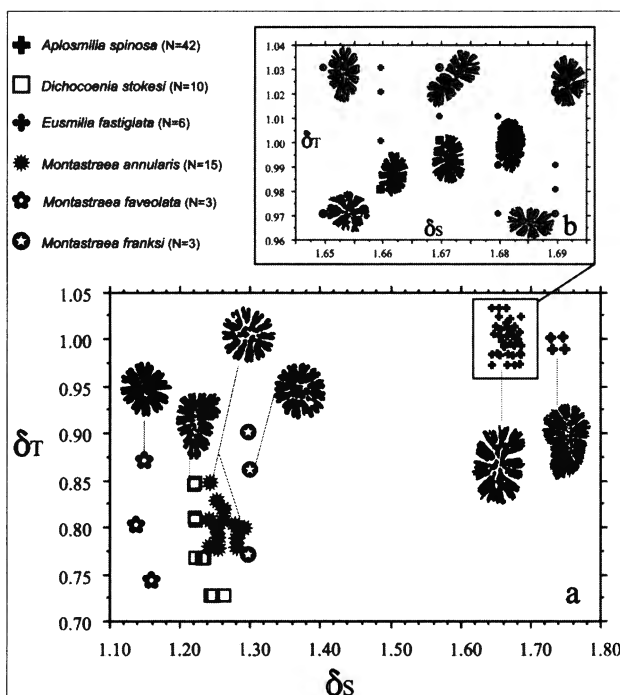


Figure 2.16. Coraux.

Dimension fractale structurale (axe des x) versus dimension fractale texturale (axe des y). a : les individus d'une même espèce sont groupés pour une dimension fractale structurale donnée. Deux groupes sont identifiables et séparés (1) Eusmilia et Aplosmilia à la morphologie la plus complexe et (2) Dichocoenia et Montastraea ; b : détail de la répartition d'Aplosmilia montrant la variabilité intra-spécifique et intra-coloniale (d'après Martin-Garin et al., 2007).

Les tentacules des holothuries (*Cucumaria planci*), des échinodermes mous, l'agencement des ventouses des pieuvres et des poulpes, le bourgeonnement arborescent des colonies de bryozoaires¹ (*Lophopus*, *Plumatella*, *Fredericella*), les palettes en godets des mollusques bivalves (tarets : *Bankia*), les piliers et pseudo-piliers des rudistes créacés (*Vautrina syriaca*), invertébrés actuellement disparus, les variations des sinus palléaux des brachiopodes (*Terebratulina*, *Tegulorhynchia*, *Orthostrophia*), ainsi que la répartition des écailles sur les ailes des papillons, constituent autant de structures fractales qui ont été sélectionnées par la sélection naturelle.

On observe sur les coquilles des mollusques de *Conus thalassiarachus*, d'*Olivia porphyria* et de *Cymbolia innexa* une structure fractale particulière décrite mathématiquement au début du XX^e siècle, celle des triangles de Sierpinski (fig. 2.17). Comment une telle structure peut-elle être pro-

1. Étymologie : animaux-mousse.

grammée génétiquement? Le système neurosecrétoire du mollusque aquatique génère la diversité des structures de la coquille et de ses motifs de pigmentation. Fowler et al. (1992), ainsi que Boettiger, Ermentrout et Oster en 2008, ont montré que tous les motifs résultaient de la combinaison de trois types de bifurcations : bifurcations de Turing et d'Hopf, et propagation d'onde et de collisions, qui trouvent leur origine dans les nœuds des bifurcations.

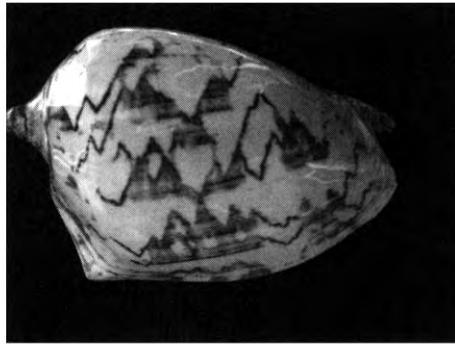


Figure 2.17. Coquille de *Conus thalassiarachus* des océans Pacifique et Indien.

Quel peut bien être le mécanisme génétique qui a permis de faire apparaître cette structure fractale des triangles de Sierpinski sur la coquille du mollusque ? (© cliché J. Chaline). Selon Fowler et al. 1992, et Boettiger et al., 2008, le système neuro-secrétoire du mollusque aquatique génère la diversité des structures de la coquille et de ses motifs de pigmentation. Ils ont montré que tous les motifs résultaient de la combinaison de trois types de bifurcations : bifurcations de Turing et d'Hopf, et propagation d'onde et de collisions, qui trouvent leur origine dans les nœuds des bifurcations.

*** Les oiseaux.** Ceux qui ne volent pas comme les autruches et les manchots actuels, ont seulement des plumes symétriques. Les plumes de grande taille permettant de voler, les rémiges, ont la particularité d'être dissymétriques (dans le rapport proche de $1/3-2/3$) et d'avoir une structure autosimilaire assurant une plus grande portance par la surface développée de cette façon. Cette dissymétrie permet aux plumes de s'orienter de la même façon. *Sans plumes fractales dissymétriques, pas de vol !* Lorsque l'on considère les ancêtres des oiseaux, les dinosaures compsognathidés (comme *Sinosauropteryx*), ils avaient des téguments ressemblant au duvet que l'on trouve sous les grandes plumes des oiseaux, mais ils ne pouvaient pas voler. Les premiers dinosaures à avoir de vraies plumes tels *Caudipteryx* et *Protarchopteryx*, ne leur permettaient pas de voler, car elles étaient symétriques.

*** La peau et les glissements d'organes.** Les travaux du Dr. Jean-Claude Guimberteau, chirurgien, sur les systèmes de glissement des organes, réalisés en utilisant des video-endoscopes à fort grossissement pendant les actes opératoires, ont mis en évidence, chez le vivant, une architecture sous-cutanée faite de liens collagéniques en réseaux et des modifications ultrarapides du *tramage collagénique à comportement chaotique et fractal*¹. Chaque volume interfibrillaire de l'ordre de quelques dizaines de microns, à tendance fractale, a une forme pseudopolyédrique de type hexa, penta ou tétragonal (fig. 2.18). Les fibrilles de collagènes de 10 μ de diamètre environ ont des mouvements entre elles, permettant de changer la forme du polyèdre « dans l'instant » avec des comportements imprédictibles, non linéaires et de type chaotique. Sans cette structuration inter-organe, auto-réorganisable instantanément, la peau des mammifères n'aurait pas la souplesse qu'on lui connaît et les organes ne glisseraient pas facilement les uns par rapport aux autres lors de nos mouvements.

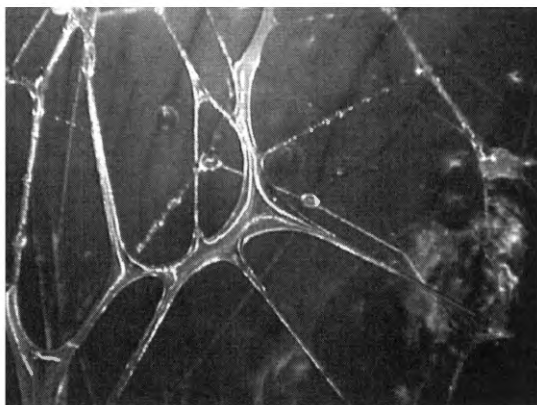


Figure 2.18. Tissus interstitiel .

Système de glissement intermusculaire assurant la continuité tissulaire entre les muscles et participant aussi à leur trame architecturale (d'après J.-C. Guimberteau, 2004).

*** Les poumons.** Les poumons sont un organe vital qui permet d'extraire l'oxygène de l'air. Chez les poissons, cette fonction d'extraction de l'oxygène de l'eau est réalisée par des *branchies*. Ce sont des groupements de vaisseaux sanguins rassemblés en lamelles épithéliales serrées sur les arcs branchiaux, qui constituent une grande surface d'échange dans une cavité située à l'arrière de la bouche. Certains poissons, les Dip-

1. Voir son film : *Promenades sous la peau*. 2004.ADF Video Productions.

neustes du Dévonien (-370 Ma.) possèdent des poumons sommaires qui leur permettent de survivre dans des milieux désertiques aquatiques temporaires. Il existe en effet chez les Téléostomes une vessie natatoire gazeuse fonctionnant, soit comme un organe hydrostatique, soit comme un poumon. Chez les sarcoptérygiens non tétrapodes, notamment les Dipneustes actuels (*Protopterus*, *Neoceratodus*, *Lepidosiren*), cet organe fonctionne comme poumon rudimentaire en période d'assèchement, mais ce sont les branchies qui assurent le maximum de la respiration. Chez les premiers vertébrés tétrapodes, ce fut l'inverse, les poumons jouant le rôle essentiel dans l'oxygénation de l'animal, les branchies ne jouant plus qu'un rôle limité chez les formes larvaires. Chez les amphibiens urodèles ou les lézards, ces poumons sont constitués d'un simple sac alvéolaire, mais chez les tortues, les crocodiliens et les varans, il y a apparition d'une structure fractale par compartimentation de la cavité pulmonaire où chaque compartiment correspond à un sac alvéolaire (poumon paucicavitaire du caméléon, puis pluricavitaire du caïman). Chez les formes dérivées, ces poumons augmentent leurs surfaces d'échange par des bifurcations des éléments structurants et l'on aboutit chez les mammifères à des poumons trente fois plus développés que chez les reptiles.

C'est en 1991 que Schlesinger et West ont montré, *sur le vivant, l'existence des structures spatiales biologiques fractales comme la structure bronchique des mammifères*. À partir de la trachée qui s'ouvre dans l'œsophage, les bronches se ramifient dans un même rapport d'échelle selon 16 dichotomies successives, dans des directions quelconques, en 60 000 bronchioles qui aboutissent aux 60 000 petites poches, les sacs alvéolaires (*acini*) contenant les alvéoles. Pour irriguer ces sacs alvéolaires, les systèmes veineux et artériels des poumons présentent un plus grand nombre de dichotomies. Ce sont 23 dichotomies successives qui aboutissent aux 8 millions d'artérioles terminales qui apportent l'oxygène et aux 8 millions de veinules qui ramènent le gaz carbonique qui sera expulsé. On distingue dans les voies respiratoires, une partie exclusivement conductrice de 16 bifurcations de bronches et bronchioles et une partie respiratoire de 7 bifurcations des canaux alvéolaires. On sait maintenant que le gène *Hoxb-5*, localisé sur le chromosome 17, influence la morphogenèse des branchements par le biais de la protéine *Hoxb-5*¹. Leur formation fait intervenir des facteurs épidermiques (*Epidermal Growth Factors* : EGF) et des facteurs de transformation (*Transforming*

1. Il intervient aussi dans la structure de l'omoplate et donc dans la position des membres le long de l'axe antéro-postérieur des vertébrés.

Growth Factors : TGF- β 1). La matrice de formation des poumons comporte des collagènes, des protéoglycanes, des glycoprotéines et de l'épimorphine, une protéine favorisant la formation des tubes. Le diamètre des bronches diminue selon une loi de puissance, ce qui permet à l'arbre des bronches du poumon d'avoir une surface équivalente à celle d'un terrain de tennis (264 m²). L'épaisseur des tissus alvéolaires est très mince et, au microscope électronique, on peut voir la forme des globules rouges. La dimension fractale des poumons est proche de 3 (2,97), puisqu'il s'agit de remplir un volume avec une surface fractale de 3¹⁰. Le mécanisme de la respiration est lui-même fractal, mais temporellement. Une étude entreprise sur des chiens a montré que l'air pénétrait dans les poumons par des sauts successifs, séparés par les seuils des diverses sections du réseau bronchique, selon un motif d'enchaînement de véritables avalanches distribuées en suivant une loi de puissance et non pas une loi exponentielle. Au début, presque toutes les canalisations d'air, dont la valeur du seuil est plus petite que la pression externe, sont fermées. Ensuite la pression d'ouverture des voies respiratoires s'accroît jusqu'à ce qu'un second seuil soit dépassé et en conséquence toutes les voies, dont le seuil est inférieur, s'emplissent d'air. La pression d'ouverture des voies aériennes s'accroît successivement lorsque les seuils atteignent 3, 4 ou 5. Le dernier seuil à être dépassé permet à l'air d'envahir la dernière portion des poumons correspondant à environ 25 % de leur volume total, là justement où s'effectuent notamment les échanges de gaz. Pour les poumons, la croissance de la surface sans augmentation de volume a permis à la surface des alvéoles pulmonaires de dépasser les 100 m² dans le même volume restreint.

Le bulbe olfactif est tapissé de cellules olfactives, 5 millions chez l'homme, et 35 fois plus chez le chien (220 millions) où elles couvrent jusqu'à 6 m².

*** Les reins.** Responsables de la purification du sang par élimination des déchets, de l'excès d'eau et de sels, ils ont en général une structure veineuse ramifiée fractale par dichotomies successives. Les reins sont constitués d'un million de *néphrons* formés de glomérules de *Malpighi*, des capillaires logés dans une poche, le *glomérule de Bowman*. Ces glomérules sont prolongés par des tubules urinifères en trois segments en épingle à cheveux. *Les reins de porc et de lapin ont une dimension fractale respectivement égale à 2,3 et 2,1.*

*** Le réseau sanguin.** Les systèmes artériel et veineux qui distribuent l'oxygène et les éléments nutritifs à toutes les cellules du corps sont aussi

fractals. Les vaisseaux sanguins, pour effectuer cette fonction, ont besoin d'avoir des structures agrandissant les surfaces de contact. *La distribution des diamètres des vaisseaux sanguins depuis les capillaires jusqu'aux artères suit une loi de puissance, l'une des principales caractéristiques des fractales.* Ces structures existent des mollusques aux mammifères.

*** L'estomac.** L'estomac des mammifères a une telle concentration en acide chlorhydrique à la fin de chaque repas qu'elle serait suffisante pour le digérer lui-même. Malgré cette très forte acidité, l'épithélium de revêtement de l'estomac reste intact. Comment cela est-il possible ? On a constaté que certaines cellules sécrétaient un mucus protecteur qui constituait une barrière contre l'acide chlorhydrique. Les ions bicarbonates sécrétés par la paroi gastrique sont captés par le gel de mucus et réduisent le *pH* qui varie de 1 à 2 dans la lumière gastrique, à 6 ou 7 à la surface cellulaire. On s'est demandé comment la sécrétion acide provenant des cellules gastriques pouvaient traverser la barrière de mucus et être évacuée vers l'intestin. *Le passage de l'acide à travers le mucus s'effectue par des doigts visqueux qui ont une structuration fractale, un phénomène connu pour se développer lorsqu'un fluide de faible viscosité est injecté dans un liquide plus visqueux.* L'expérience faite sur des porcs a montré que selon le *pH*, les doigts visqueux ne pénétraient jamais la couche de gel au-dessous d'un *pH* de 4, mais formaient des doigts plus ou moins fins au-dessus de 4. L'acidité de la lumière de l'estomac ne revient donc pas au contact de l'épithélium à cause de la forte viscosité du gel de mucus. C'est la raison pour laquelle l'estomac ne s'autodigère pas en fonctionnement normal.

*** Les intestins.** Ils nécessitent de grandes surfaces d'échanges pour la digestion et l'assimilation des molécules nutritives par leurs transferts au système vasculaire. Ils possèdent une structuration fractale, les *villosités intestinales*. *Ces replis complexes suivent le modèle de l'œuf de pigeon qui consiste à itérer aux diverses échelles une surface hémisphérique, une structuration fractale qui augmente les surfaces d'échanges.*

*** Les battements du cœur.** Ils sont un autre exemple intéressant de systèmes qui suivent des lois de puissance. L'activité électrique normale du cœur correspond à un rythme sinusoïdal régulier, mais les intervalles entre les battements fluctuent d'une façon apparemment erratique, même chez les sujets au repos. Des transitions analogues à des régimes hautement périodiques ont été observées dans les états de maladie comme la mort cardiaque soudaine, l'épilepsie et les syndro-

mes de détresse fœtale. On s'est alors demandé comment un rythme qui avait été régulier pendant une vie entière, ce qui représente plus de 2 milliards de cycles ininterrompus, pouvait se détraquer de façon abrupte pour s'engager dans un battement frénétique et incontrôlé qui devenait fatal, c'est-à-dire comment le chaos pouvait envahir un organe comme le cœur ? Richard Cohen, physicien et cardiologue au M.I.T. de Boston, a réalisé sur ordinateur une simulation des rythmes cardiaques. Il a découvert, que le doublement de période identifié par Feigenbaum, Yorkes et May, était la clé de la compréhension de l'apparition d'une crise cardiaque. Pourquoi ? Parce que dans un cœur qui bat normalement, il y a des impulsions électriques qui se répandent de manière régulière dans les fibres musculaires et forcent le ventricule du cœur à se contracter et à pomper le sang. Cependant, une fois contractées, les fibres musculaires sont insensibles aux signaux électriques. C'est la raison pour laquelle cette période est qualifiée de réfractaire. Ce serait les variations de la période réfractaire d'une zone à une autre zone du ventricule du cœur qui seraient la cause de la fibrillation et de la contraction spasmodique qui accompagne la crise cardiaque. Afin de tester cette hypothèse, ils ont fait varier les périodes réfractaires de leur modèle, un groupe de cellules de cœur de poulet battant spontanément, mais stimulé de manière périodique en leur appliquant un choc électrique régulier, et ils ont découvert que les troubles commençaient lorsqu'un groupe de fibres musculaires du cœur avait une période réfractaire plus longue que l'intervalle qui existait entre les battements. À cause de cette période réfractaire incontournable, ces fibres cardiaques asynchrones ne pouvaient donc être stimulées qu'un battement sur deux pour se contracter. Les impulsions électriques provenant du cœur contracté ne pouvaient agir sur ces fibres complètement déphasées. Alors, en augmentant légèrement les périodes réfractaires de quelques fibres, on a pu tout d'abord entraîner le cœur à doubler sa période et en augmentant encore la période jusqu'au-delà d'une certaine valeur critique de période réfractaire, le muscle cardiaque entre alors dans le chaos le plus total et cesse de fonctionner. Le résultat obtenu a été un *doublement continu de la période* entre battements réguliers jusqu'à atteindre le *chaos* mortel¹. Des expériences suggèrent que la fibrillation dans un cœur humain pourrait être provoquée par l'apparition de foyers anormaux secondaires d'impulsions électriques à l'intérieur du corps, lesquels envoient des impulsions qui entrent en conflit avec le propre rythme du muscle cardiaque. L'interaction entre

1. Ce problème est également inhérent aux protéines des canaux *Gap Junctions Connexin 43 et 45* « *Connexin 43 et 45 Gap Junctions* » (Martinez et al., 2002).

ces impulsions secondaires et le rythme principal met le cœur dans un état chaotique qui entraîne la fibrillation. Celle-ci est donc bien une maladie du « *système dynamique* » cardiaque qui survient parce que le cœur est un système qui, à partir d'un battement normal, peut cesser de battre, ou battre de manière nouvelle et imprévue. La fibrillation est une forme de chaos stable, qui ne peut pas disparaître d'elle-même. Seule une décharge électrique produite par un appareil de défibrillation à travers le thorax du patient peut ramener le cœur à son état normal. *On a pu montrer que le fonctionnement du cœur était multifractal, en raison de la dynamique collective des cellules musculaires cardiaques, qui doivent être synchronisées de façon parfaite. Cela implique une structure hiérarchisée impliquant de nombreuses échelles temporelles subordonnées un peu à la manière des turbulences.*

*** Le cerveau.** Au niveau du cerveau, l'étude des électroencéphalogrammes montre que les activités de cet organe présentent des corrélations à longue portée, comme on en observe dans les séquences non codantes de l'ADN. Ces observations suggèrent, que le cerveau pourrait fonctionner autour d'un état critique, qui serait le reflet d'une dynamique collective du réseau des neurones. C'est pourquoi certains spécialistes de physiologie pensent qu'une certaine dose de chaos est nécessaire au bon fonctionnement du corps où de nombreuses impulsions électriques interfèrent.

*** L'allométrie.** Les relations fractales semblent clairement établies entre la taille du cerveau et le poids du corps, entre la longueur et le diamètre des os, entre la force des muscles et la masse musculaire et la taille de l'organisme et son taux de production d'énergie et de consommation de nourriture. Les lois d'échelles allométriques s'y appliquent vraisemblablement comme l'ont montré les travaux de Kleiber sur l'énergie nécessaire à la survie d'un organisme. Plus un organisme est gros, moins il a besoin d'énergie pour se maintenir en vie (loi de Kleiber). Cette relation explique pourquoi on ne trouve pas de micromammifères plus petits que la musaraigne pygmée (*Sorex minutus*) et également pourquoi il n'y a pas de petits mammifères marins, avec la raison supplémentaire que le système océanique est un système dissipatif. Ces lois s'appliquent aussi à la durée du développement de l'embryon et à la durée de la vie des organismes, puisque les plus gros animaux vivent plus longtemps que les petits.

L'allométrie est un phénomène par lequel la forme générale d'un individu se modifie au cours de la croissance. L'augmentation de taille

n'est en effet pas linéaire ou proportionnelle pour toutes les parties du corps au cours du temps. La variation de la taille relative de la tête au reste du corps, chez les bébés, les adolescents ou les adultes de l'espèce humaine est un exemple classique de ces modifications. La croissance allométrique est un phénomène très général chez les mammifères actuels et fossiles. Cette croissance différentielle, a été utilisée pour expliquer les différences entre les espèces successives des fossiles d'une même lignée. On connaît bien le développement hypertélique des bois de cerfs *Megaceros* des tourbières d'Irlande de la fin du Pléistocène, déjà évoqué à propos des hétérochronies. Le mâle adulte exhibe des bois somptueux, mais très encombrants. Ce phénomène est dû à un retard de l'apparition de la maturité sexuelle et s'exprime par une modification importante du développement du descendant par rapport à son ancêtre. Du fait de l'apparition tardive de la maturité sexuelle, la croissance se maintient beaucoup plus longtemps et la taille continue à croître et la morphologie dépasse l'étape ancestrale pour atteindre une morphologie hyperadulte, si la croissance se poursuit encore. L'analyse de la croissance montre que les bois des cerfs *Megaloceros* ne grandissent pas proportionnellement à l'accroissement de la taille du cerf, mais bien plus vite. Le mécanisme déterminant pourrait en être la sélection sexuelle. C'est à ces phénomènes de croissance exagérée et disproportionnée à cause des phénomènes d'allométrie ou croissance différentielle, que l'on rapporte tous les cas décrits sous le nom d'« hypertélie ». L'évolution fait parfois dans la démesure, mais il semble bien qu'il y ait une limite qui ne supporte plus les contraintes de la sélection naturelle ; c'est alors l'extinction.

*** Les robes animales.** Un phénomène très original des mammifères concerne les motifs des peaux animales, c'est-à-dire la *répartition des taches, des rayures ou des zébrures sur la peau*. Cette particularité tient au fait que certaines cellules de la peau, à l'aspect étoilé comme les neurones, du derme ou de la couche basale de l'épiderme, les mélanocytes, contiennent dans des granules, les mélanosomes riches en pigment noir, la *mélanine*. Ces mélanosomes sont responsables de la couleur de la peau et des poils. Ils sont abondants dans la peau de la face (2000/mm²) et moindres pour le reste du corps (1000/mm²) et chez l'homme, ils varient en nombre selon les régions du monde¹. Certaines de ces cellules peuvent migrer sous l'action de mutation de certains gènes et

1. Les mélanocytes sont cinq fois plus abondants chez les asiatiques que chez les européens, mais la quantité de mélanine présente dans le corps du plus noir et du plus blanc des hommes ne dépasse pas 1 gramme.

donner les taches blanches des pelages mammaliens. L'exposition au Soleil favorise la production de mélanocytes. Les kératinocytes secrètent une hormone, l'*alpha-MSH* qui se fixe aux mélanocytes pour produire de la mélanine. Les cas d'*albinisme* ne sont pas dus à l'absence de mélanocyte, mais à celle de la mélanine¹. Le mécanisme est très particulier. Le fait que des animaux jumeaux, des clones naturels, aient des robes différentes, prouve que cette structure n'a pas une détermination et une régulation strictement génétique. Ce problème a été étudié par James Dickson Murray (1991), qui a montré qu'il s'agissait d'un phénomène d'auto-organisation de processus chimiques correspondant aux phénomènes de *réaction*²-*diffusion*³, un modèle du mathématicien anglais Alan Mathison Turing (1912-1954). Ce mécanisme fait intervenir un *processus activateur* autocatalyseur induisant la production de la mélanine et un *processus inhibiteur* empêchant sa formation, agissant selon des coefficients de diffusion variables selon les espèces⁴. Ce modèle de réaction chimique à partir d'un point central constitue une brisure de symétrie. Le motif est uniquement déterminé par des solutions d'équations différentielles s'exprimant différemment selon la forme de la région et les paramètres en jeu⁵. La fonction solution permet d'analyser temporellement l'évolution du système, le plus souvent stable, mais qui peut devenir instable en entraînant la formation de bifurcations, point de naissance de la forme. D'un état symétrique de la matière, il passe à un état asymétrique. Le domaine structuré de Turing est encadré par des états stables. Dans une croissance par division des taches, si l'on part d'un état stable en augmentant les valeurs des paramètres, on constate qu'une tache claire apparaît, puis se divise en deux et ainsi de suite jusqu'à former un réseau hexagonal de taches. Murray décrit le phénomène suivant qu'il considère comme universel : « *Supposons que l'échelle du tissu s'accroisse. Ensuite, éventuellement, un point critique appelé une bifurcation est atteint, où l'état uniforme stable des morphogènes devient instable et le motif spatial commence à se former* ». Le motif de croissance du motif dépend de la *géométrie* et de l'*échelle* et peut être considéré analogiquement comme une surface vibrante de tambour. Si la surface est petite, elle ne supporte pas les vibrations, il faut une surface plus

1. Mutants des gènes *P*, *MATP*, *OA-1*, *HPS-1* et *CHS-1*.

2. *Réaction* : réponse d'un organisme à une action chimique ou biologique donnée.

3. *Diffusion* : action par laquelle un phénomène s'étend (chaleur, fluide, molécule, facteur de croissance, hormone, pigment, etc.).

4. Ce phénomène a été confirmé par la réaction chimique oscillante de Belousov-Zhabotinsky découverte en 1950.

5. Parmi ces paramètres citons, le taux de réaction, le taux de diffusion, la géométrie et l'échelle du tissu concerné.

grande pour permettre aux vibrations de se développer. Le modèle de Turing s'applique effectivement aux taches de robes animales comme l'a montré Murray. La répartition des cellules contenant la mélanine, ou d'autres pigments colorés chez les poissons ou les papillons produit des structures de Turing. On n'a pas encore identifié les activateurs et inhibiteurs, intervenant durant les étapes du processus de ce phénomène, mais il semble que ce processus de *réaction-diffusion* se mette en place à un moment précis durant la phase embryonnaire et que le motif dépende de la forme et de la taille de l'embryon, que la croissance déforme ensuite selon leurs emplacements et selon les conditions aux limites des équations de réaction-diffusion. Murray en faisant varier les paramètres, a pu produire tous les types de robes observées chez les mammifères. Ce sont les rayures que l'on peut observer chez les poissons-zèbres, les zèbres (fig. 2.19) et les tigres. Par exemple, entre deux espèces de zèbres, si les rayures apparaissent plus tard au cours de l'embryogenèse, elles seront plus serrées chez l'adulte que si elles se développent plus précocement. Les différences de croissance individuelles introduisent des variations individuelles.

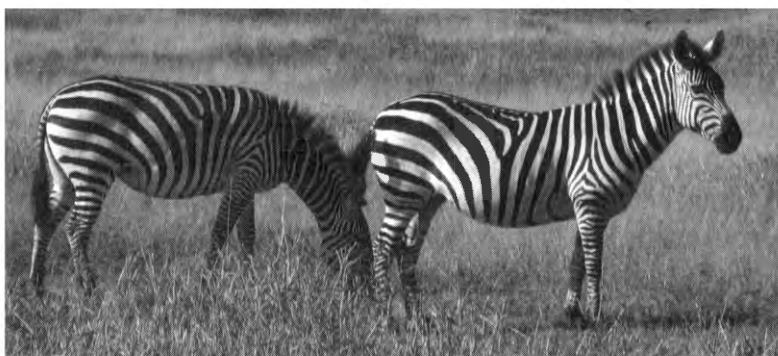


Figure 2.19. Les zébrures des zèbres du *Sérengeti* (Kenya). (© cliché J. Chaline)

Le nombre de rayures est également lié à la taille de l'embryon ; plus il sera gros, plus elles seront nombreuses.

Si l'on observe les taches réparties sur la robe du corps du léopard (ou panthère : *Panthera pardus*), on constate qu'elles se transforment en rayures sur le bout de sa queue. Il en est de même chez le guépard (*Acinonyx jubatus*; fig. 2.20) et la genette (*Genetta*).



Figure 2.20. Guépard (*Acinonyx jubatus*) du Kenya. (© cliché J. Chaline)

L'extension des taches sur la queue et leur remplacement par des rayures dépend de la longueur et de la grosseur de la queue. Les taches, nombreuses sur la queue du léopard et du guépard, sont remplacées par des rayures à la mi-queue et elles sont présentes sur toute la longueur de la queue plus fine de la genette. L'effet d'échelle qui intervient durant l'embryogenèse est très important. Si le mécanisme est activé par un va-et-vient génétique, les petits animaux qui ont une courte période de gestation auront une couleur uniforme, ce qui est le cas le plus fréquent. Pour les animaux ayant une plus grande surface au moment de l'activation, on a la possibilité d'avoir des animaux à moitié noir, et à moitié blanc. C'est ce qui est observé chez la chèvre du Valais (*Capra aegagrus hircus*). Si la taille du domaine s'accroît, il en va de même du motif. On observe une progression de complexité entre la chèvre du Valais et le fourmilier géant ou tamanoir (*Myrmecophaga tridactyla*), en passant par le léopard et le guépard. Au bout de l'échelle de taille on trouve la girafe avec ses taches nettement espacées. Finalement au terme des tailles, les très grands animaux, comme l'éléphant, le rhinocéros et l'hippopotame redeviennent de couleur uniforme.

Les motifs produits par la réaction-diffusion dépendent uniquement des conditions initiales de la géométrie et de l'échelle et sont des facteurs héréditaires, caractéristiques d'une espèce donnée. Il faut savoir que pour une géométrie et une échelle données, les motifs engendrés pour une variété de conditions initiales dues au hasard sont qualitativement similaires. C'est ainsi que dans le cas des taches, seule la distribution des taches varie. C'est par exemple le cas des différences spécifiques entre les deux sous-espèces de girafes, *Giraffa camelopardalis tippelskirchi* caractérisée par de petites taches séparées par de grands espaces et *Giraffa camelopardalis reticulata* aux taches très larges séparées par des espaces très rapprochés (fig. 2.21).

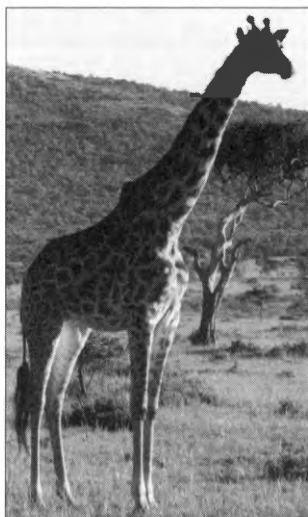


Figure 2.21. La girafe (*Giraffa camelopardalis tippelskirchi*). (© cliché J. Chaline)
(Masai Mara, Kenya). Sa robe est caractérisée par de petites taches séparées par de grands espaces.

Ce phénomène s'apparente aussi au modèle mathématique décrivant la vibration de plaques ou de celle d'un tambour où la fréquence de vibration enclenche, selon Charles M. Vest et Youren Xu en 1983, des interférences constituant des motifs variés, de plus en plus complexes selon la hauteur de la fréquence. Ces motifs sont identiques à ceux que l'on observe sur les peaux des animaux.

La physique intervient donc de façon prédominante pour constituer les robes animales. Murray fait aussi remarquer que ce processus est cohérent avec le *modèle des équilibres ponctués* de Gould et Eldredge, dans la mesure où de longues périodes de très faibles changements évolutifs sont ponctuées par des courtes phases de véritables buissonnements de changements évolutifs majeurs.

► Oscillations et déplacements des populations

La dynamique des populations animales a fait l'objet de nombreux travaux, notamment depuis les années 70, du physicien australien théoricien converti à la biologie, Robert May¹, et du physicien et mathématicien américain, James A. Yorke. Ils se sont intéressés aux problèmes des taux de croissance des populations animales lorsqu'elles arrivent à une surpopulation et ont montré que l'évolution de chaque population animale découle d'une *équation dite logistique* et dépend de la valeur de k , son taux de croissance effectif. Ils ont étudié la population de

1. Lord (Robert) May d'Oxford.

poissons d'un lac australien et l'équation logistique avec un taux de croissance modéré ou de natalité « k », variant entre 0 et 4 avec un pas de 0,02. Quand le taux est inférieur à 3, la population tend vers un état stable final, mais lorsque le taux de démographie augmente et dépasse le point critique de 3, le nombre d'individus par génération se met à osciller entre 2, 4 ou 8 valeurs différentes, sautant d'une valeur à l'autre de façon abrupte. Lorsque le taux augmente encore jusqu'à un autre point critique, l'oscillation se scinde une nouvelle fois en donnant un rythme d'ordre 4. Aux environs de $k = 4$ apparaissent des fenêtres de stabilité sous formes de bandes verticales. Cela signifie que la population devient à nouveau prévisible et augmente pendant deux années successives avant de diminuer au cours de la troisième. Mais si le taux de natalité augmente légèrement par un approvisionnement suffisant en nourriture, le chaos réapparaît.

Le diagramme des bifurcations forme un arbre ou un « figuier de Mitchell Feigenbaum¹ » permettant de concrétiser l'évolution d'un système simple vers le chaos par doublement de période. Au-delà d'un point précis appelé « point d'accumulation », ou encore « point de Feigenbaum », ou ce que certains appellent encore la « porte d'entrée sur le chaos », le système devient chaotique². Le système se met à fluctuer entre des valeurs totalement imprévisibles et devient alors extrêmement sensible aux conditions initiales. Si on examine plus attentivement la zone chaotique, on constate qu'il existe des zones étroites où la fonction logistique se remet à osciller entre un nombre fini de bifurcations avant de replonger dans le chaos. On constate que, dans cette fenêtre, il y a des bifurcations qui ressemblent elles-mêmes au diagramme de Feigenbaum agrandi. Mais de temps en temps, le système redevient régulier avec des cycles stables. En conclusion, un système à une dimension où apparaît un cycle régulier de période 3, évolue temporellement selon des cycles réguliers, de durées variables, avec des doublements de périodes jusqu'à une limite où l'on observe l'apparition de cycles chaotiques. *La conclusion est intéressante : l'attracteur étrange de la fonction logistique est une figure fractale.*

D'autres études effectuées sur les insectes *bombyx* et sur les bancs de poissons de l'Adriatique, respectivement par Briggs et Pest et Pearl et Voltera, ont montré des phénomènes identiques.

-
1. Mitchell Jay Feigenbaum est un physicien théoricien américain, né en 1944, qui a découvert que la transition vers le chaos se réalise par un doublement de période, caractérisée par deux constantes universelles appelées, les nombres de Feigenbaum.
 2. Dans le diagramme de bifurcation, à l'approche de chaque région chaotique, une succession de doublements de période s'effectue en progression géométrique.

En fait, comme l'a montré le mathématicien allemand Peitgen, ces bifurcations et la constante de Feigenbaum ne se retrouvent pas seulement dans le cas de la fonction logistique biologique étudiée par May, mais dans de très nombreux autres phénomènes physiques comme l'hydrodynamique, l'électronique, les lasers, l'acoustique, etc. Ces systèmes sont connus sous le nom de « *cascades sous-harmoniques* ». Ils ont une très grande universalité en physique et une grande valeur de prédiction. Cela démontre bien que *le vivant suit des lois physiques universelles et que la période 3 implique le chaos*.

Par exemple, le territoire occupé par une population de rats musqués en extension commence par une limite de territoire lisse, mais à partir d'un certain seuil lié à son expansion, le contour de son territoire devient plus grossier, émoussé, plus irrégulier. Il correspond au même phénomène que celui de particules chimiques qui diffusent sur une certaine surface. On retrouve le même phénomène en analysant les variations des populations de lynx au Canada pendant les deux derniers siècles. Il doit être assez général.

Les mouvements des poissons de haute mer en bancs peuvent également relever de la relativité d'échelle. Le fait que tel ou tel individu se trouve dans un banc ou participe à un amas n'a pas d'importance en soi du point de vue de la structure. Les trois conditions qui mènent en relativité d'échelle à la transformation de l'équation fondamentale de la dynamique en une équation de Schrödinger généralisée (infinité des trajectoires potentielles, fractalité et irréversibilité locale) semblent bien adaptées au comportement des populations des espèces marines où le comportement d'ensemble est différent du comportement individuel. La *structuration des bancs* observés comme *possible solution d'équations de Schrödinger généralisée* (existence de pics bien marqués de la densité de probabilité, hiérarchie des structures) sont en accord avec le comportement observé des poissons qui, plutôt que remplir de l'espace, s'agglomèrent en bancs tourbillonnants.

Les mouvements de chaque individu sont conditionnés par le déplacement de l'eau. En effet, les poissons ont sur leurs flancs des capteurs sensibles à la pression de l'eau et le mouvement des voisins modifie la pression, ce qui enclenche des mouvements réflexes d'évitement. C'est ainsi que les mouvements des « nuages » de poissons sont corrélés aux fluctuations des pressions internes des flux d'eau.

Il en va de même des *ballets aériens d'étourneaux sansonnets* (*Sturnus vulgaris*) à l'automne, au moment des rassemblements du soir lorsqu'ils se regroupent pour passer la nuit, ou avant leurs faibles migrations. Ces vols peuvent rassembler de quelques centaines à plusieurs millions

d'individus en vols véritablement chorégraphiques. Des mouvements identiques caractérisent les déplacements des essaims d'abeilles.

Selon, Sylvain Le Beux, les organisations des populations en essaim seraient caractérisées par des phénomènes de groupes relevant de trois caractéristiques. Chaque individu aurait sa connaissance locale de l'environnement, mais ignorerait la fonction globale de la population. Chaque individu posséderait un ensemble de règles comportementales, simples et limitées, jeu qui permet au groupe de coordonner les actions collectives et de construire une structure. Enfin la structure globale émergente accomplirait une fonction donnée, celle de résoudre un problème d'adaptation à l'environnement. Les individus, selon la *règle de séparation*, ne doivent pas être trop proches les uns des autres. Il y a aussi une *règle d'alignement* qui dit qu'un individu doit se déplacer dans la même direction que l'ensemble en moyennant les vitesses et directions. Il y a enfin une *règle de cohésion* qui interdit aux individus de se trouver sur l'extérieur de la structure, forçant les individus à se déplacer vers le centre. Ces trois règles, qui assureraient la stabilité des structures mouvantes, sont utilisées en robotique pour l'*intelligence en essaim*.

En 1993, Hanski, Turchin, Korpimäki et Henttonen expliquaient que les oscillations de populations boréales de rongeurs produites par la prédation des mustélidés conduisaient à un *système chaotique*.

Il en va de même des épidémies qui suivent les mêmes lois, comme par exemple, la rougeole, la rubéole, la poliomyélite et la grippe. Par exemple, plus la population humaine est grande et plus le taux de variation de cette population, exprimé en nombre de personnes qui s'ajoutent à chaque unité de temps, devient grand. De même, plus il y a de personnes infectées par un virus et plus, dans les semaines qui suivent, il y aura de nouveaux cas de personnes infectées.

En conclusion, on peut tirer quelques enseignements de la présence des fractales dans les organismes. Les organes ont dans les organismes des espaces limités. Leurs fonctions d'interfaces entre l'air et le sang pour les poumons, entre les nutriments et le sang dans les intestins, entre les déchets du sang et l'urine dans les reins, nécessitent de si grandes surfaces d'échanges que seules les structures fractales peuvent leur procurer. On constate que la fractalité du vivant s'exprime essentiellement par des *arborescences autosimilaires* dont la formation est contrôlée par l'expression de certains gènes, comme *Hoxb5* pour les poumons. Cette fractalité des organes est limitée par les contraintes biologiques spatiales (taille des organes), constitutives (nature des protéines des biomatériaux) et fonctionnelles (taille des molécules participant aux

échanges). Ces contraintes imposent de fait une limite inférieure et une limite supérieure d'expression des structures fractales dans le vivant, de la molécule à l'organe.

Toutes les observations présentées ici, montrent clairement, que le vivant présente de nombreuses *structures morphologiques fractales*. Il semble évident que ces structures plus performantes ont été *optimisées par la sélection naturelle*, puisqu'elles apportaient un avantage aux individus qui les premiers les ont portés. Ces structures ont envahi l'organisme des gènes aux neurones, mais les structurations fractales ne se limitent pas à la morphologie géométrique des surfaces ou des volumes. Elles existent aussi entre la peau et les organes dont elles assurent la souplesse par des remaniements auto-organiseurs instantanés de l'architecture du réseaux sous-cutané de liens collagéniques et également à l'interface entre les organes en permettant les glissements sans déchirures. L'existence de *lois d'échelle* dans les données temporelles du fonctionnement du vivant prouve qu'elles jouent un rôle souvent majeur pour organiser et coordonner des phénomènes temporels variés (échanges ioniques cellulaires, phénomènes physiologiques, digestifs, battements cardiaques, fonctionnement du cerveau, etc.). La mise en évidence des systèmes chaotiques en biologie réconcilie en partie les notions apparemment opposées de déterminisme et d'imprévisibilité ou de chaos. En effet, s'il est évident que les systèmes simples obéissent clairement à des *lois déterministes linéaires*, il arrive cependant que leurs comportements à long terme deviennent totalement imprévisibles. Ce sont des systèmes déterministes réguliers pendant une partie de leur fonctionnement, mais qui deviennent partiellement *non-linéaires* et peuvent alors mener au *chaos* totalement imprévisible au-delà de certains seuils. C'est ce que l'on appelle le « *déterminisme chaotique* ». Et nous avons vu que derrière ce chaos se profilaient les figures fractales de l'attracteur étrange de la fonction logistique.

Dans le cadre de l'approche relativiste d'échelle, de tels systèmes chaotiques, théoriquement décrits par les équations déterministes de la *physique classique de Newton*, pourraient être régis par de nouvelles équations *non déterministes de type probabilistes et quantique* au-delà d'un certain horizon temporel d'imprédictibilité. La *relativité d'échelle* interviendrait ainsi « *au-delà du chaos* », pour générer des structures statistiques à partir de *trajectoires individuelles non-déterministes et imprévisibles*.

Des lois de puissance dans les distributions statistiques du nombre des apparitions et des extinctions d'espèces

La première recherche sur une structuration fractale possible dans les données paléontologiques a été suggérée en 1988 par Jacques Dubois. Ce dernier venait de démontrer que les répartitions des éruptions volcaniques suivaient des lois de puissance et il était intéressant de se poser la question de savoir si la répartition de phénomènes du vivant, nécessairement fossiles pouvait également révéler de tels phénomènes. Le problème qui se pose avec les fossiles est la discontinuité et la rareté des données datées et leur répartition sur des surfaces géographiques relativement grandes. La radiation quaternaire des rongeurs campagnols, les souris des champs, analysée à l'échelle de l'hémisphère Nord venait d'aboutir¹. Ces données parmi les mieux documentées au point de vue paléontologique, se prêtaient particulièrement bien à cette tentative d'analyse. Ces rongeurs, à partir d'une forme ancestrale ayant vécu il y a environ 5 millions d'années, se sont en effet diversifiés en 140 lignées distinctes fossiles et actuelles. Cette évolution arborescente constitue la dernière radiation importante des mammifères à l'échelle de l'hémisphère Nord. Les apparitions et les extinctions d'espèces avaient l'avantage d'être assez bien datées dans la chronologie du Quaternaire par des méthodes variées, dont quelques datations au potassium/argon, à l'uranium/thorium de sites renfermant des rongeurs européens et d'autres situant les sites relativement les uns aux autres d'après les phénomènes évolutifs.

La question était donc de savoir si ces phénomènes se faisaient, ou non, au hasard comme l'affirmait *l'hypothèse de la Reine rouge*² de van Valen ? Or cette répartition des apparitions et des extinctions d'espèces ne se fait pas de façon régulière, mais par bouquets (tableau 1, fig. 2.22). Les autres tests d'une évolution, strictement liée au hasard, comme les courbes de survie et les distributions dites de Poisson, ne rendaient pas mieux compte de ces répartitions hétérogènes. Jacques Dubois a alors comparé la répartition des apparitions et extinctions d'espèces avec celle d'une loi de puissance³ décrivant la poussière de Cantor, une structure

1. Voir Chaline & Brunet-Lecomte, 1991.

2. L'hypothèse de la Reine rouge de Leigh Van Valen postule que les probabilités d'extinction des groupes sont constantes au cours des temps géologiques. Elle se base sur la Reine rouge d'*Alice au pays des merveilles*, qui crie : « Nous courrons pour rester à la même place », autrement dit il faut évoluer, s'adapter pour survivre dans un monde biologique concurrentiel.

3. Rappel : Considérons la suite de nombres 2, 4, 8, 16, 32... C'est une suite de nombres qui sont appelés « *puissances successives de 2* ». 1^{re} ligne : 2, 2^e ligne : 4, 3^e ligne : 8, 4^e ligne :

fractale bien connue. Le résultat fut sans équivoque (fig. 2.23). Il prouvait que les apparitions (spéciations) et les extinctions d'espèces de campagnols au Quaternaire ne se faisaient pas uniquement au hasard, mais suivaient des lois de puissance plus complexes impliquant l'existence sous-jacente de structurations fractales¹. En outre les extinctions semblaient plus contraintes que les spéciations.

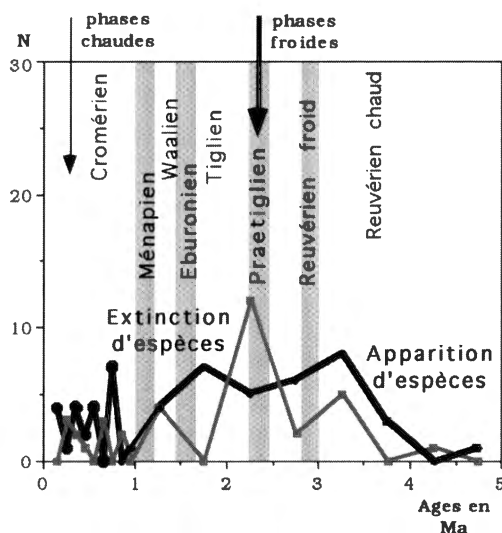


Figure 2.22. Diagramme de répartition des apparitions et extinctions d'espèces chez les rongeurs campagnols (d'après Dubois et al., 1992).

Cette analyse démontrait aussi l'importance de l'approche de la *dynamique non linéaire*, même en paléontologie, où elle n'a encore été que très peu développée depuis cette date. La plupart des recherches paléontologiques quantitatives sont essentiellement fondées sur l'utilisation de fonctions linéaires très souvent inadaptées aux phénomènes analysés avec des résultats méthodologiquement biaisés.

16, 5^e ligne : 32. Supposons qu'un pin donne deux branches par an qui se divisent en deux chaque année, le nombre de branches terminales correspond à des « puissances de 2 » et l'âge de l'arbre correspond au rang, c'est-à-dire au « logarithme du nombre des branches terminales »...

1. Ce résultat fondateur, publié aux *Comptes-Rendus* de l'Académie des sciences de Paris (Geosciences) en 1992, fut le premier de ce genre établi en paléontologie au niveau mondial.

ÂGES en Ma.	N FAD	N LAD	RICHESSSE ESPÈCES
0,15	3	0	22
0,25	1	3	21
0,35	3	2	22
0,45	2	1	19
0,55	3	0	17
0,65	0	3	16
0,75	7	0	16
0,85	0	2	11
0,95	0	0	11
1,25	4	4	13
1,75	6	0	10
2,25	5	11	15
2,75	6	2	12
3,25	8	5	11
3,75	3	0	3
4,25	1	1	1

Tableau 1. Répartition des apparitions (FAD : First Apparition Datum) et des extinctions (LAD : Last Apparition Datum) des rongeurs campagnols dans le Pliocène et le Quaternaire.

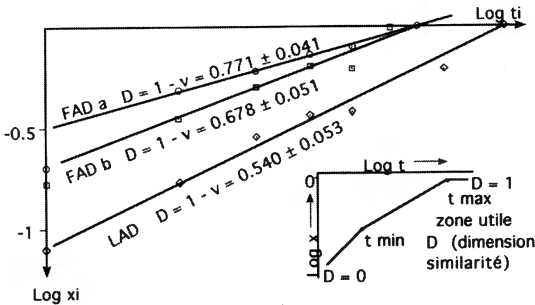


Figure 2.23. Diagramme log-log des apparitions (FAD) et extinctions (LAD) chez les rongeurs campagnols montrant que les événements évolutifs de l'histoire des campagnols suivent des lois de puissance (d'après Dubois et al., 1992).

Confirmations de l'existence de la dynamique non linéaire en biologie-paléontologie

Ces travaux qui impliquaient l'échelle des *radiations*, c'est-à-dire des *clades*, de la *macroévolution*, ont été suivis de nombreuses recherches dans les pays anglo-saxons.

David Green en 1991 montrait également que le chaos déterministe, les fractales et la dynamique non-linéaire étaient des caractéristiques du phénomène évolutif du vivant et de la phylogénie qui en résultait. Il expliquait que le vivant possède des contraintes, comme l'existence d'espaces de ressources, la gravité, la viscosité de l'air et de l'eau, l'efficacité métabolique et les autres contraintes biologiques, et qu'en conséquence, le système vivant ne peut avoir une infinité d'états comme les attracteurs de Lorenz et d'Hénon, mais possède des limites discrètes et occupe une région bien définie de l'espace des phases, son attracteur, vers lequel il converge, quelles que soient les conditions initiales. Il montrait aussi que les arbres phylogénétiques constituaient des structures fractales parce que la réplication était la principale caractéristique des êtres vivants. Il utilisait également la triade de Cantor pour montrer que l'arbre obtenu avait des propriétés d'ancêtre à descendant. Il affirmait aussi que la hiérarchie fractale de la phylogénie était beaucoup plus complexe que n'importe quelle classification catégorielle et que, bien que la cladistique puisse approcher de l'histoire des divergences parmi le vivant, toute tentative pour arriver à une classification naturelle était destinée à un échec parce que trop limitée de façon inhérente. Dans une approche fractale de la phylogénie, les catégories taxonomiques sont dépendantes du temps et n'ont de sens qu'à des moments particuliers de l'histoire évolutive. En effet, dans un arbre évolutif en construction, les catégories actuelles perdent de leur signification, au fur et à mesure que d'autres branches se forment. Il montrait aussi que la *hiérarchie était une qualité émergente du système*, et non pas une de ses propriétés basiques. Green avait une vision novatrice du phénomène évolutif, très en avance pour son époque, mais il lui manquait une théorie pour aller plus loin dans l'analyse, car les itérations de l'ensemble de Cantor ne peuvent pas rendre compte de la complexité et des bifurcations des arbres phylogénétiques. Il était obligé d'admettre des extinctions de certains rameaux.

En 1993, Plotnick et MacKinney démontraient l'existence d'auto-organisation chez les foraminifères planctoniques. Patterson et Fowler ont montré, en 1996, que les spéciations et les extinctions des foraminifères planctoniques suivaient des modèles de lois de puissance et que les extinctions étaient plus contraintes. Un résultat confortant celui que nous avons obtenu sur les rongeurs quaternaires et les foraminifères crétacés quelques années auparavant.

L'autosimilarité des motifs d'extinctions, mise en évidence par Solé, Manrubia, Benton et Bak en 1997, indique une réponse non-linéaire de la biosphère aux perturbations environnementales comme cause des extinctions. Ce travail confirmait également notre travail. En 1990 et

1993 Burlando démontrait encore que le système taxinomique du vivant et les radiations présentaient une autosimilarité et que la *géométrie de l'évolution était fractale*.

On peut considérer que l'aspect fractal des phénomènes évolutifs (spéciations, radiations et extinctions) et ses manifestations au sein de la classification, étaient bien établies à la fin des années 90. Malgré cela, la plus grande partie de la communauté paléontologique qui pratique essentiellement la recherche et la description de nouvelles espèces sans s'intéresser aux côtés théoriques de l'évolution, ignore toujours ces résultats et leurs implications majeures.

Si des lois de puissance permettaient effectivement de décrire ces phénomènes évolutifs isolés, il manquait encore des lois plus générales pour décrire les *phénomènes évolutifs aux diverses échelles*. C'est l'apport majeur de la *théorie de la relativité d'échelle* dont nous allons examiner l'une des plus étonnantes applications.

La relativité d'échelle aux grandes échelles du vivant : la macroévolution

C'est l'étude des *phénomènes critiques* dans les années 70, qui a permis d'aller plus loin dans l'analyse des phénomènes évolutifs. Nauenberg et Jona-Lasinio ont montré en 1975, que des corrections aux lois de puissance, dans les solutions des équations du *groupe de renormalisation*¹, qui concernaient au départ la *théorie quantique des champs*, mais appliquées par la suite à la *physique statistique des transitions de phase*, notamment des *phénomènes critiques*, aboutissaient à un comportement qualifié de « *log-périodique* », descriptible par des *dimensions fractales* complexes. Un résultat essentiel de l'étude des phénomènes physiques critiques est un *comportement en loi de puissance autour du point critique*. Ce n'est qu'à l'ordre suivant, que certains calculs font apparaître une fluctuation log-périodique. Celle-ci n'apparaît pas dans les travaux pionniers de Wilson en 1971 qui a obtenu le prix Nobel en 1982. Elle n'a été identifiée que plus tard.

► La log-périodicité

Une *loi log-périodique* est une loi qui montre une *périodicité dans les changements d'échelle*, en fonction d'un logarithme d'une variable donnée,

1. Les procédures de *renormalisation* démontrent l'universalité des propriétés macroscopiques des systèmes critiques. Elles permettent de déterminer les modalités d'organisation des fluctuations du système aux différentes échelles et de comprendre les lois d'échelle résultant de cette organisation des systèmes dynamiques.

comme lorsque l'on fait un zoom continu de 2, 4, 8, 16, 32... Dans le cadre de la relativité d'échelle, ce sont des solutions d'une équation d'onde d'échelle du deuxième ordre. Ces lois peuvent également être définies par l'apparition d'exposants fractionnaires ou de dimensions fractales complexes. D'après Sornette en 1998, une telle loi est périodique, non pas en fonction du temps, mais du logarithme de son écart à une époque critique propre à chaque phénomène. Graphiquement, un comportement log-périodique s'exprime par une courbe qui tend de façon ascendante *accélérée* vers un pic de probabilité constituant l'époque *critique* de la loi, suivi par une courbe descendante *décélérée* (fig. 2.24). Il s'agit d'une *loi de probabilité* de la survenue d'événements particuliers correspondant au phénomène étudié.

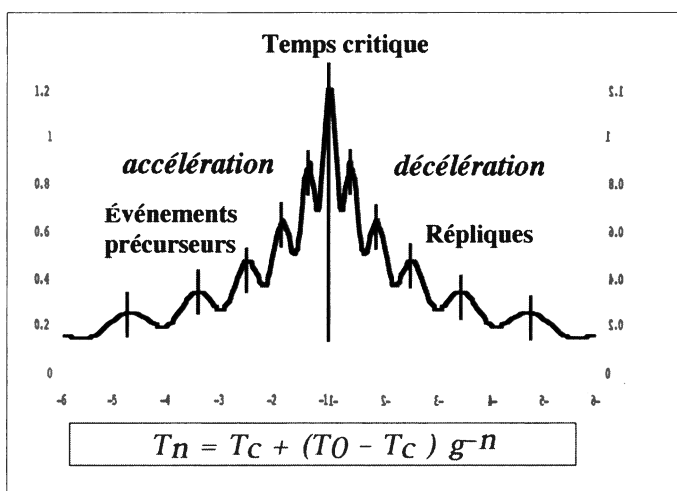


Figure 2.24. Loi log-périodique. Parmi les corrections à l'invariance d'échelle discrète caractérisées par des lois de puissance, certaines d'entre elles sont amenées à jouer un rôle important. Il s'agit des lois log-périodiques qui peuvent être définies par l'apparition d'exposants fractionnaires ou de dimensions fractales complexes. Une loi log-périodique est périodique, non pas en fonction du temps, mais du logarithme de son écart à une époque critique propre à chaque phénomène. À proximité d'un temps critique, le système devient instable et fractal et présente des événements précurseurs qui se répartissent de façon accélérée jusqu'au temps critique, spécifique du système, puis, le temps critique atteint, le système est l'objet d'événements répliques se manifestant de façon décélérée (d'après Chaline, 2006).

Parmi les corrections à l'invariance d'échelle, les lois log-périodiques sont amenées à jouer un rôle potentiellement important dans de nombreux domaines qui ne se réduisent pas à la seule physique, ce qui peut paraître surprenant à de nombreux non-spécialistes. C'est seulement en 1995 que Sornette et Sammis ont appliqué d'une façon empirique ces solutions des *équations du groupe de renormalisation* à l'analyse des

données concernant la répartition des concentrations des ions chlore (Cl⁻) captés à Kobé (Japon) avant, et pendant le grand tremblement de terre de 1995. L'année suivante, Sornette et Sammis montraient que les mêmes solutions des lois log-périodiques¹ s'appliquaient aussi aux krachs boursiers, en mettant en évidence la répartition log-périodique des variations de l'indice S. et P. 500 de la Bourse de New York. Rappelons que la loi log-périodique a été retrouvée par Queiros-Condé, en 2000, dans ses recherches sur la géométrie de l'intermittence en turbulence développée, dite des « peaux entropiques », grâce à l'introduction d'un principe de conservation d'un flux d'entropie le long de l'arbre du vivant.

Que décrivent les lois log-périodiques ? Elles décrivent la chronologie des événements successifs d'un phénomène donné. Il s'agit d'une *loi d'échelle quasi-universelle*², puisqu'elle peut s'appliquer des tremblements de terre jusqu'aux fluctuations de la bourse et, comme nous allons le voir également, à l'évolution du vivant. Ce sont des *lois du hasard probabiliste*, mais qui permettent de faire des *prédictions* en évaluant la suite des probabilités d'événements précurseurs futurs lors des *accélérations*, mais aussi des *retroprédictions* lors des *décélérations* événementielles autour du *temps critique*. L'apparition de ces événements, leur chronologie, dans un tel cadre descriptif, en termes de pics et de creux de probabilité, n'est pas certain comme dans une situation totalement déterministe, mais simplement plus probable que d'autres.

► Les applications des lois log-périodiques au vivant

C'est dans le cadre du groupe de travail NCG³ que les travaux de Sornette et al. ont suggéré à Nottale de traiter l'arbre de la vie comme les autres arbres végétaux structurés de manière fractale, *mais dans le temps au lieu de l'espace*. Nottale a proposé une *pure chronologie discrète avec une loi discrétisée*⁴. Il a montré qu'on pouvait prendre comme référence des rapports, le temps critique T_c , bien que celui-ci soit à l'infini du point de vue des rangs. Les premiers tests des loi-log-périodiques à la macroévolution ont été réalisés respectivement sur les échinodermes,

1. Sornette (1998) a étudié uniquement des comportements log-périodiques continus du type $(T-T_c)^{-k} (1+a \cos(b \log(T-T_c)))$.
2. Les lois d'échelle sont très souvent des lois de type statistiques au même titre que les lois des grands nombres. C'est pourquoi elles se rencontrent aussi universellement en biologie, dans les finances, etc.
3. Groupe Nottale, Chaline et Grou.
4. La loi log-périodique s'écrit : $T_n = T_c + (T_0 - T_c) (g)^{-n}$, où $g = R^{1/D}$, avec k entier si le nombre de branchements reste constant à chaque étape. Cette loi ne dépend que de deux paramètres, g et T_c , qui n'ont, bien sûr, pas de raison *a priori* d'être constants pour l'ensemble de l'arbre de la vie.

les dinosaures sauropodes et théropodes, les rongeurs, les chevaux, les primates et l'ontogenèse humaine et enfin la vie dans son développement global.

• Les échinodermes

L'analyse de l'histoire des échinodermes, réalisée par David et Mooi en 1999, et traduite en un cladogramme bien daté, où les nœuds correspondent aux innovations majeures, ont permis de compléter les tests. On constate ici une *décélération* à partir du temps critique correspondant manifestement à l'apparition des échinodermes dans les archives paléontologiques vers -600 millions d'années. Cette analyse est très intéressante au point de vue théorique, car le cladogramme montre que pour les échinodermes deux événements structurels majeurs, correspondant d'une part à l'origine du squelette vers -526 Ma. et, d'autre part, à l'apparition d'un calice régulier à symétrie axiale portant des bras (thèque) et corrélativement d'une tige assurant la fixation, se sont mis en place, vers -520 Ma., sur le même pic de probabilité (fig. 2.25). Si pour l'histoire des échinodermes ces deux événements correspondent à deux bifurcations majeures du clade, du point de vue de la loi log-périodique et de la répartition des dates, seule testée ici, ils doivent être groupés, car ils se sont réalisés lors d'une même phase d'instabilité morphologique aux alentours de -520 Ma.

Il n'y a donc aucune incohérence entre ces résultats, ni aucune modification ou interprétation des données, mais seulement les analyses de deux phénomènes à des points de vue et des échelles différents. Cette observation instructive montre effectivement que les événements majeurs de l'histoire d'un groupe se réalisent bien pendant les phases ou zones de hautes probabilités événementielles d'une loi log-périodique caractérisée par un T_c qui lui est propre.

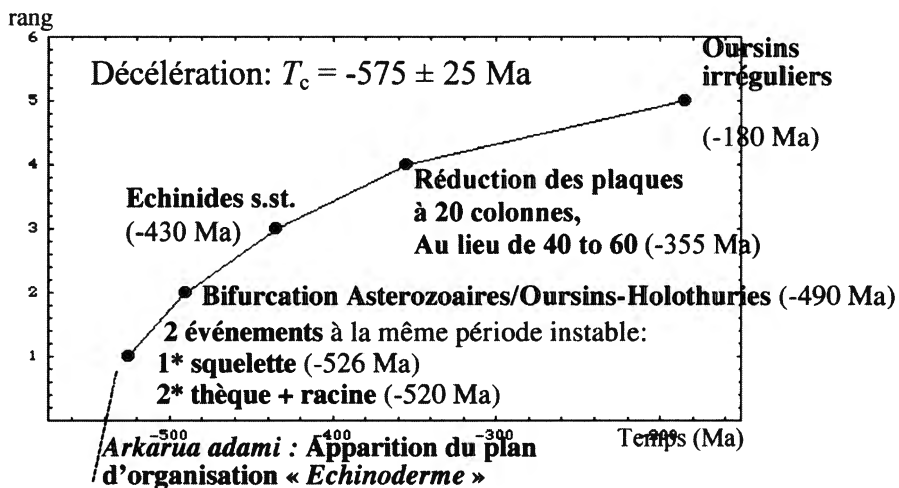


Figure 2.25. Loi log-périodique appliquée à l'apparition des grandes structures chez les échinodermes en temps réels.

Il s'agit ici d'une décélération qui permet de faire la rétroprédiction de l'apparition des échinodermes au point critique à -575 Ma, c'est-à-dire dans la fourchette de probabilité du pic à -600 Ma. Dans ce diagramme, on observe l'apparition de deux grandes innovations dans le même pic de probabilité temporelle, ce qui au point de vue de la loi physique ne pose aucun problème, mais a des conséquences au point de vue cladistique, puisqu'il s'agit de deux bifurcations successives, majeures pour l'histoire des échinodermes, mais groupées temporellement (d'après Nottale, Chaline et Grou, 2001 sur des données David et Mooi, 1999).

• Les dinosaures

En 1998 Wilson et Sereno publièrent les changements posturaux de locomotion des dinosaures Sauropodes (fig. 2.26).

Le résultat (fig. 2.27) montre une *accélération évolutive* évidente avec un très bel alignement des *bifurcations*, événements évolutifs majeurs, au sommet des pics de probabilité. Le T_c est de 122 ± 10 Ma. avec $g = 1,33$.

En outre Sereno en 1999 proposa un cladogramme de l'ensemble des dinosaures dont les nœuds pouvaient être datés. Pour les Théropodes, on obtient une accélération avec un T_c de 140 ± 3 Ma. et une valeur de $g = 2,02$.

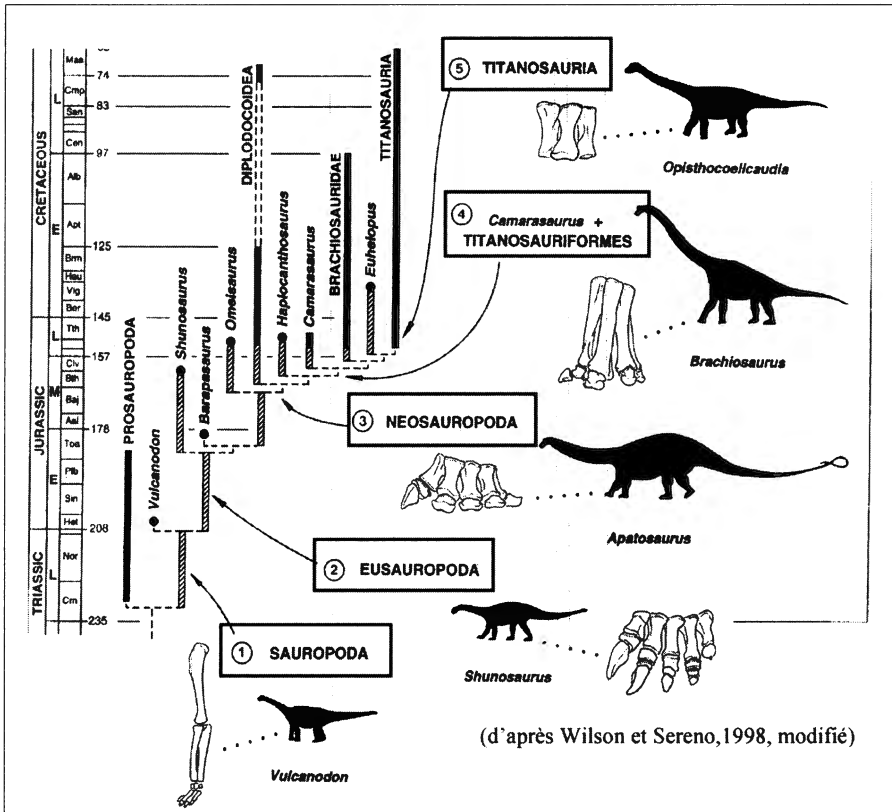


Figure 2.26. Cladogramme des dinosaures sauropodes.

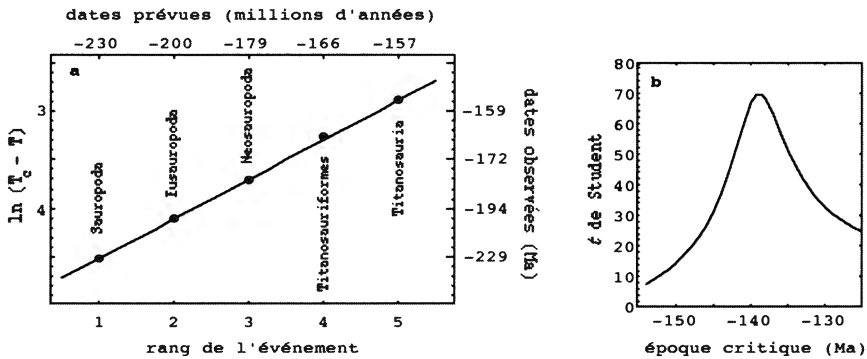


Figure 2.27. Loi log-périodique appliquée à l'évolution du système de locomotion des dinosaures sauropodes.

On observe une accélération évolutive avec un $T_c = -139$ Ma qui pourrait correspondre à la perte des potentialités évolutives du système de locomotion (d'après Chaline, Nottale, et Grou, 1999, sur des données de Wilson et Sereno, 1998).

• Les rongeurs

Ce résultat a été complété par celui de l'analyse de la radiation des familles de rongeurs, qui rassemble la moitié des mammifères. La radiation a pu être testée en utilisant l'arbre de parenté établi par Jean-Louis Hartenberger en 1998. On observait *une décélération suivie d'une accélération* (fig. 2.28) avec un temps critique évalué entre 12 et 35 millions d'années selon les regroupements d'événements entrant dans les barres d'erreur, ici de l'ordre de 10 %.

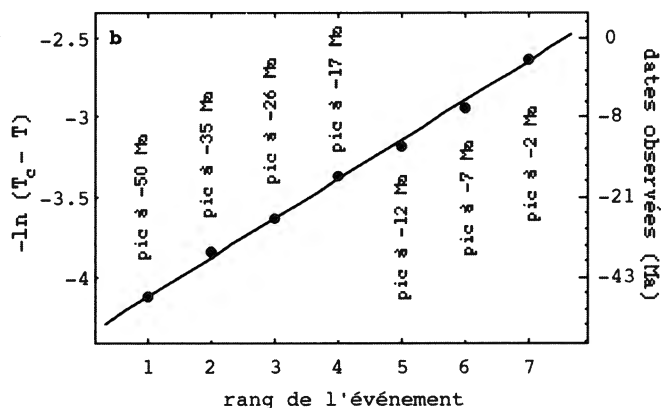


Figure 2.28. Loi log-périodique appliquée à l'évolution des familles de rongeurs.

Si l'on suppose que les sous-pics constituant cet amas sont réels, on trouve à partir de la date la plus ancienne (-56 Ma.), des écarts de 3, 4, 4 et 11 Ma. Ils montrent une nette décélération, suivie d'une accélération (seule visible sur ce graphe). Le T_c est à +23 Ma (d'après Chaline, Nottale, et Grou, 1999, sur des données de J.-L. Hartenberger, 1998).

• Les équidés

Des données inédites de Charles Devillers sur les équidés fossiles d'Amérique du Nord, malheureusement incomplètes et beaucoup trop sommaires pour un spécialiste des équidés, furent également testées. Malgré les faiblesses des données, on y observait une accélération évolutive, mais le résultat le plus intéressant fut de constater que la loi log-périodique indiquait un *temps critique actuel* suggérant l'extinction de ces équidés. Ils se sont effectivement éteints en Amérique du Nord au Post-glaciaire, comme le confirment les archives paléontologiques. Les chevaux ont en effet été réintroduits par les Espagnols au moment de la conquête. Il faut noter ici que malgré la mauvaise qualité des données, la loi semble si structurante que trois dates correctes suffisent pour en établir le profil général du clade.

• Le test log-périodique des primates

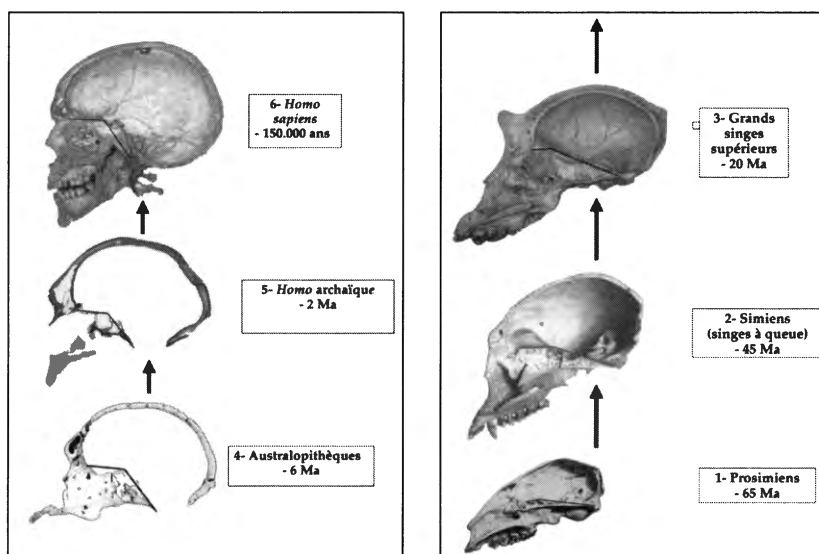


Figure 2.29. Succession des grands plans d'organisation des primates. 1. prosimiens (-65 Ma.) ; 2. simiens (Cercopithèques) (-45 Ma.) ; 3. grands singes supérieurs (-20 Ma.) ; 4. australopithèque (singes bipèdes) (-6 Ma.) ; 5. Homo archaïques (*ergaster-erectus-neanderthalensis*) (-2 Ma.) ; 6. Homo sapiens (-150 000 ans). On y observe les coupes transversales des plans d'organisation des crânes des primates orientés vers la gauche et montrant les contractions crânio-faciales successives visualisées à partir de l'angle formé par le point antérieur de la lame criblée de l'ethmoïde, la projection des apophyses clinoides antérieures dans le plan sagittal et le bord avant du trou occipital (basion) (d'après des clichés inédits d'A. Dambricourt).

L'évolution des primates est l'une des mieux connues au point de vue paléontologique, à l'exception de la période de l'ancêtre commun aux singes supérieurs et aux australopithèques. La quantification des plans d'organisation des primates par les méthodes procustes¹, a montré qu'ils ont évolué par étapes successives, caractérisées par le degré de leur contraction-crânio-faciale² qui suit une tendance évolutive reconnue par la plupart des spécialistes. On y distingue cinq grands plans d'organisation successifs (fig. 2.29) avec, tout d'abord, les prosimiens (lémuriens), ensuite les simiens (singes à queue), suivis des singes supérieurs (orang-outan, gorille et chimpanzé), puis des australopithèques (singes bipèdes fossiles) et enfin des hommes (fossiles et actuels).

1. Chaline et al., 1998.

2. Cette caractéristique a été mise en évidence par A. Delattre et R. Fenart dès 1954 et approfondie par A. Dambricourt Malassé depuis 1988.

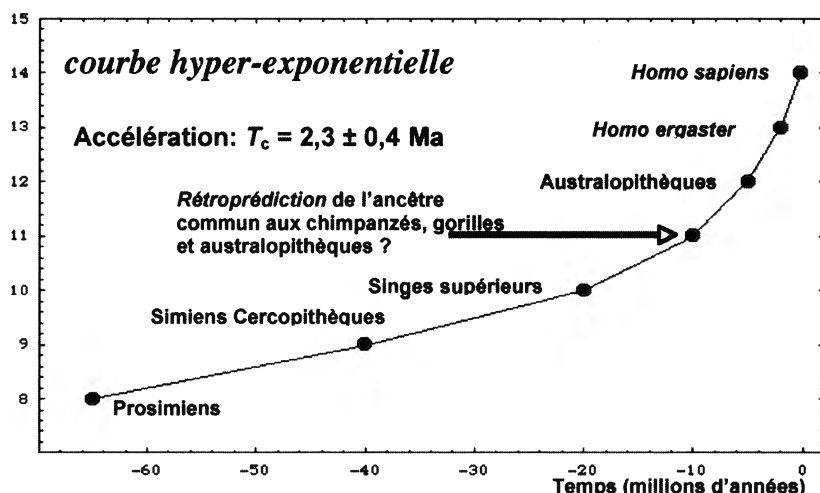


Figure 2.30. Loi log-périodique appliquée à la succession des grands plans d'organisation des primates.

L'analyse quantifiée de la morphologie des crânes et mâchoires des singes montre l'existence de cinq grands plans d'organisation nettement distincts, respectivement lémurien (prosimien), des singes à queue (simiens), des singes anthropoïdes (singes supérieurs), des singes bipèdes (australopithèques) et des hommes archaïques (Homo ergaster) et modernes (Homo sapiens). Ils sont identifiables par leurs degrés de contractions crânio-faciales, de plus en plus forts, qui se traduisent aussi par des élargissements corrélatifs de la mâchoire. Un point situé à -10,5 Ma. suggère la place de l'ancêtre commun aux gorilles, chimpanzés et pré-humains telle qu'elle est prévue par la génétique. Le diagramme montre une accélération évolutive et un $T_c = 2,3 \pm 0,4$ Ma. (d'après Chaline, Nottale, et Grou, 1999).

Il est apparu que la répartition des dates d'apparition de ces plans d'organisation correspondant à des bifurcations, événements majeurs de l'histoire des primates, pouvait être ajustée, avec une haute signification statistique, par une loi d'accélération log-périodique (fig. 2.30). Le rapport d'échelle est $g = 1,736 \pm 0,013$, un rapport d'échelle trouvé très fréquemment dans de nombreux systèmes (vivant et non vivant). Le T_c obtenu pour l'ensemble des primates est de $+ 2,25 \pm 0,80$ Ma.

Le digramme montre qu'un prochain point de bifurcation potentiel se situerait à + 800 000 ans. Notons ici qu'il ne faut pas confondre des échelles de temps différentes. Notre analyse s'est faite sur des lignées évolutives, donc sur des échelles de temps global, de l'ordre de la centaine de millions d'années. De ce point de vue, des écarts temporels de l'ordre du million d'années sont donc en fait microscopiques. La prédiction du prochain saut pour la lignée des primates qui contient les hominidés

à 800 000 ans, et celle du temps critique à 2,3 Ma. est celle du modèle mathématique idéal. Néanmoins, dans la réalité il y a des effets de seuil, les barres d'erreur et les pics de probabilité ont une certaine largeur. En se rapprochant du temps critique, on prévoit une densité de plus en plus élevée de pics de probabilités qui en fait se fondent en un seul grand pic unique d'un niveau supérieur. Il n'est pas exclu qu'on puisse interpréter ces résultats en identifiant l'apparition d'*Homo sapiens* au temps critique, du fait du faible écart temporel (2,5 Ma.) entre l'époque de son apparition (-0,2 Ma.) et le T_c , comparé au temps total de la lignée des primates (> 65 Ma.) si l'on remonte aux premiers primates, et 230 Ma. par rapport aux premiers mammifères. Autrement dit le temps critique aurait été atteint à l'époque « actuelle », à un million d'années près, c'est-à-dire à la résolution considérée avec l'apparition d'*Homo sapiens*. Cette interprétation en tant que temps critique déjà atteint pour notre lignée est confortée par les arguments anatomiques à propos de la limite atteinte par la position du trou occipital qui est au maximum de son extension antérieure possible dans notre type de bipédie.

La courbe log-périodique montre qu'il y a une zone de probabilité d'un événement que la paléontologie n'a pas encore identifié avec certitude à -10,5 Ma. Cette date, une rétroprédiction, correspond aux évaluations théoriques des généticiens pour placer l'ancêtre commun¹ aux singes supérieurs et aux hominidés. Les fossiles découverts actuellement comme « ancêtre commun supposé », manquent fortement de lisibilité. À suivre...

**• Le développement embryologique humain :
test de l'invariance d'échelle dans le vivant
de l'ontogenèse à la phylogenèse**

Compte-tenu des résultats obtenus à grande échelle pour la phylogénie des primates, il était intéressant de tester cette approche à une échelle beaucoup plus petite, individuelle, celle du développement ou *ontogenèse*. En effet, s'il y a *invariance d'échelle*, la loi log-périodique ne pourrait-elle pas être efficiente à l'échelle individuelle, du fait que « *l'ontogenèse crée la phylogenèse* » comme l'a montré Garstang en 1922.

1. Les ancêtres communs théoriques se situent à 10,5 Ma., mais la paléontologie n'a pas encore mis au jour le fossile de l'ancêtre commun possible aux australopithèques, aux chimpanzés et aux gorilles comme le suggèrent les comparaisons des chromosomes (Chaline et al., 1991). Les restes d'*Orrorin tugenensis* et de Toumaï (*Sahelanthropus tchadensis* à -7 Ma.) ne sont absolument pas convaincants.

C'est le test du développement humain depuis la fécondation jusqu'à l'acquisition de l'autonomie du jeune par rapport aux parents qui a été réalisé. Pour ce test, Roland Cash a utilisé les dates consensus retenues par tous les embryologistes, puis celles intervenant après la phase embryonnaire du développement du système nerveux et enfin celles d'après la naissance, du développement psychomoteur de l'enfant (point de vue d'un pédiatre¹).

1. Les étapes du développement de l'embryon et de l'enfant.

L'embryologie exprime de la façon suivante les grandes étapes du développement après le temps 0 de la fécondation :

- stade 2 cellules (2 blastomères) : 30 heures après la fécondation ;
- puis divisions cellulaires successives, et stade de la morula (16 blastomères) au 3^e jour ;
- blastocyte, formation d'une cavité dans l'œuf, différenciation trophoblaste/embryo-blaste : 4^e jour ;
- 6^e jour : nidation ;
- 2^e semaine : différenciation entoblaste/ectoblaste, et au 14^e jour, identification des membranes oro-pharyngée et cloacale (avec au 10^e jour, implantation dans l'endomètre) ;
- gastrulation : 3^e semaine, avec 3 couches cellulaires, et 3 structures importantes : la ligne primitive (15^e jour), la chorde (16^e jour) et le tube neural (neurulation) en fin de semaine ; l'ébauche cardiaque commence à battre à la même date ;
- 4^e à 8^e semaine : délimitation de l'embryon, avec ébauche des membres au 28^e jour, croissance de l'extrémité céphalique à la 5^e semaine, formation de la face pour arriver à la fin de la 8^e semaine avec un embryon qui a son aspect humain ;
- 12 semaines (3 mois) : fin de la période embryonnaire, début de la période fœtale ;
- formation des poumons fonctionnels (24-26^e semaine) ;
- 25^e semaine. C'est la date qui constitue le seuil de viabilité minimale d'un fœtus né avant terme.

Après la naissance, les grandes étapes du développement psycho-moteur sont les suivantes :

- prise de contact/identification de sa propre personne : 6-8 mois ;
- phase de déplacement : 9 mois ;
- acquisition du langage, abstraction : entre 1 an et 2 ans et demi ;
- sociabilisation : 3 ans ;
- phase d'identification : 5-7 ans ;
- phase d'opposition, pré-adolescence : 10 ans ;
- adolescence, découverte de la sexualité : 12-13 ans ;
- acquisition de l'autonomie par rapport aux parents, majorité : 18-25 ans.

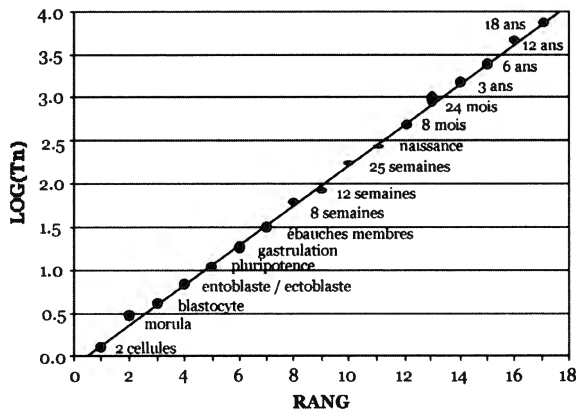


Figure 2.31. Répartition log-périodique des événements de l'ontogenèse humaine.

Logarithme décimal $\log T_n$ des dates de l'ontogenèse humaine en fonction de leur rang n . La hauteur des points donne l'intervalle de confiance sur les dates (on a supposé une erreur de $\pm 12\%$ sur les trois premières dates...). On constate une décélération depuis la fécondation qui peut permettre une rétroprédiction de ce phénomène à quelques heures près (d'après Cash et al., 2002).

Le résultat (fig. 2.31) est cohérent avec cette relation ontogenèse-phylogénèse. Le modèle log-périodique décrit avec un haut niveau de signification statistique, les étapes de l'embryologie humaine et post-natales. La valeur du paramètre g est très proche, ce qui renforce l'analogie entre les deux phénomènes. Si le modèle log-périodique est moins précis après la naissance, c'est à cause des variations inter-individuelles résultant en partie des phénomènes épigénétiques¹. Les étapes marquantes de l'enfance et de l'adolescence sont en effet affectées de barres d'erreur plus importantes que celles des phénomènes prénataux. Il est important de constater que les points qui suivent la naissance décélèrent depuis une date située plus d'un an avant la naissance, la conception étant incluse dans les barres d'erreur. Le paramètre g égal à $1,71 \pm 0,01$, est très proche de celui observé dans la phylogénèse des primates. Les dates du développement entre la naissance et la fin de la croissance améliorent encore la précision, puisque la date de conception T_c , peut être rétroprédite à 2 h ou 7 h près, ce qui présente un intérêt considérable au point de vue juridique dans les litiges relatifs à la naissance. L'information sur les temps de gestation semble rester présente, bien que d'une façon plus grossière. Sur la base des données utilisées, on peut théoriquement prolonger la série en utilisant une valeur de g de 1,71, ce qui donne pour les étapes suivantes, des pics respectivement situés entre 32-33 ans, 56-60

1. Voir Chaline. *Quoi de neuf depuis Darwin ?* Ellipses. 2006.

ans et un troisième peu de temps avant 100 ans. La valeur autour de 33 ans correspond à l'apogée de la vie physiologique avant sa dégradation et les deux pics suivants, à deux périodes critiques des changements de capacités physiques et intellectuelles.

Ces résultats peuvent s'interpréter en tant que *phénomènes à mémoire*, où chaque niveau d'organisation s'appuie sur les précédents, sans retour en arrière possible. Il y a analogie d'évolution entre ontogénie et phylogénie en raison des contraintes identiques existantes et hiérarchisées : différenciation des couches cellulaires, des tissus, des organes, des individus, des populations, des colonies, des espèces, jusqu'aux clades supra-spécifiques et enfin à la biosphère, terme ultime de la globalité vivante.

• La vie dans son ensemble

Nottale a pu, grâce aux données tirées du livre de Delsemme de 1994 sur « *L'origine cosmique de la vie* », compléter l'histoire des grands événements de la vie depuis le big-bang de l'univers jusqu'aux mammifères (fig. 2.32). Cette analyse confirme une *succession de bifurcations se réalisant toujours selon une accélération avec le même rapport d'échelle moyen égal à racine de 3*.

• Accélération et décélérations

Dans notre premier article à l'Académie des sciences de la Terre en juin 1999, nous avons insisté sur le caractère arborescent de l'arbre de la vie, qui nous a amené à privilégier une interprétation des lois log-périodiques obtenues en termes de *structures fractales auto-similaires*. Mais nous avons conclu, prudemment, en précisant que « *l'arbre de la vie dans tous ses détails pourrait se révéler plus complexe qu'un arbre végétal* ». Or le *comportement critique*, qu'il s'agisse de *loi de puissance* ou de *fluctuations log-périodiques* autour de cette loi, est *a priori symétrique* autour de la *valeur critique de la température*, car il ne dépend que de la valeur absolue de l'écart à cette valeur critique. Dans le cas d'un *phénomène d'évolution temporelle*, cette symétrie se fait autour de la valeur critique du temps. Autrement dit l'époque de la crise joue le rôle d'une origine naturelle des temps. On s'attend donc à observer, aussi bien des *accélérations log-périodiques* vers l'époque critique, avec les « *événements précurseurs* », que des *décélérations log-périodiques* à partir de l'époque critique, avec les « *événements répliques* » (fig. 2.24).

Nous avons effectivement rencontré une accélération chez les primates et les dinosaures, une décélération au cours de l'ontogenèse humaine, une décélération suivie d'une accélération chez les rongeurs, et une décélération pour la lignée des échinodermes, à partir d'une époque critique qui s'identifie pour eux à leur date d'apparition. Une accélération caractérise l'histoire globale de la vie depuis ses commencements.

• La signification du temps critique

L'analyse des données concernant les dinosaures sauropodes a permis d'aborder le problème de la *signification du temps critique*. On sait que les dinosaures se sont éteints à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire, il y a -65 millions d'années avec de nombreux autres groupes, les causes de cette extinction étant encore très discutées¹.

Quoi qu'il en soit, le temps critique des dinosaures de -140 Ma. ne correspond absolument pas à leur date d'extinction à -65 Ma. Or l'étude de Sereno concernait le système de locomotion qui ne semble plus changer effectivement après -140 Ma. On peut alors se demander si ce temps critique ne « *pourrait pas correspondre à une perte de potentialité d'évolution de ce système biologique par manque d'innovation* », puisqu'aucune nouveauté majeure n'apparaît après cette date ? On peut concevoir que les changements intervenant dans l'environnement fragilisent les groupes ayant atteint leur temps critique. Si ces groupes se révélaient incapables de produire de nouvelles mutations permettant d'acquérir une morphologie innovante qui serait nécessaire pour s'adapter aux nouvelles conditions, alors ces groupes disparaîtraient. C'est la *contingence de l'évolution* par le biais des changements d'environnements qui s'exprimerait ainsi à cette très grande échelle du vivant, les changements observés à la limite Crétacé-Tertiaire ayant été fatals à de nombreux groupes animaux (Dinosaures, Ptérosaures, Mosasaures, Ammonites, etc.).

1. S'agit-il des conséquences de la chute d'une météorite, comme le propose Alvarez, de régression marine comme le suggère Ginsburg, ou des effets des éruptions volcaniques du Dekkan (Inde) comme l'envisage Courtillot, d'un changement naturel de climat, ou de la coïncidence de tous ces phénomènes ? Si un environnement de type « *hiver nucléaire* » avait effectivement suivi la chute de cette météorite tombée dans le golfe du Mexique à Chixculub (presqu'île du Yucatan, Mexique), comment expliquer alors que les oiseaux, animaux aériens très fragiles aient pu survivre à ce cataclysme avec les mammifères, les crocodiles et les tortues ?

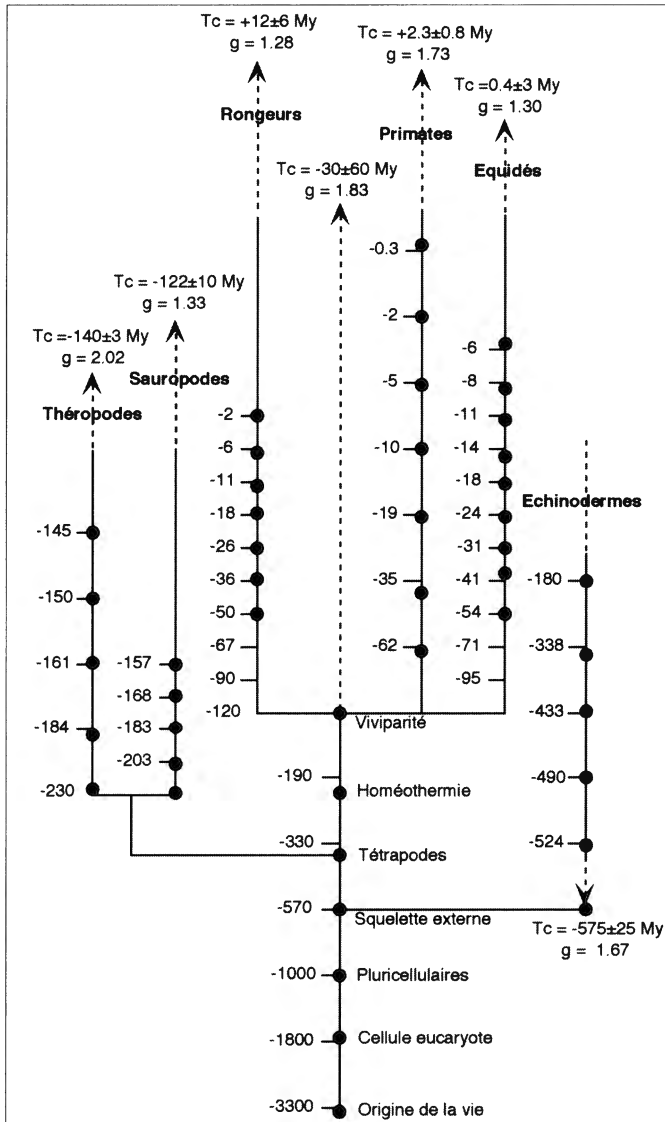


Figure 2.32. Répartition des grands événements de la vie depuis le big-bang de l'univers jusqu'aux mammifères.

L'analyse quantifiée de la morphologie des crânes des primates montre l'existence de cinq grands plans d'organisation identifiables par leurs degrés de contractions crâno-faciales, de plus en plus forts. Le diagramme montre une accélération évolutive avec un Tc = $2,3 \pm 0,4$ Ma. L'évolution des familles de rongeurs montre tout d'abord une nette décélération, suivie d'une accélération seule visible sur le diagramme. Le Tc est à $+23$ My = Ma. L'évolution du système de locomotion des dinosaures sauropodes montre une accélération évolutive avec un Tc à -139 Ma qui pourrait correspondre à la perte des potentialités évolutives du système de locomotion. Pour les dinosaures théroptères, on observe également une accélération avec un Tc à -140 Ma. Pour les équidés d'Amérique du Nord, on constate une accélération évolutive jusqu'au temps critique proche de l'actuel (Tc = $0,4$ Ma), puisqu'ils se sont éteints là-bas il y a environ 8 000 ans et ont été réintroduits par les conquis-

tadors. Les échinodermes se caractérisent par une décélération commençant à -575 Ma. date d'apparition du plan d'organisation « échinoderme ». Quant aux événements majeurs du vivant depuis l'origine de la vie, ils se répartissent selon une loi d'accélération globale (d'après Nottale et al., 2000).

Cette interaction entre potentialités adaptatives génétiques internes limitées et contraintes externes environnementales fortes s'exprimant par la sélection naturelle est une interprétation plausible de la disparition assez mystérieuse de nombreux groupes zoologiques qui ont peuplé notre planète aux diverses époques géologiques, mais d'autres sont peut-être possibles ! En tout cas, elle expliquerait aussi, avec un T_c propre à chaque clade, que *les groupes biologiques ont tous une histoire distincte et des durées de vies différentes* en raison de potentialités variées sans doute liées aux génomes des formes initiales et aux conditions environnementales contemporaines. On comprend ainsi mieux la *pseudo-loi des relais* exprimant le fait que chaque groupe a un début et une fin et une biodiversité propre.

Si le *génome de départ est le signataire de l'histoire du groupe*, on comprend *pourquoi certains groupes, en fonction d'une sensibilité des conditions initiales du génome à l'environnement, ont pu avoir des diversifications exponentielles, alors que d'autres n'ont eu que des diversifications fort réduites et des répartitions temporelles variées.*

• Réflexions sur les conséquences génétiques des lois log-périodiques

L'existence des accélérations ou des décélérations log-périodiques dans la répartition chronologique des nœuds des clades des groupes étudiés pose le problème de leur liaison avec la génétique des mutations. Nous avons vu que les mutations se réalisaient au hasard, molécule par molécule, selon un taux assez régulier.

Si l'ensemble de l'arbre de la vie est fractal par la répartition de ses bifurcations, une lignée particulière ne l'est pas forcément, mais peut résulter d'une simple progression géométrique sans fractalité.

L'étude du *cytochrome c*, ainsi que l'accord entre paléontologie et génétique en ce qui concerne la date d'apparition de l'ancêtre commun australopithèque/homme-chimpanzé-gorille, démontre de manière solide que le taux de mutation reste constant en moyenne. On ne peut donc attribuer l'accélération (ou la décélération) observée à une variation de ce taux. Il aurait fallu qu'il ait varié d'un facteur 2000 entre l'apparition de la vie et les derniers sauts répertoriés (qui est le facteur d'accélération observé), ce qui est improbable et même inconcevable. De plus, on observe à la même période géologique, au Quaternaire, des lignées de rongeurs qui évoluent rapidement ou lentement, accélérant ou décélérant,

ou qui restent en stase. Cela signifie que c'est sur *la nature des événements résultants que porte l'accélération, pas sur le taux de mutation*. Il y a donc deux interprétations possibles pour les accélérations de chronologie évolutive observées.

L'une est que les événements correspondant aux sauts majeurs répertoriés sont bien d'égale importance : c'est bien le cas, par exemple, des changements de plan d'organisation des primates, identifiés par la succession des contractions crânio-faciales de plus en plus fortes. Dans ce cas, l'accélération de la chronologie des événements dans une tendance évolutive soutenue, car retenue par la sélection naturelle, implique donc que sur une lignée donnée accélérante, l'évolution se révèle de plus en plus efficace, ici par une augmentation du cerveau, un peu à la façon *des gains de productivité* en économie (voir le chap. suivant).

La seconde interprétation est que l'accélération à taux de mutation constant correspond à des événements d'importance décroissante. Notons néanmoins que même dans ce cas, un saut évolutif apparemment moins important d'un point de vue morphologique ou fonctionnel (qui sont les deux critères utilisés pour les définir) peut se révéler d'importance majeure du point de vue de ses conséquences à plus long terme (à l'exemple de l'émergence d'*Homo sapiens*).

Les mutations correspondant aux événements paléontologiques étudiés sont vraisemblablement des mutations structurales de gènes de régulation *Hox*. Or ces sauts majeurs qui interviennent le long d'une lignée se réalisent à l'intérieur d'un plan d'organisation qui s'est élaboré par une (ou plusieurs) mutation (s) de gènes *Hox* très innovantes. Ensuite les mutations des gènes *Hox* et les autres, qui interviennent à l'intérieur de ce plan, sont de moins en moins importantes au point de vue structurel. Elles finissent par toucher des caractères mineurs, comme des nombres de poils chez les arthropodes, mais qui peuvent cependant contribuer à créer un isolement reproductif et donc une nouvelle espèce.

Dans l'histoire d'un groupe zoologique, on passerait donc d'une mutation première majeure Hox constituant un nouveau plan d'organisation selon des pics de probabilité, accélérés ou décélérés, selon leur position par rapport au temps critique, à des mutations terminales touchant les variants des caractères de plus en plus mineurs et de plus en plus spécialisées.

Rappelons que les mutations *Hox* interviennent généralement de façon précoce dans le développement, alors que les mutations des caractères simples sont plus tardives. *Il y aurait peut-être alors, un déplacement temporel de l'importance des effets des mutations au cours du développement, un peu à la façon de la colinéarité d'intervention des gènes Hox dans les séquences du développement ?*

Autrement dit les mutations à l'intérieur d'un groupe zoologique donné seraient comme emboîtées (fractales ?) à l'intérieur du nouveau plan d'organisation, selon une hiérarchie descendante comme si, au fur et à mesure des mutations, un groupe perdait ses « degrés de liberté, ses possibles ». Y aurait-il une limite biologique au nombre des mutations majeures dans un groupe donné jusqu'à ce qu'une nouvelle grande mutation Hox majeure recrée un nouveau plan d'organisation dérivé avec un nouveau grand nombre de degrés de liberté ?

Ces idées qui vont à l'encontre d'un certain nombre d'hypothèses actuelles demandent naturellement à être critiquées et approfondies par d'autres exemples. Ce sont seulement des pistes de recherche...

• Ces résultats sont-ils les conséquences de biais ?

Les résultats novateurs non classiques de notre approche nous ont imposé de rechercher et de discuter de tous les biais potentiels possibles.

Le premier point concerne les données paléontologiques brutes des cladogrammes. Il n'y a eu aucun choix dans les données puisque nous avons utilisé exclusivement et sans les modifier des cladogrammes bien datés et réalisés par les meilleurs spécialistes de la discipline concernée. Certes la constitution d'un cladogramme se réalise en retenant des caractères nouveaux uniques caractéristiques des bifurcations, les *apomorphies*. Néanmoins, le choix des apomorphies reste trop subjectif et diffère à tel point d'un spécialiste à l'autre, qu'il est pratiquement impossible de trouver deux cladogrammes de relations de parenté identiques pour un groupe donné. C'est donc la pratique de la méthode cladistique qui est en cause et pourrait induire des résultats biaisés. La raison tient également au nombre de caractères retenus. En outre, plus ces caractères sont nombreux et plus le nombre d'arbres potentiels de relations de parenté devient gigantesque. Et même si on recherche les arbres consensus les plus probables possibles, leur nombre reste très grand. Malgré tout, dans quelques groupes règne un certain consensus des spécialistes. Nos résultats, peuvent être considérés comme un test de leur qualité, et montrent que les arbres étudiés ici sont dans l'ensemble sans doute assez proches de la réalité.

Il faut savoir que, méthodologiquement, l'existence d'une loi d'échelle ainsi que la valeur de ses paramètres essentiels aux incertitudes près, ne dépendent ni des variations des valeurs des dates, ni de leur choix. Dans la version la plus simple de la loi considérée comme une première approximation satisfaisant la caractéristique d'une invariance d'échelle discrète, les paramètres essentiels se ramènent en fait à la seule valeur de l'époque critique. En effet, le rapport d'échelle, quant à lui, n'a rien

d'absolu, car il est relié à la densité du nombre d'événements considérés. Aussi un changement de critères sur le caractère majeur ou non, d'événements changera la valeur du rapport d'échelle. C'est ainsi que, si un cladiste, incorpore par exemple, deux fois plus d'événements, le rapport d'échelle g sera simplement remplacé par sa racine. Certains ont proposé, pour l'évolution des primates, des bifurcations différentes fondées sur d'autres caractères que les plans d'organisation utilisés à l'origine dans notre travail. En fait, vérification faite, il s'avère que ces autres caractères s'alignent exactement selon la même loi, pour la simple raison qu'ils entrent dans la barre d'erreur temporelle des divers plans d'organisation auxquels ils sont rattachés.

Par contre, dans l'hypothèse où l'accélération (ou la décélération) log-périodique observée représente bien une structuration réelle d'une lignée évolutive donnée, l'époque critique doit être spécifique de cette lignée et ne pas dépendre du seuil appliqué au choix des événements (toujours en tenant compte, naturellement, des barres d'erreur). Il en est bien ainsi jusqu'à maintenant en ce qui concerne les données étudiées pour lesquelles nous avons considéré plusieurs choix différents possibles (primates, rongeurs, dinosaures sauropodes et théropodes).

Il faut aussi savoir que cette loi est si structurante qu'il suffit de trois événements datés pour pouvoir la construire et déterminer le T_c . Ce résultat montre que malgré la mauvaise qualité des archives paléontologiques, des données souvent entachées d'incertitudes permettent d'évaluer de façon approchée la loi d'évolution log-périodique particulière d'un groupe donné, mais plus le nombre de points bien datés est grand, plus l'évaluation du temps critique devient précise.

On a analysé l'incertitude sur les datations. Pour que l'incertitude influe sur la loi, il faudrait que les erreurs dépassent 28 %, ce qui est loin d'être le cas.

Certains ont voulu voir dans nos résultats une représentation anthropocentrique du vivant. Pour cela il faudrait que le temps critique corresponde à la valeur zéro, c'est-à-dire l'actuel, ce qui n'est jamais le cas, sauf pour les équidés d'Amérique du Nord (aux barres d'erreur près) pour qui il est effectif. Le temps critique se trouve, soit dans le passé, à -600 millions d'années pour les échinodermes et à -140 millions d'années pour les dinosaures sauropodes, soit dans le futur, à +23 millions d'années en moyenne pour les rongeurs (mais il varie suivant les lignées considérées entre -21 Ma. et +60 Ma.) et à +2,5 millions d'années pour les primates.

Précisons tout de suite un point très important, si la date du temps critique peut être calculée par la loi log-périodique avec une certaine

approximation, on ne peut cependant en aucun cas dire ce que sera la nature, ni l'ampleur de cet événement.

L'introduction de *lois probabilistes* (non déterministes du point de vue des trajectoires individuelles, qui restent imprédictibles, mais déterministes du point de vue de l'évolution de structures décrites en termes de densité de probabilité, ce que nous avons appelé un « *déterminisme structurel* ») dans des phénomènes structurels réputés se faire exclusivement au hasard des mutations triées par la sélection naturelle peut sembler paradoxale.

Nottale a testé cette possibilité en réalisant 10 000 simulations Monte-Carlo dans lesquelles des dates ont été tirées au hasard, puis rangées par ordre chronologique pour chaque analyse temporelle. Dans chaque cas, on a fait varier le T_c et l'on a établi la courbe $t(T_c)$ associée. Le pic de cette courbe permet de déterminer T_c par optimisation de t ; ce sont les valeurs maximales de la variable de Student. On constate que dans ce cas de dates prises au hasard, le seuil de probabilité t n'atteint 93 que dans 1 cas sur 10 000 ! Ce type de simulation permet d'établir la signification statistique des ajustements réalisés à l'aide des lois log-périodiques, sur les données d'observation.

En fait il n'y a aucune incohérence dans l'existence de ces *lois déterministes pour les structures* (c'est le cas de la mécanique quantique standard, archétype de la perte du déterminisme classique, dans laquelle l'équation de Schrödinger dépendante du temps décrit bien pourtant une évolution parfaitement causale et déterminée de la fonction d'onde et donc de la probabilité qui s'en déduit). Il s'agit d'une prédictibilité à caractère probabiliste. Les structures sont déterministes ; il s'agit d'un déterminisme essentiellement structurel. La loi log-périodique n'est donc pas une loi reléguant le hasard et rejetant la contingence¹, tout au contraire, c'est une *loi du hasard*. Comme l'a montré le maître du déterminisme, Laplace (1749-1827) dans son *Essai philosophique sur les probabilités*, le hasard crée de l'ordre : « dans une série d'événements indéfiniment prolongée l'action des causes régulières et constantes doit l'emporter à la longue sur celle des causes irrégulières ». Une affirmation confirmée par Kolmogorov, l'un des plus grands mathématiciens du XX^e siècle, qui a démontré mathématiquement², que « les

1. La *contingence* est un terme qui s'oppose dans tous ses sens à *nécessaire*. On dit qu'un événement est contingent si, tout en étant soumis à des lois, il a la possibilité d'être ou de ne pas être.

2. La répartition événementielle des phénomènes aléatoires comme les sorties du jet du dé ou d'une pièce de monnaie varie selon une loi s'exprimant par une « *courbe en cloche* » décrite par Gauss.

phénomènes aléatoires, considérés dans leur action collective à grande échelle créent une régularité non aléatoire ».

La mise en évidence de la répartition log-périodique des événements évolutifs majeurs des clades est une découverte qui montre la *quasi-universalité* de certaines *lois de structuration physique*. Elle décrit à la fois de nombreux *systèmes physiques* et des *systèmes biologiques hiérarchiques arborescents*. Les événements sont possibles et plus probables à certaines périodes, mais jamais obligatoires. Ils expriment ce que l'on appelle « *l'imprédictibilité* », ou « *l'imprédictibilité* » du devenir des phénomènes, que ce soient des vagues, des nuages, des flammes, la foudre ou ici de l'évolution des espèces. Ils font partie de la *contingence* du phénomène évolutif. Ces fluctuations tout à fait extrêmes s'expriment par des *fonctions discontinues* pressenties par Henri Poincaré : « *le hasard résulte de la complexité ; quand les causes sont multiples d'imperceptibles perturbations engendrent de grands effets. La moindre imprécision prend rapidement des proportions énormes et rend illusoire une relation stricte de causes à effets* ». Cependant, malgré ce hasard difficilement prévisible, l'existence des *lois log-périodiques*, inconnues à l'époque, montre une certaine *prédictibilité probabiliste* des phénomènes.

• La découverte de la loi de structuration log-périodique auto-organisatrice, une réponse à l'interrogation de Gould

C'est d'ailleurs ce que pressentait également Gould lorsqu'il écrivait¹ : « *la vie exhibe une structure obéissant aux principes de la physique... Il y a des lois pour le cadre général, des formes liées aux contraintes de construction et fonctions des organismes, et la contingence pour le détail* ». Gould se posait d'ailleurs la question importante : « *Où fallait-il placer les limites entre la prédictibilité découlant des lois invariables et les multiples éventualités, de la contingence historique ?* » Pour Gould, « *l'apparition de la vie était quasi-inévitable étant donné la composition de l'atmosphère et celle des océans primitifs avec les principes physiques des systèmes capables d'auto-organisation* ».

La loi log-périodique est donc une réponse explicite aux interrogations de Gould. Elle montre que ce sont vraisemblablement des *lois physiques de prédictibilité probabiliste* qui imposent des *contraintes structurelles sous-jacentes propres au vivant* et que la *contingence*, plus ou moins forte selon les circonstances spatio-temporelles externes du moment, vient interférer avec ces lois en aboutissant à un compromis qui est celui de l'histoire réelle des divers clades biologiques.

1. Voir Gould. 1991. *La vie est belle. Les surprises de l'évolution*. Seuil. Coll. « Science Ouverte ».

Il reste, bien entendu, à confirmer ces résultats par de nombreux tests. À l'heure actuelle, ces lois particulières de prédictibilité probabiliste sont relativement étrangères à beaucoup de scientifiques non-spécialistes et au grand public en général. Par définition, elles apparaissent comme un *oxymoron*¹ celui de la *prédictibilité-probabilité*, du *déterminisme* et du *hasard* qui coexistent et peuvent sembler antagonistes, l'un et l'autre étant majoritaires à des échelles différentes. Le *déterminisme* est en effet dominant aux grandes échelles (relativement à la transition quantique-classique) où s'expriment les lois de la *physique classique* de Newton. Néanmoins, aux très petites échelles relatives, c'est l'*aléatoire* qui est l'élément dominant partout où s'expriment les lois de la *physique quantique*. Le *dualisme sous-jacent fractal-nonfractal (non différentiable-différentiable)* superposé, dominant ou dominé selon les échelles, est une expression de la complexité structurelle et semble être l'une des caractéristiques inhérentes à la vie. C'est une manifestation de la *relativité d'échelle*, théorie très générale de l'*auto-organisation* caractérisée par une dynamique nouvelle ayant un caractère *quasi-quantique* avec une évolution par sauts d'énergie ou de complexergie, selon l'espace considéré.

1. On appelle *oxymoron* une expression qui réunit deux mots contradictoires comme une douce violence ou une obscure clarté. Le *déterminisme probabiliste* en est un.

2.6

Conclusion générale sur la relativité d'échelle et ses implications dans le vivant

La *relativité d'échelle* est susceptible d'apporter une véritable *révolution conceptuelle* dans l'étude et la compréhension du système Vie.

Aux échelles du vivant, *l'espace-temps au sens d'Einstein (fondamental) n'est pas fractal, mais par contre le milieu biologique montre un grand nombre de structures fractales sur une large gamme d'échelles.*

Un tel milieu peut jouer, en ce qui concerne les objets biologiques (organites dans la cellule, cellules dans le tissu, etc.) qui y sont plongés, le rôle effectif d'un champ ou d'un espace fractal, ce qui pourrait mener à l'apparition de certaines propriétés de type quasi-quantique pour la dynamique de ces objets. Dans ce cadre, l'interaction entre l'objet et l'espace ou le milieu qui le contient devient essentielle. C'est tout un nouveau domaine d'investigation en biologie qui est ouvert par cette perspective.

Ce travail permet d'avancer quelques idées et de faire des suggestions de recherche :

1. Des solutions de l'équation généralisée de Schrödinger macroscopique agissant dans l'espace standard ordinaire pourraient conduire à des *duplications spontanées* lors d'une augmentation de l'énergie du système. Nous en avons vu de nombreux exemples à toutes les échelles du vivant, qui impliquent aussi l'existence de *phénomènes quantiques macroscopiques*, comme par exemple le *fuseau mitotique*, suivant une hypothèse qui sera mise à l'épreuve dans des travaux théoriques et expérimentaux à venir ;

2. L'origine de la vie comme expression de l'équation de Schrödinger généralisée au niveau fondamental de la complexergie dans l'espace des échelles est une nouvelle approche particulièrement intéressante et « potentiellement explicative » du phénomène ; elle aussi à valider

dans des travaux futurs. La vie « pourrait trouver » son origine dans une *transition majeure des lois de la nature* elles-mêmes, qui passeraient de lois classiques à des lois de type *quasi-quantique macroscopique*, à partir d'un certain niveau de complexité des structures formées par la chimie prébiotique. Elle suggère ainsi une *structuration physique quantique macroscopique naturelle*, « *auto-organisatrice de la vie* », intervenant dans l'environnement disparu des débuts de la planète, qui contenait de nombreuses molécules nécessaires susceptibles de former les éléments des premières structures vivantes selon une hiérarchie ascendante, de LUCA aux pluricellulaires.

3. Des solutions de l'équation généralisée de Schrödinger agissant dans l'espace des échelles, pourraient correspondre à un nombre croissant de *niveaux hiérarchiques morphologiques imbriqués*, donc fractals et parfois auto-similaires s'exprimant selon une répartition log-périodique. La *formation de structures cellulaires* « pourrait » être reliée à la *propriété de confinement* induite par une « *dynamique d'échelle* » qui provoque des « *écarts à l'invariance d'échelle* » ; une véritable auto-organisation du vivant.

4. Des structures fractales apparaissent aux divers niveaux de la structuration du vivant, depuis l'ADN, les éléments cellulaires constitutifs, les organes et le fonctionnement temporel de ces structures, jusqu'aux populations et espèces. Ces structures fractales visibles, expressions macroscopiques quantiques, ont l'avantage d'augmenter les surfaces de contact (poumons) tout en diminuant le volume des entités (comme l'ADN dans les chromosomes) et ont été vraisemblablement, pour ces raisons évidentes, retenues par la sélection naturelle. Les répartitions des taches et des rayures des robes des mammifères sont peut-être à classer ici.

5. Les phénomènes de croissance morphogénétique pourraient correspondre à des solutions de l'équation de Schrödinger généralisée, (qui se ramène aux équations de la mécanique des fluides incluant un potentiel quantique) comme nous l'avons vu dans la morphogenèse des structures florales de *Liriodendron* et de *Platycodon*, ces deux exemples très démonstratifs (fig. 2.14 et la fig. 4.24 de la Quatrième partie). Une découverte qui suggère également que la répartition des pétales de la phyllotaxie selon la *suite de Fibonacci*, pourrait correspondre, elle aussi à des *solutions de l'équation de Schrödinger généralisée* s'exprimant selon des *pics de probabilité optimisés par la sélection naturelle*. Ce serait d'autres exemples de *quasi-quantique macroscopique*.

6. Aux grandes échelles supraspécifiques, celles des clades emboîtés, des lois log-périodiques semblant imposer une *structure arborescente globale* s'exprimant par des *pics de probabilité* qui pourraient correspondre également à des phénomènes *quasi-quantiques macroscopiques*. Le rapport d'échelle du vivant « g » semble, généralement et globalement, proche de racine de 3 ($g = 1,736 \pm 0,013$ pour les primates). Ce rapport semble être vraisemblablement une valeur placée sur un pic de probabilité retenue par la sélection naturelle.

7. L'expression de la relativité d'échelle dans le vivant se réalise par le biais de gènes variés selon l'échelle considérée. La façon dont s'est réalisée cette transcription reste une question ouverte.

8. Enfin, il semble, que l'intégration de la relativité d'échelle dans les concepts du vivant, contribuera probablement du point de vue biologique à la constitution d'une *biologie systémique théorique* (Auffray et Nottale, 2008 ; Nottale et Auffray, 2008). Quant au point de vue évolutif, elle servira à l'élaboration d'une *théorie de l'évolution plus globale du système Vie*, en y incluant en particulier, l'apport de la physique classique, mais aussi celle de la *physique quasi-quantique* dans des aspects *macroscopiques* absolument insoupçonnés jusqu'alors. La mécanique de l'évolution des espèces peut-être synthétisée comme le suggère la fig. 2.33 : *la relativité d'échelle contraint le vivant sous de multiples aspects, la génétique propose les innovations et le milieu et la sélection naturelle qui en résulte, dispose, optimise ou élimine...*

9. Il reste beaucoup de travaux à réaliser pour compléter cette théorie dans tous ses aspects, et ses applications futures potentiellement nombreuses, mais il faudra auparavant un changement de mentalité de la communauté scientifique, une ouverture vers l'innovation.

La théorie de la relativité d'échelle comme nouveau paradigme des lois de la nature ? Les observations et les nombreuses hypothèses présentées ici, sont très prometteuses. Ces résultats, encore très partiels, trop partiels à nos yeux, à cause du temps pris pour les approfondir, montrent dès maintenant la fertilité de la relativité d'échelle dans le domaine très paradoxal du vivant. Ce sont des pistes que nous proposons... Elles demandent naturellement à être validées.

Vers une théorie de la relativité d'échelle du vivant : RE-EVO-DEVO ? À nos successeurs développant la *nécessaire pluridisciplinarité* en physique-biologie-paléontologie de la tester et de la développer...

La mécanique de l'évolution après la structuration physique imposée par les contraintes de la relativité d'échelle, est celle des mutations, avec leurs effets sur le développement, suivis de l'interaction avec l'environnement qui donne, ou non, son label de survie à l'individu...

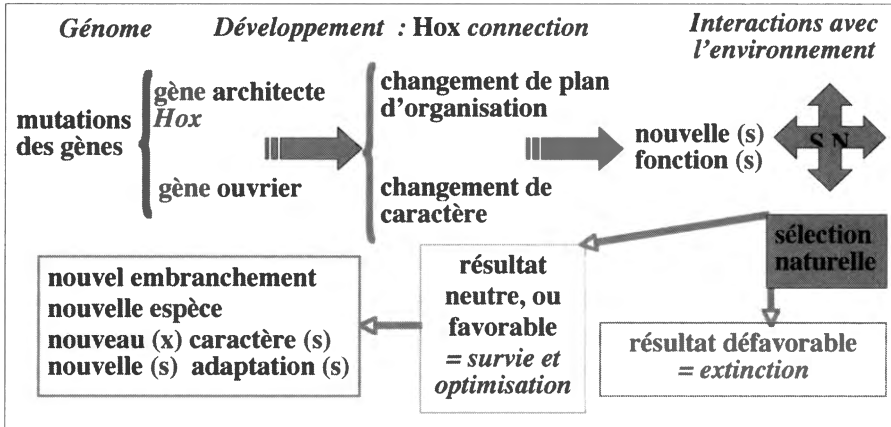


Figure 2.33. Mécanique évolutive.

Elle commence par les contraintes physiques imposées par la relativité d'échelle au vivant et se poursuit avec les mutations du génome ayant des influences précoces ou tardives sur le développement et s'achève avec la sélection naturelle qui résulte des diverses interactions avec l'environnement global avec le génome et façonne la biosphère : le génome propose, mais le milieu dispose.

Troisième partie

Relativité d'échelle et sociétés humaines

On se souvient que lors d'un travail précédent¹, il avait été possible, à partir d'un recensement des principales caractéristiques de l'évolution économique, de mettre l'accent sur l'une d'entre elles, l'accélération économique, et en procédant à une analyse en termes de lois log-périodiques, on avait effectué la prédiction d'un temps critique pour les sociétés humaines, devant se manifester au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle. Cette prédiction a commencé à se vérifier, en début de XXI^e siècle, entre autres, par des phénomènes d'épuisement de ressources naturelles. L'utilisation d'une loi log-périodique avait représenté une première application de la théorie de la relativité d'échelle aux sociétés humaines.

Nous allons, dans cette partie, tenter d'approfondir une démarche de mise en relation de la théorie de la relativité d'échelle avec la dynamique des sociétés humaines. Pour cela, dans un premier chapitre, nous reposerons la question d'une application de la théorie de la relativité d'échelle, effectuée de manière générale, aux systèmes économiques en évolution. Puis, dans un second chapitre nous développerons un examen plus détaillé de cette dynamique, sous un angle à dominante spatiale que nous qualifierons de multi-échelle. Enfin, dans un troisième chapitre, nous examinerons les possibilités de disposer d'une prédictibilité satisfaisante en sciences sociales.

1. Nottale, L., Chaline, J. et Grou, P. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Hachette. Paris.

3.1

Systèmes économiques et sociaux en évolution : changements d'échelles et fractionnement

Nous rappellerons tout d'abord quelles sont, pour nous, les grandes caractéristiques des systèmes socio-économiques en évolution, puis nous proposerons de passer d'une analyse en termes de *systèmes* à celle d'un ensemble organisé d'éléments à une échelle donnée, présentation que suggère la théorie de la relativité d'échelle. Nous ferons ensuite l'hypothèse que l'évolution des formes d'organisation s'effectue de manière fractionnée. Nous poserons alors la question de la possibilité d'un caractère universel des rythmes d'évolution. Enfin, nous reviendrons sur l'application de la théorie de la relativité d'échelle aux rythmes économiques.

Les grandes caractéristiques des systèmes socio-économiques en évolution

Comme nous l'avons annoncé, nous effectuerons d'abord un rappel des grandes caractéristiques de l'évolution économique, puis nous proposerons de nouveaux approfondissements de la principale caractéristique, celle que nous avons définie comme *la loi de recherche de gains de productivité*. Rappelons d'autre part qu'on a précisé ailleurs que pour nous, systèmes sociaux, systèmes socio-économiques, voire systèmes économiques, présentaient plus de similitudes que de différences de définitions¹. Aussi, il nous sera possible d'employer souvent l'un ou l'autre de ces termes, ou même le terme général de *sociétés*. Ces variantes possibles de termes n'auront pas d'impact sur notre démarche.

1. Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit.

Rappel des grandes caractéristiques de l'évolution économique

Généralement, l'histoire économique est présentée comme une suite d'événements, qui ne sont pas liés entre eux, où le hasard semble la norme, et où le terme d'évolution est rarement employé, sauf par exemple chez Schumpeter. Marx est un des rares auteurs à avoir conçu l'histoire des sociétés comme une succession de modes de productions. Si l'on consulte la plupart des ouvrages d'histoire économique, on est submergé par une multiplicité d'événements, de *crises* dont la définition n'est jamais donnée, dont les origines seraient chaque fois différentes, donc dues au hasard. Des régularités peuvent être mentionnées, comme par exemple la notion de « *cycles Kondratiev* », mais ce constat — d'une régularité en réalité limitée au XIX^e et au début XX^e siècle — prend un caractère absolu tel, que certains auteurs tentent de remonter au Moyen Âge pour retrouver ces *cycles*, d'autres cherchant à en appliquer la recette au XXI^e siècle !

L'option prise ici est celle d'une évolution économique présentant des caractéristiques discernables. On se souvient que, lors de précédentes études, on avait recensé six grandes caractéristiques de l'évolution économique : une grande loi de recherche de gains de productivité précisée par l'existence de discontinuités économiques, l'existence de hiérarchies économiques, le constat d'un processus d'accélération, une tendance à l'élargissement des espaces économiques, et une prédictibilité à caractère indéterministe.

► Une loi de recherche de gains de productivité

La grande loi qui commande l'évolution économique est, pour nous, celle d'une *tendance à la recherche de gains de productivité*. Rappelons qu'obtenir un gain de productivité signifie produire une plus grande quantité de biens en un même temps de travail — ou une même quantité en un moindre temps de travail. Nous apporterons plus loin des précisions permettant de compléter l'énoncé de cette loi.

► Existence de discontinuités économiques

Le caractère de discontinuités illustre la manière fractionnée dont s'effectue l'évolution économique, laquelle obéit à la loi de recherche de gains de productivité. Les discontinuités permettent d'expliquer la nature des crises économiques. Lorsque des limites de productivité sont atteintes, les structures qui fonctionnaient sur le mode précédent sont remplacées par un nouveau *mode de produire* qui permet de nouveaux

gains de productivité. Une crise économique se définit donc par la disparition d'un monde économique, en même temps que l'apparition d'un nouveau monde. C'est parce qu'il y a fractionnement du temps et discontinuité que l'évolution économique se poursuit.

► **Existence de hiérarchies économiques**

À tous les moments de l'évolution économique, il existe également un fractionnement de l'espace économique où se situent des hiérarchies économiques et des pôles de domination. On observe alors que les acteurs économiques qui obtiennent les gains de productivité les plus élevés se situent en sommet de hiérarchie et occupent les pôles de domination de la période.

► **Constat d'une accélération économique**

Le constat, que l'on a déjà rappelé, d'une accélération de l'évolution économique permet de déceler un aspect accéléré dans le fractionnement temporel de l'évolution économique. Il permet aussi de prédire l'aboutissement à une limite. On reviendra sur ce processus, extrêmement important pour comprendre l'histoire du XXI^e siècle.

► **Constat d'une extension des espaces économiques**

L'évolution économique se caractérise, entre autres, par une extension des espaces économiques, processus qui a conduit l'espèce humaine de l'occupation d'une portion de savane à la domination d'un espace mondial définissant la mondialisation économique.

► **Une prédictibilité à caractère indéterministe**

La dernière caractéristique présente une portée plus générale car elle s'applique à l'ensemble des utilisations des données précédentes. Elle permet de pratiquer ce qu'on avait défini comme une prédictibilité à caractère indéterministe. Si l'on veut approfondir l'étude de l'évolution des sociétés, cela signifie qu'on peut annoncer ce qui va se passer à partir des grandes tendances soulignées ici, sans pouvoir prévoir dans le détail les formes particulières prises par cette évolution.

Après ce rappel indispensable à la compréhension des grands aspects de l'évolution des sociétés, attachons-nous maintenant à proposer de nouvelles illustrations de la première donnée rappelée, la plus fondamentale, celle de la loi de recherche de gains de productivité.

Nouvelles formulations de la loi de recherche de gains de productivité

En revenant sur la loi de recherche de gains de productivité, on peut énoncer d'abord qu'elle se traduit par des gains d'énergie, ensuite, qu'elle a permis aux sociétés humaines un accroissement de la vitesse d'appropriation de la nature, et par suite une meilleure capacité adaptative de ces sociétés. Puis nous proposerons une nouvelle illustration, en trois étapes, de cette loi.

► Les gains de productivité correspondent à des gains d'énergie

On a rappelé plus haut la définition de l'opération humaine qui consiste à obtenir des gains de productivité — produire plus en un même temps de travail. Celle-ci consiste donc à économiser du travail humain. D'une manière plus générale, on a précisé qu'il s'agissait d'économiser de l'énergie. Il est également apparu que les étapes d'accroissement de gains de productivité — ou d'économie de travail humain, donc d'énergie — ont été illustrées par des degrés d'organisation permettant de plus en plus d'économies d'énergie. Comment mieux comprendre ce processus qui, en installant de nouveaux degrés d'organisation, permet de plus en plus d'économies d'énergie ?

On reviendra plus loin sur le fait que l'invention du premier outil a permis une économie d'énergie. Et, par la suite le développement d'une *prothèse économique* constituée de l'ensemble des techniques existantes, a permis un confinement d'énergie de plus en plus important autour des êtres humains.

► Accroissement de la vitesse d'appropriation de la nature par les sociétés humaines et meilleure capacité adaptative de ces sociétés

De même, obtenir des gains de productivité permet de produire plus, et comme produire plus équivaut à transformer l'environnement des êtres humains, obtenir des gains de productivité permet une plus grande appropriation de la nature. Et, pour que cette amélioration de la condition humaine se poursuive, il a été nécessaire de produire encore plus, donc d'économiser encore du temps de travail. On comprend ainsi comment l'augmentation de la production accroît l'adaptation des sociétés à leur environnement. On peut noter à ce propos, que la planète n'étant pas un lieu infini, une appropriation quantitative de l'environnement terrestre doit nécessairement déboucher un jour sur une limite.

Mais, quoi qu'il en soit, la loi la plus importante de l'évolution des sociétés est bien celle de la *recherche de gains de productivité*. Ainsi, depuis la Préhistoire, la quasi-totalité des sociétés humaines s'est caractérisée par ce type d'objectif. L'illustration de cette loi en tous lieux et de tous temps a été vérifiée dans l'histoire économique de l'Occident, de l'Amérique précolombienne, de l'Afrique et de l'Asie¹.

Cette quête s'est matérialisée par le développement d'une « prothèse économique » constituée par l'ensemble des biens fabriqués par les humains. Biens de consommation d'abord (aliments, vêtements, etc.) et biens de production ensuite (outils, machines, etc.), sont les deux catégories de produits qui ont constitué cette prothèse. Rappelons également que cette *prothèse* a pris une ampleur telle qu'en fin de XX^e siècle certains de ses éléments, sous la forme de sondes spatiales, se sont éloignés du système solaire. En début de XXI^e siècle, la production mondiale a atteint un niveau inégalé jusqu'alors, et sur le plan démographique la population de la planète se situe au chiffre record de plus de six milliards d'habitants.

Il apparaît dès lors que, globalement, jusqu'alors, la capacité adaptative d'une société a été d'autant plus grande que la quantité de biens qu'elle a produits a été élevée. Et comme la production des biens résulte d'un processus d'extraction de leurs composants dans l'environnement naturel, on peut énoncer qu'une meilleure capacité adaptative a correspondu à un accroissement de la vitesse d'appropriation de la nature par les sociétés humaines. L'énoncé de la loi de recherche de gains de productivité aboutit ainsi à préciser le rapport entre les sociétés et la nature : celui-ci a pris la forme d'un accroissement de l'appropriation de l'environnement par les humains.

► Illustration, en trois étapes, de la loi de recherche de gains de productivité

Nous présenterons ici une nouvelle expression, en trois grandes étapes, de l'évolution de plus en plus rapide du *mode d'appropriation de la nature par les sociétés humaines*, ou encore de l'accroissement de leur capacité adaptative à l'environnement terrestre. On peut débuter en disant qu'à l'origine, on a assisté à la production d'un nombre limité d'outils par l'artisanat, entraînant un accroissement de quantité de biens, surtout alimentaires. La période est celle qui s'étend de la préhistoire à celle du capitalisme marchand. Puis le capitalisme marchand a développé un

1. Grou, P. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit. ; Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit..

type de production dite de coopération simple¹ qui a consisté à regrouper des artisans auparavant indépendants, réunion permettant un essor de la production de biens, surtout textiles, étape qui a couvert un moment de transition se terminant avec la révolution industrielle.

La révolution industrielle a débuté au XVIII^e siècle. Au XX^e siècle, elle s'est illustrée par l'essor de la chaîne de montage humaine qui était apparu dans la crise des années 1920-1945. L'âge d'or de la chaîne de montage humaine s'est terminé avec la crise des années 1970-1980. Puis la mondialisation économique a émergé, conduisant à la grande limite du XXI^e siècle.

On peut ainsi résumer en trois grandes étapes l'histoire humaine, telle qu'elle s'est déroulée jusqu'à sa première grande limite :

**• Première étape : naissance de l'outillage
et accroissement de quantité de biens alimentaires.
Outils existants et outils fabriqués**

Première sous-étape : origine de l'humanité, usage d'objets déjà existant servant d'outils. On peut situer l'origine de l'humanité au moment où les premiers hommes se sont appropriés des objets, qui sont devenus les premiers outils, lesquels leur ont permis de mieux se nourrir. Peut-être s'est-il agi de l'utilisation de pierres tranchantes, présentant l'avantage de pouvoir découper le cadavre d'un animal mort. Il s'agirait ainsi d'une étape de charognage qui a été démontrée. Dans cet exemple, l'outil existe à l'état naturel puisque l'être humain ne fait que s'en saisir pour se procurer une portion de viande qui va accroître la satisfaction du besoin de nourriture. Dans ce cas, la transformation de l'objet en outil a été immédiate et par conséquent n'a pas nécessité de fabrication. L'opération n'a consisté qu'en une simple appropriation, le cerveau humain ayant effectué un lien entre l'existence de l'objet et sa possible utilisation pour améliorer la faculté de se procurer de la viande. Sans cette opération, la saisie d'un morceau de viande était difficile à pratiquer car jusque-là, c'est au moyen des dents que les hominidés déchiraient la viande qu'ils voulaient absorber. En revanche, le manie-ment d'une pierre coupante, non seulement a facilité l'opération, mais a permis d'obtenir une plus grande quantité de viande. Il a rendu l'action plus efficace, conduisant à une production de viande plus élevée en un temps d'activité sensiblement équivalent. On a donc ici affaire à la première manifestation de la loi de recherche de gains de productivité.

1. Voir Karl Marx. *Le Capital*.

Seconde sous-étape : fabrication d'outils. La fabrication proprement dite des premiers outils s'est inscrite dans le prolongement de la sous-étape précédente. On se situe maintenant au moment où le cerveau humain, ayant enregistré l'avantage procuré par la possession de pierres coupantes, a imaginé et réalisé la fabrication de celles-ci. Cette action est apparue comme nécessaire lorsque ces objets ont manqué, ou quand leur quantité est apparue insuffisante. Les humains ont alors commencé à fabriquer eux-mêmes des pierres taillées, proportion importante de la production d'outils pendant la Préhistoire. Ce fut le moment de l'acquisition et de la diffusion d'un début de technique, celui du travail de la pierre taillée. Notons que cette technique de production d'outils, du fait de sa transmission, est devenue de l'information pour les générations qui ont suivi. Soulignons qu'à l'origine, une pierre coupante qui existe à l'état naturel sur le sol ne représente pas de l'information en soi ; elle est un objet sans fonction parmi d'autres à statut identique. Ce n'est que parce que l'utilisation et la production de cet objet a acquis pour les êtres humains un précieux intérêt, celui de permettre tout d'abord, un accroissement de quantité de nourriture, que son existence, et ensuite, sa technique de fabrication sont devenues des informations précieuses.

•Deuxième étape : de l'apparition de techniques rudimentaires au développement d'autres formes d'outils, et à la réunion de leur production par des marchands

Après l'étape préhistorique, l'accroissement de la production d'outils s'est poursuivi avec l'apparition de l'Histoire et la découverte de l'écriture. Dès ce moment, l'essor des techniques a joué un rôle encore plus important, permettant d'augmenter sensiblement la satisfaction des besoins humains. Biens alimentaires, vêtements, chars à roues, ensembles architecturaux, etc., ont témoigné de l'existence d'une multiplicité d'ateliers artisanaux, caractéristiques d'un début d'appareil productif, propre à l'Antiquité et au Moyen Âge. C'est la classe des marchands qui, d'abord en servant d'intermédiaires entre les artisans et les acheteurs, puis en réunissant des artisans autour d'elle dans des ateliers a pu installer une coopération de productions entre artisans. Ce dernier moment a été nommé par Marx celui de la coopération simple. Il s'est intensifié avec la montée en puissance de la bourgeoisie marchande européenne, de la fin du Moyen Âge jusqu'aux XVI^e et XVII^e siècles.

• Troisième étape : la révolution industrielle

Lorsque la classe marchande a investi dans des inventions de machines, principalement textiles, les artisans réunis dans les ateliers où ils se servaient de leurs propres outils artisanaux, ont été conduits à les abandonner. Tenus de travailler sur les machines possédées par les marchands, ils sont devenus des ouvriers. Ainsi, la classe marchande s'est elle-même transformée en bourgeoisie industrielle en Europe, vers le XVIII^e siècle.

Une première sous-étape : l'atelier industriel. L'atelier industriel a poursuivi son essor, de la fabrication du textile dans la petite entreprise du XVIII^e siècle à la grande entreprise produisant de l'acier, des machines à vapeur, des locomotives et des bateaux, au XIX^e siècle. Puis fin XIX^e siècle sont apparus les automobiles et les avions.

Deuxième sous-étape : l'industrie utilisant la chaîne de montage humaine. Des années 1920 aux années 1970, les pays industrialisés ont été témoins de la domination de la chaîne de montage humaine. C'est au début du XX^e siècle qu'elle avait pris naissance. Donnons la parole à Charles Sorensen, bras droit d'Henry Ford¹, qui écrit, situant la scène qui suit en 1908 :

C'est alors que l'idée me vint : en fait, l'assemblage serait plus facile, plus simple et plus rapide si, au lieu de déplacer les petites pièces vers le châssis, on déplaçait le châssis tout au long du processus de fabrication, en commençant à un bout de l'usine, puis en ajoutant les essieux et les roues, avant de faire passer cette ébauche de voiture à travers la salle où étaient disposées les petites pièces.

Ce mode de fabrication, étendu des véhicules aux réfrigérateurs, aux machines à laver, aux postes de radio et de télévisions, a permis un remarquable bond de productivité, le plus élevé jusqu'alors.

Troisième sous-étape : la chaîne de montage robotisée. À partir des années 1970 une crise économique a annoncé, entre autres, la transformation de la chaîne de montage humaine en *chaîne robotisée*. C'est de cette crise, expression de la plus remarquable révolution technologique humaine, celle des technologies de l'information, que date l'émergence de la « mondialisation économique » et la phase d'accélération qui conduit à la première grande limite de l'histoire humaine.

1. « L'Aventure de l'économie racontée par les grands écrivains ». *Capital*. Numéro hors série juin 2008. P. 41.

Après cette présentation de l'évolution économique qui met particulièrement l'accent sur le développement technologique en trois étapes des sociétés, il convient de revenir à la prise en compte de notre principal présupposé théorique, celui de la relativité d'échelle.

D'une analyse en termes de systèmes à celle utilisant la théorie de la relativité d'échelle

Nous partirons du constat que, jusqu'alors, nous avons privilégié une analyse en termes de *systèmes*. Or, l'utilisation de la théorie de la relativité d'échelle doit nous permettre d'élargir un champ d'analyse auquel la notion de « système » impose des limites. Nous introduirons la notion *d'ensemble organisé en échelles*. Nous, nous intéresserons alors aux fonctionnements *d'ensembles économiques organisés en échelles*.

Constat d'une utilisation implicite de la notion de système

Jusqu'alors, pour établir que la recherche de gains de productivité est une caractéristique principale de l'évolution économique, on a utilisé le concept de système économique, défini lui-même par la notion de structures, elles-mêmes définies par la notion d'unités économiques. Nous allons revenir sur ces définitions.

► Rappel de définition d'un système

On définit traditionnellement un système comme un ensemble cohérent de structures¹. Lorsqu'il s'agit d'un système économique, on peut recenser les structures de production, de répartition, de consommation et d'épargne, les structures monétaires et financières, et les structures d'organisation.

► Rappel de définition d'une structure

De même, on définit une structure comme un ensemble cohérent d'unités. Dans le cas d'unités économiques, il s'agit par exemple pour une unité de production, d'une entreprise, ou pour une unité de consommation, d'un consommateur. Aussi, la question qu'on peut maintenant poser est celle de la nature de la cohérence qui s'établit, d'abord au niveau des structures constituant le système, mais aussi au niveau des unités constituant les structures. Car, si l'analyse en termes de systè-

1. Grou, P. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit.

mes telle qu'on vient de la rappeler, permet de beaucoup avancer dans la compréhension du fonctionnement des sociétés humaines, elle doit être prolongée par une étude plus précise des types de cohérences qui s'installent. Et la théorie de la relativité d'échelle doit nous y aider.

Utilisation des notions d'organisation et d'échelle

Pour nous placer dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle, nous commencerons par modifier les définitions utilisées en adoptant celles d'*organisation* et d'*échelle*.

► Un système, ensemble organisé d'éléments à une échelle donnée

Ainsi nous énoncerons tout d'abord qu'un système est un ensemble organisé d'éléments, et que cet ensemble fonctionne à une échelle donnée. La question posée est celle de la nature de l'organisation qui s'est mise en place. À ce stade de notre démarche, ne pourrait-on pas maintenant postuler l'existence d'un principe d'universalité des lois d'organisation, principe valable dans certains domaines comme celui des sociétés ou du vivant ? Nous allons poursuivre notre démarche pour tenter de trouver d'autres indices qui pourront plus tard nous mener dans cette direction.

► Des éléments — les structures — organisés par d'autres éléments en provenance d'une échelle inférieure

Comme dans le cas d'un « système » nous écrirons maintenant qu'une *structure* est un ensemble organisé d'éléments, et que cet ensemble fonctionne également à une échelle donnée, différente de l'échelle du *système*. La question posée est à nouveau celle de la nature de l'organisation qui s'est mise en place. Nous ferons comme précédemment l'hypothèse qu'il existe un principe d'organisation à établir.

Fonctionnements d'ensembles économiques organisés en échelles

Notons d'abord qu'une méthode d'analyse faisant référence à un mode de fonctionnement en échelles est présentée par ailleurs, lorsque Jacques Revel écrit dans *Jeux d'échelles*, qu'il :

voit dans le principe de la variation d'échelles une ressource d'une exceptionnelle fécondité, parce qu'elle rend possible la construction d'objets complexes et donc la prise en compte de la structure feuilletée du social. Elle pose du même

coup qu'aucune échelle n'a de privilège sur une autre¹, puisque c'est leur mise en regard qui procure le plus fort bénéfice analytique².

Dans le même ouvrage, Bernard Lepetit, à propos de l'analyse en termes d'échelles pratiquées en histoire, écrit :

Dans ce processus, le choix d'une échelle particulière a pour effet de modifier la conformation et l'organisation des objets. Cependant, aucune échelle ne jouit d'un privilège particulier. Les macrophénomènes ne sont pas moins réels, les microphénomènes pas plus réels (ou inversement) : il n'y a pas de hiérarchie entre eux. Les représentations à différentes échelles ne sont pas des projections de réalité qui se trouveraient derrière elles³.

Bernard Lepetit cite alors Maurice Merleau-Ponty qui a écrit⁴, à propos des représentations à différentes échelles, dans *Le Visible et l'Invisible* :

Derrière elles, il n'y a que d'autres « vues »... Le réel est entre elles, en deçà d'elles.

Et Lepetit de poursuivre :

Ainsi, la multiplication contrôlée des échelles de l'observation est susceptible de produire un gain de connaissances dès lors que l'on postule la complexité du réel (les principes de la dynamique sociale sont pluriels et se donnent à lire selon des configurations causales différentes) et son inaccessibilité (le mot de la fin n'est jamais donné et la modélisation est toujours à reprendre).

La notion de relativité d'échelle apparaît à l'état d'ébauche, mais le point de départ est clairement défini, en particulier chez Maurice Merleau-Ponty, lorsqu'il écrit à propos d'échelles, que le réel est « *entre elles, en deçà d'elles* ». Ajoutons aussi, « *leur mise en regard* », car il n'y a pas d'échelle absolue, seulement des rapports d'échelle. De même, en biologie, d'après Denis Noble⁵ : « *Il n'est pas dans les systèmes biologiques de niveaux privilégiés qui dicteraient sa loi au reste du système* ». Pour notre part, nous nous trouvons dans une démarche dont le principal sujet est une analyse de l'évolution économique. Et, lorsqu'on se trouve face à l'existence d'ensembles organisés, étendus sur différentes échelles, nous devons tenter d'expliquer les principes qui ont permis d'aboutir à l'existence de ces ensembles organisés.

1. C'est nous qui soulignons cette notion d'échelle.

2. Sous la direction de Revel, J. 1996. *Jeux d'échelles*, Gallimard-Seuil. P. 13.

3. Lepetit, B. *Jeux d'échelles*. Gallimard-Seuil. P. 92.

4. Merleau-Ponty, M. 1964. *Le Visible et l'Invisible*. Gallimard. P. 280.

5. Noble, D. 2007. *La Musique de la vie*. Seuil. Paris. P. 135.

D'abord, il convient de revenir sur le concept de « relativité ». Pour nous, rappelons que, « parmi les lois fondamentales, le principe de relativité lui-même ressort comme la loi la plus fondamentale¹ ».

On se souvient également que le principe de base de relativité découle de la compréhension qu'aucune réalité n'existe dans l'absolu, puisqu'il n'existe nulle part dans l'univers de repères absolus. La réalité est donc constituée d'un ensemble de rapports, ou de relations. Cette démarche a été celle d'Einstein sur la relativité du mouvement. Dans le cas de la théorie de la « relativité d'échelle », il s'agit de rapports entre échelles. Ainsi, un ensemble organisé est un ensemble constitué de rapports entre éléments, qui se définissent par leur appartenance à une échelle.

Examinons maintenant le concept d'auto-organisation.

Est-ce que le concept d'« auto-organisation », pertinent en sciences physiques, peut être utilisable en sciences sociales ? Rappelons qu'en sciences physiques, un ensemble est auto-organisé s'il est capable de s'organiser de manière spontanée. Par exemple, les lois de la mécanique quantique donnent des illustrations d'une capacité d'auto-organisation. Lorsque l'on rapproche un proton d'un électron — à température basse —, ceux-ci se combinent spontanément pour former un atome d'hydrogène. Et c'est de cette manière que sont apparues les premières combinaisons de l'« univers primordial ». On peut suspecter l'existence d'un phénomène analogue pour expliquer l'origine de la vie sur Terre. En attendant de pouvoir éventuellement vérifier cette hypothèse de manière expérimentale, peut-on constater des processus présentant des analogies auto-organisationnelles en sciences sociales ?

Utilisons les indices dont on dispose pour tenter d'avancer. Les indices sont d'abord un niveau de productivité atteint à un moment, par un ensemble organisé. En effet, un ensemble économique organisé se caractérise, on l'a vu, par la capacité d'atteindre un niveau de productivité à un moment donné.

Le second indice est celui d'un type d'organisation du travail en échelles correspondant aux niveaux de productivité atteints. Par suite, nous proposerons l'hypothèse qu'il existe, à un moment donné, pour un ensemble économique, un type d'organisation du travail, structuré en échelles, qui correspond au niveau de productivité atteint par l'ensemble économique au moment en question.

Peut-on parler de processus d'auto-organisation des sociétés aboutissant à des états organisés dans le but de poursuivre cette dynamique de

1. Nottale. 1998. *La Relativité dans tous ses états*. Hachette. Paris. p. 95.

gains de productivité? De quelle manière les ensembles économiques poursuivent-ils leur quête de gains de productivité, de quelle manière obéissent-ils à cette loi?

Examinons dès maintenant plusieurs catégories d'exemples qui nous semblent significatifs.

On peut d'abord constater une correspondance entre le néolithique du Moyen-Orient et celui de l'Amérique précolombienne. On sait en effet que ces deux révolutions sont fondées sur la production de céréales différentes à des moments différents de manière complètement indépendantes.

Entre trente et quarante siècles avant l'ère chrétienne, en quatre endroits de la planète situés autour d'un fleuve, se trouvaient des villages néolithiques. De manière quasiment identique, les quatre fleuves en question ont été en partie domestiqués et ainsi sont nées les quatre premières grandes civilisations de l'histoire humaine. Il s'agit, comme on s'en souvient, de l'Égypte, de la Mésopotamie, de l'Inde et de la Chine. Les fleuves étaient le Nil, le couple Tigre/Euphrate, l'Indus et le fleuve Jaune. Les sociétés concernées ont alors bénéficié d'un spectaculaire bond de productivité dû à un accroissement des rendements agricoles, puisque la domestication des fleuves a permis une irrigation permanente de l'agriculture. Des ensembles organisés à deux sous échelles, nouvelles, sont ainsi apparus dans ces sociétés, sous échelle des villages de l'agriculture néolithique, transformée par la révolution de l'irrigation, et sous échelle du pouvoir central, sous la forme d'un premier type d'État, chargé de l'organisation de la domestication du fleuve. Ajoutons que ces quatre civilisations ont inventé en même temps l'histoire, puisque c'est en leur sein qu'est apparue l'écriture. De même remarquons qu'en quatre autres endroits, au V^e siècle avant J.-C., la pensée humaine semble effectuer un bond. Il s'agit cette fois de la Grèce de *Périclès*, de la Perse de *Zoroastre*, de l'Inde de *Bouddha* et de la Chine de *Confucius*.

Ainsi, devant une telle simultanéité de processus quasi-identiques ne peut-on estimer qu'on a assisté à des phénomènes d'auto-organisation, conduisant à un degré de plus grande complexité des sociétés humaines?

Une évolution des formes d'organisations en termes de fractionnements

Nous allons tenter de préciser maintenant le pourquoi des gains de productivité réalisés par les sociétés humaines. Dans un premier temps, nous rappellerons que des limites de gains de productivité sont causes des crises économiques. Puis, nous reviendrons sur le lien entre accroissement de productivité et complexité croissante d'un ensemble organisé en échelles.

Limites de gains de productivité, cause de crise économique

On se souvient que la deuxième grande caractéristique de l'évolution économique est celle de l'existence de discontinuités, lesquelles permettent de comprendre le pourquoi des crises économiques. En effet, celles-ci, expressions des discontinuités, se produisent lorsque le degré d'organisation atteint par une société ne permet plus d'obtenir de nouveaux gains de productivité, ou d'économies d'énergie.

— La discontinuité de l'évolution économique s'exprime par des phases de crises et des phases de stabilité qui fractionnent le temps. Revenons d'abord sur le phénomène de discontinuités dans l'évolution économique.

Comme on l'a dit plus haut, il est encore très fréquent pour ne pas dire constant, de trouver encore au début du XXI^e siècle, dans les ouvrages d'Histoire ou d'Histoire économique les plus diffusés des explications de la crise de l'Empire Romain en termes d'*invasions Barbares*, de la crise économique européenne des XIV^e et XV^e siècles en termes de *guerre de Cent ans*, ou de *grandes épidémies*, de la crise des années 1930 en termes de *krach boursier* et de la crise des années 1970-1980 en termes de *chocs pétroliers*.

Tout cela, parce que les historiens n'étudient pas assez les phénomènes économiques et que les économistes ne s'intéressent pas assez à l'Histoire. En effet, le constat d'une régularité dans la succession de périodes de crise et de périodes de stabilité devrait apparaître comme une évidence. Il conduit à faire l'hypothèse que la *discontinuité est une donnée permanente de l'évolution économique*. Des analyses effectuées par ailleurs¹ et celles d'une minorité de chercheurs (par exemple l'École de

1. Grou. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit. Et Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*.

la Régulation en France) conduisent donc à adopter un raisonnement en termes de discontinuités propres à l'évolution économique. Pour notre part, on a depuis longtemps avancé notre explication en montrant que c'est en partant de la loi qui stipule que l'évolution des sociétés a pour fondement la recherche de gains de productivité, que l'on aboutit à se poser la question de l'origine des crises économiques. On a énoncé ailleurs que les crises apparaissaient après une période de stabilité prospère. Pour nous, c'est parce que des limites étaient atteintes dans l'obtention de gains de productivité. On peut ainsi définir un temps de stabilité comme la phase de fonctionnement d'un ensemble d'éléments organisés en échelles jusqu'à ce que celui-ci atteigne des limites de productivité. Le blocage ne peut être dépassé que par une destruction provisoire de l'ensemble organisé concerné. Et l'étude de l'évolution économique nous enseigne que c'est une révolution technologique qui est chaque fois à l'origine de la destruction de l'ensemble organisé.

Une crise économique a donc pour origine le processus de destruction d'un ensemble organisé en échelles, sachant qu'en même temps va se dérouler un processus d'émergence d'un nouvel ensemble organisé en échelles. Pendant les phases de stabilité, l'ensemble organisé n'est modifié que par des innovations de type mineur qui ne changent pas son organisation générale. En revanche, pendant les phases de crises, l'évolution économique engendre des innovations majeures, qui bouleversent l'ensemble organisé ainsi que les objets qu'il fabrique. Ce rappel étant effectué, poursuivons notre réflexion relative à l'évolution des ensembles organisés en échelles.

Quelle explication permet de comprendre l'existence de limites ?

Réfléchissons à la notion de limite qui se manifeste dans les discontinuités. Les précurseurs en sciences sociales qui ont apporté des éléments de réponse sont Marx et Schumpeter. Nous placerons notre explication dans la prolongation des travaux de Marx sur le concept de *suraccumulation*, et ceux de Schumpeter relatifs aux *vagues* d'innovations.

La suraccumulation chez Marx

L'existence de limites a d'abord été perçue par Marx dans son analyse en termes de suraccumulation du capital. Marx souligne que dans certaines conditions où les taux de profit ont tendance à baisser, le fait d'investir de plus en plus non seulement ne règle rien, mais la rentabi-

lité de ces capitaux supplémentaires devient de plus en plus faible. Les capitalistes, a-t-il écrit, chercheront donc par tous les moyens possibles à échapper à cette situation de baisse des taux de profit, qui exprime une situation de « *suraccumulation de capital* ». Quelle est la cause du blocage des profits, du plafond atteint par la rentabilité des capitaux investis, ou encore pour utiliser nos propres termes, de la limite atteinte dans la recherche de gains de productivité ? Pour Marx, la réponse réside dans l'essence même du capitalisme, qui doit le conduire en même temps à sa perte : le capitalisme consistant à exploiter le travail humain, et la part de travail humain diminuant au cours de l'évolution du capitalisme, l'exploitation, donc les taux de profit ne peuvent que baisser, de manière tendancielle. Cette explication ne semble pas suffisante parce que le capitalisme a chaque fois été capable de dépasser les limites qu'il avait atteintes.

– **Épuisement des vagues d'innovations chez Schumpeter.** Schumpeter a écrit que depuis la révolution industrielle, quand les vagues d'innovations arrivaient à épuisement, l'activité économique se ralentissait. La notion de limite des innovations est là, et elle n'est, pour lui, dépassée que par l'arrivée d'une nouvelle vague d'innovations. Cette fois, la compréhension du pourquoi de la limite atteinte est plus aisée à établir : il s'agit d'un arrêt de l'arrivée de nouveaux produits, ou d'un arrêt de la dynamique d'amélioration des moyens de produire.

– **Notion de limites atteintes, et basculement vers un niveau de complexité plus élevée.** Les deux auteurs précédents ont été des précurseurs dans l'établissement du concept de limites atteintes à un moment donné. Pour nous, c'est la recherche de gains de productivité, quête que nous avons présentée plus haut comme la grande loi d'évolution des sociétés, qui conduit à la question de l'existence d'une limite. Nous avons rappelé qu'un dépassement n'était possible que par l'installation de nouvelles formes d'organisation en échelles, à l'aide de nouvelles *technologies innovatrices*, aptes à ainsi apporter de nouveaux gains de productivité. Or, les nouvelles formes d'organisation en échelles correspondent à l'installation d'une plus grande complexité. Cette plus grande complexité se définit par de nouvelles formes d'organisation en échelles, comportant un plus grand nombre d'échelles et un plus grand nombre de liens entre échelles. On aboutit alors à un nouveau stade adaptatif, réalisant une nouvelle économie de temps de travail, donc d'énergie.

– **Chaque phase illustre une capacité spécifique d'appropriation de l'environnement à un moment donné, en termes d'économie d'énergie.** Tentons de cerner le rapport qui existe entre discontinuités

et capacité adaptative des sociétés. Remarquons maintenant que chaque moment de discontinuité est dépendant du moment précédent. Ou encore, la capacité à un moment donné d'appropriation de l'environnement par le travail humain, donc d'accroissement de la complexité des formes d'organisation en échelles, est dépendante de son état précédent, donc de son précédent degré d'organisation en échelles. Par exemple, le moyen de dépasser les limites atteintes par le transport par diligence au XIX^e siècle, a consisté à dépasser la vitesse maxima réalisée par la traction à cheval. C'est le moteur à vapeur qui a permis ce dépassement. Cette réalisation d'un nouveau mode de traction était dépendante du précédent. En effet, dans cet exemple, le mode de déplacement n'a pas changé. Il s'agissait d'utiliser des roues fonctionnant sur routes, déjà présentes sur la diligence. La première locomotive à vapeur a donc d'abord été une diligence à vapeur. Puis un nouveau dépassement de l'utilisation du véhicule a ensuite été permis par l'invention de chemins constitués de voies en acier. La dynamique adaptative globale décrite dans cet exemple est celle de gains de productivité permettant une économie de temps de transport, donc de temps de travail, donc d'énergie, réalisée dans le cadre d'un degré d'organisation de production en échelles plus complexe. Lorsque le degré d'organisation présent n'est plus capable d'obtenir des gains d'énergie, il a atteint ses limites, et un autre degré d'organisation plus complexe doit apparaître.

Lien entre accroissement de productivité et complexité croissante d'un ensemble organisé en échelles

Il convient d'insister maintenant sur le lien entre gains de productivité et complexité croissante. On a déjà abordé ce lien plus haut, à propos d'une possibilité de processus d'auto-organisation dans les sociétés humaines.

Nous savons également que dans le domaine des lois de la physique, il y a un grand consensus sur l'existence d'un lien, dans des ensembles organisés entre un caractère multi-échelle et un degré de complexité. Ainsi une augmentation du nombre de niveaux emboîtés dans des ensembles hiérarchiquement organisés est en général considéré comme augmentant la complexité. Dans le domaine biologique, on peut constater le passage des cellules procaryotes à un seul niveau, aux cellules eucaryotes à deux niveaux — cellules et noyaux — puis aux multicellulaires à trois niveaux et plus.

Pour notre part, on rappellera qu'en sciences économiques, un accroissement de complexité est nécessaire pour obtenir de nouveaux gains de productivité. On a ainsi pu constater, que lors de l'évolution économique, en passant de l'étape du simple outil à celles des techniques ultérieures plus complexes, le nombre de biens produits s'était accru et que ce processus s'était effectué en vue d'une meilleure adaptabilité des sociétés. On peut en tirer l'enseignement, que la loi de recherche de gains de productivité, s'est traduite par une complexité croissante dans l'organisation des sociétés. Pourquoi un lien entre nombre de biens fabriqués plus élevé et un niveau de complexité plus grand est-il toujours vérifié ?

Un survol de l'évolution économique, depuis les hordes de chasseurs-cueilleurs jusqu'à l'installation de l'État-nation, permet d'illustrer la tendance à la complexité croissante accompagnant la recherche de gains de productivité. Lors des premières formes de sociétés humaines, par exemple celles de la horde des chasseurs-cueilleurs préhistoriques, on a pu constater que le nombre des formes d'organisations économiques qui caractérisaient ces sociétés était limité : il s'agissait de productions de denrées alimentaires de subsistance, de fabrication de quelques outils, d'une consommation de subsistance, et d'une organisation des décisions prises par un chef de tribu ou un conseil des anciens. Le nombre des liens entre ces formes d'organisation était également limité.

Si l'on effectue un saut dans le sens du processus évolutif pour parvenir aux formes d'organisation de l'État-nation, on s'aperçoit que c'est pendant le Moyen Âge européen, qu'est apparue cette dernière catégorie d'ensembles économiques organisés, dont la durée de vie s'est ensuite étalée, des XIV^e-XV^e siècles jusqu'au XX^e siècle. Ce type d'organisation a été le lieu adéquat de la révolution industrielle, et la Grande-Bretagne et la France, du XVI^e au XVIII^e siècle, ont installé un degré de complexité d'organisation économique illustré par exemple par la multiplicité des degrés d'organisation de l'État-nation. Signalons qu'avec l'expansionnisme colonial européen des XVIII^e et XIX^e siècles, ce type d'ensemble a vu son champ d'influence provisoirement élargi par la conquête de nouveaux territoires.

Enfin, la grande croissance des années 1945-1970 — coiffée par un *État dit keynésien* — a atteint une forme de complexification encore plus grande, permettant l'apogée du règne de l'État-nation. Au total, on peut énoncer que, de la simplicité des degrés d'organisation en échelles, des chasseurs-cueilleurs à la grande richesse des ensembles organisés des États-nations après la révolution industrielle, la loi de complexité croissante

des ensembles organisés en échelles est une tendance qui a constamment accompagné celle de la recherche de gains de productivité.

Ajoutons qu'un accroissement de complexité équivaut à une plus grande division du travail, puisqu'une plus grande variété d'échelles correspond à un nombre d'échelles qui s'accroît. Ces transformations permettent d'économiser de plus en plus de travail, donc d'énergie.

En conséquence, un accroissement de complexité est signe de meilleure appropriation de l'environnement par les êtres humains. La compréhension de ses manifestations peut servir d'instrument d'analyse lorsqu'une décision politique doit être prise. Par exemple, lorsque les responsables d'une région économique ont un choix à effectuer entre l'installation d'une technopôle — investissement coûteux de mise en place d'un pôle constitué d'universités, de centres de recherche et de petites entreprises, pôle à rentabilité à court terme non évidente — et l'amélioration d'une infrastructure touristique déjà existante — à rentabilité immédiate assurée —, c'est la seconde décision qui est le plus souvent prise. Or, c'est un diagnostic qui privilégie le niveau de complexité de l'investissement qui doit conduire sans la moindre hésitation à prendre le premier type de décision. Celle-ci est la bonne, car l'option touristique ne permet aucune création de richesse, mais seulement l'exploitation d'une rente déjà existante ; la seule décision qui conduise à terme à un véritable accroissement de richesse est celle de la création d'une technopôle. On verra aussi plus loin comment la dynamique des gains de productivité génère un élargissement des espaces économiques, élargissement encore illustré par une complexification des niveaux de ces espaces, par exemple lors du processus de mondialisation par l'installation de plusieurs échelles régionale, nationale, continentale, et mondiale.

Complexité croissante et fractionnement croissant de la réalité

Nous avons dans un premier moment de notre démarche plutôt souligné le caractère de fractionnement temporel qui apparaissait dans l'évolution économique. Nous venons de constater que la tendance à la complexité croissante des ensembles économiques installait un fractionnement croissant des ensembles organisés.

L'aspect fractionné de la réalité se développe ainsi, aussi bien dans le temps que dans l'espace. C'est un constat qui doit être opposé aussi bien aux conceptions de l'évolution en termes de hasards qu'aux conceptions — sur lesquelles on reviendra plus loin — d'un présent en termes de « *tout marché* ».

Caractère universel des rythmes d'évolution ?

Pour poursuivre notre réflexion relative à l'évolution des ensembles organisés en échelles, posons-nous la question d'un éventuel caractère d'universalité de certains rythmes d'évolution. Ceux qui ont été constatés dans l'évolution des sociétés présentent-ils un caractère plus général, valable dans d'autres domaines ? En effet, on sait qu'il existe des phénomènes de discontinuité comparables à ceux des sociétés dans le domaine de l'univers et dans celui de la vie. En physique, il s'agit de transitions de phase, en biologie, de crises et apparitions et disparitions d'espèces. Ce type de mises en perspective a déjà été présenté ailleurs¹. Peut-on y revenir en allant un peu plus loin ? Pour nous toute analogie entre évolution des sociétés et évolution du vivant mérite d'être signalée. C'est ce que nous effectuerons dans un premier temps. Puis, nous nous demanderons si l'émergence des sociétés humaines, peut éventuellement être comprise par sa mise en perspective dans un cadre plus vaste, permis par la théorie de la relativité d'échelle.

Une analogie remarquable entre évolution des sociétés et évolution du vivant : trois étapes comparables ?

L'évolution économique qui se traduit par une recherche de gains de productivité — donc de plus grande appropriation d'énergie — dont on a effectué précédemment une schématisation en trois étapes, a illustré une dynamique de fabrication d'outils et un développement de techniques destinées à accroître le nombre des biens produits par les sociétés humaines. Ainsi les gains de productivité ont permis de mieux répondre aux besoins des êtres humains — alimentaires, vestimentaires, d'habitat, de transports, etc. Le résultat a été celui d'une adaptation de plus en plus grande des sociétés humaines par l'appropriation de leur environnement.

On peut tirer de cette analyse de l'évolution des sociétés humaines des enseignements qui aident à la compréhension de l'évolution de la Vie : car on peut dégager des analogies entre l'évolution des sociétés humaines et celle du vivant, et cela, en mettant en lumière trois étapes comparables de leur développement.

1. Grou, P. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit. ; Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit.

► **Une première étape comparable :
premiers outils et groupes de protéines**

• **Rappel de l'apparition de premiers outils**

Émettons à nouveau l'hypothèse que l'apparition des sociétés humaines a été le résultat d'une modification d'échelles due en particulier à l'accroissement de la taille des cerveaux des hominidés¹, tout d'abord de l'Australopithèque à *Homo ergaster* (ex. : *habilis*), puis d'*Homo ergaster* à *Homo erectus* et *neandertalensis*, puis d'*H. erectus* à *Homo sapiens*. On a vu, qu'à l'origine de l'évolution des êtres humains, du fait de l'activité du cerveau, des objets sont devenus des outils, facilitant les apports alimentaires, donc d'énergie, vers les organismes humains. Un nouveau processus de confinement d'énergie, prolongeant celui déjà effectué par la vie, s'est donc réalisé autour des êtres humains. Les objets permettant ce processus sont devenus des outils. Rappelons que cette dynamique s'est réalisée en deux temps.

Dans une première sous étape, on a déjà fait l'hypothèse que des pierres coupantes existaient dans la nature, et que les êtres humains n'ont vraisemblablement fait que se les approprier directement. Ensuite, on a encore effectué l'hypothèse que, dans une seconde sous étape, ils les ont fabriqués eux-mêmes — on pourrait dire *dupliqués* — par exemple en frottant et frappant deux pierres l'une contre l'autre. Puis, ils ont amélioré ces premiers outils en fabriquant des éléments complémentaires — ou cofacteurs — par exemple des manches en bois — ou en bois de cervidés ou os de bovidés — qui, attachés aux pierres taillées ont permis la fabrication de javelots et de haches, etc.

• **Apparition d'un monde de protéines**

Peut-on comparer la dynamique humaine à celle de la vie ? Si à propos des sociétés humaines, on utilise le concept d'objet, devenu outil, facilitant les apports d'énergie, dans le contexte de sciences de la vie, l'hypothèse d'un changement d'échelles à l'origine, doit être reprise. Et, si chez les Hominidés, un accroissement de taille du cerveau dû à un changement d'échelles a permis l'utilisation puis la fabrication d'outils, faisons l'hypothèse ici qu'un changement d'échelles était également apparu dans les conditions de l'environnement prébiotique. C'est lui qui aurait entraîné un début de proto-vie. Par comparaison, les formes d'organisation prébiotiques sont pour nous, définies ici comme la réunion de macromolécules — chaîne d'acides aminés — de type protéines

1. Chaline, J. 2000. *Un million de générations. Aux sources de l'humanité*. Seuil. Paris.

catalyseurs — ou enzymes —, assemblées en petits groupes sous une paroi, qui a permis un processus de *confinement d'énergie* réalisable à l'intérieur de cette paroi. Un prémice d'apparition de vie est ainsi défini ici, pour nous, par deux aspects complémentaires : l'action d'un groupe d'éléments — des macromolécules protéines —, et leur enfermement en un lieu protégé par une paroi, les deux conditions aboutissant à un début de confinement d'énergie. C'est de cette manière que pour nous, sont apparus les tout premiers moments de la vie. Et c'est ainsi que nous définissons son origine.

Ajoutons à l'hypothèse de départ que l'économie d'énergie a été réalisée par les protéines catalyseurs — enzymes — et que des cocatalyseurs — par définition facteurs complémentaires ou cofacteurs de la catalyse — ont été chargés des tâches complémentaires dans le fonctionnement de l'ensemble ainsi construit. Par suite, il convient de noter ici que des acides nucléiques, impliqués plus tard par le *code génétique*, ont été, à l'origine, des cocatalyseurs, ou coenzymes¹. Ainsi, dans une première sous étape, des molécules existant dans la nature se sont réunies, suite à une modification de l'espace des échelles, et ont abouti à une première forme de vie.

Dans une seconde sous étape, en conséquence de la structure de confinement d'énergie installée, et d'un accroissement d'énergie rendu possible par l'action des catalyseurs, une duplication, ou auto-reproduction, du groupe d'éléments — protéines et pré-acides nucléiques — a pu s'effectuer.

Au total, une dynamique riche en analogies avec celle des sociétés s'est manifestée. De même que la structure corps humain demandeuse d'énergie alimentaire s'est approprié des outils de l'environnement pour économiser du travail humain, on peut concevoir qu'au sein des ensembles de premières protéines, protégées par leur paroi, a dû également se développer dès l'origine — on l'a dit plus haut — une catégorie de molécules/protéines facilitant l'apport d'énergie extérieure : des protéines/catalyseurs. L'apport de ces protéines/catalyseurs, qui permet d'atteindre un certain niveau d'énergie, a alors entraîné une reproduction du groupe de protéines ainsi que celle de co-catalyseurs apparus — de type acides nucléiques.

1. Maynard Smith, J. & Szathmary, E. 2000. *Les Origines de la vie. De la naissance de la vie à l'origine du langage*. Dunod. Paris.

► **Une deuxième étape comparable :
technique rudimentaire et colonies de protéines**

• **Rappel du développement de techniques artisanales
qui aboutissent au rassemblement dit de *coopération simple***

Poursuivons l'analogie avec la dynamique évolutive des sociétés humaines. Pour cela, souvenons-nous qu'en fin de Préhistoire, lors de la révolution néolithique, la fabrication d'outils artisanaux permettant plus d'économies d'énergie s'est poursuivie. Le développement de ces techniques a permis de nouveaux gains de productivité et une complexité croissantes de l'organisation des sociétés. À la fin du Moyen Âge européen, des artisans ont alors été réunis par les marchands, ce qui a donné une forme d'organisation technique dite de « coopération simple ».

• **Une *coopération simple* entre protéines**

Dans le cas du vivant, faisons l'hypothèse d'une seconde étape comparable : les petits groupes autonomes de protéines, se procurant de l'énergie, abrité chacun sous une paroi et — aidés par d'autres co-catalyseurs — se sont réunis en grands ensembles — sortes de colonies — protégés par une grande paroi commune. On est alors entré, pour nous, dans un premier monde de proto-cellules. Dans ce type d'organisation, la reproduction de chaque groupe de protéines s'est encore effectuée de manière autonome, et l'auto-catalyse est encore demeurée la règle. Notons que le rôle des co-enzymes, — acides nucléiques — chargés de co-catalyses de plus en plus élaborées, s'est encore accru.

► **Une troisième étape comparable : le passage des ateliers
industriels et d'un second monde de proto bactéries
à la chaîne de montage humaine et au code génétique**

• **Rappel d'une première sous-étape
de techniques industrielles**

On a constaté qu'à un moment de l'évolution des sociétés, la classe marchande a investi dans des inventions de machines, par exemple textiles, et les artisans, déjà réunis dans les ateliers, sont devenus des ouvriers. La classe dirigeante, en accomplissant la révolution industrielle a développé les techniques du textile au XVIII^e siècle, puis celles de l'acier, des machines à vapeur — locomotives et bateaux — ainsi que de la construction d'automobiles et d'avions à la fin du XIX^e siècle.

• Des protobactéries avec ARN ?

Faisons ainsi l'hypothèse que grâce à des apports — ou économies — d'énergie de plus en plus importants, une plus grande complexité s'est installée, et que les anciens groupes de protéines autonomes se sont insérés dans une nouvelle division du travail au sein des ensembles constitués lors de l'étape précédente. C'est alors que, lors de la reproduction de ces ensembles, on est passé de l'ancienne auto-catalyse des groupes de protéines autonomes, à un mode de reproduction collectif nécessitant l'apparition de schémas de reproduction des nouveaux ensembles de protéines. Il nous semble que c'est à ce moment-là, qu'à partir d'un sous-ensemble de co-enzymes dont certains étaient présents dès l'origine, doit se situer une unification des groupes d'acides nucléiques, plus précisément une ébauche de chaîne d'ARN. Selon Noble¹, « *il est probable par exemple qu'aux premières étapes de l'évolution, dans le monde dit de l'ARN, la distinction entre gènes et enzymes n'existait pas* ». Et ces nouvelles macromolécules ont alors joué le double rôle, d'organiseurs des nouveaux ensembles de protéines, ainsi que de leur reproduction. Le processus d'auto-catalyse de l'ARN permet de rendre plausible l'existence de la sous étape qu'on vient de proposer.

• Une seconde sous-étape comparable : rappel de l'étape de l'apparition de la chaîne de montage humaine

On se souvient que l'apparition de la chaîne de montage humaine a résulté de l'évolution de la technique humaine, découlant de l'idée que des gains de productivité importants étaient obtenus, si un assemblage de pièces était effectué dans la continuité d'un déplacement plutôt que dans un cadre d'assemblage éclaté. Ce mode de production, étendu depuis les années 1920 à tous les produits des pays industrialisés a permis les bonds de productivité du XX^e siècle, les plus élevés de l'histoire économique jusqu'au troisième tiers du XX^e siècle.

• Un code génétique. Apparition des bactéries, puis des cellules à noyau

Appliquons le principe qu'on vient de rappeler à la fabrication d'un ensemble de protéines existant déjà dans la période précédente. Les résultats spectaculaires obtenus lors de l'évolution des sociétés permettent cette fois de comprendre, dans le domaine de la vie, l'apparition d'une véritable *chaîne de montage*, celle du *code génétique*. Les résultats apparus ont été aussi spectaculaires que dans le domaine des sociétés :

1. Noble. 2007. *La Musique de la vie*. Op. cit.

apparition des premières cellules — ou bactéries — ainsi que de toutes les formes d'organisation cellulaires qui les accompagnent. C'est de cette manière qu'on est réellement entré dans l'histoire de la vie.

On peut, à partir de là, concevoir une troisième sous étape supplémentaire : les *phénomènes de robotisation des chaînes de montage* et de *mondialisation économique*, peuvent être pensés comme comparables à ceux des colonies de bactéries débouchant sur la naissance d'êtres pluricellulaires. Au total, comme dans le cas des sociétés humaines, on peut parler, dans le cas de la vie, d'une dynamique de gains de productivité dans la fabrication des protéines. Pour nous, les protéines/catalyseurs sont les outils du vivant et les acides nucléiques, co-catalyseurs expriment le développement d'une amélioration des outils, donc de la technique cellulaire.

Et l'on peut résumer la comparaison effectuée de cette manière :

– **Dans le cas des sociétés**, on peut définir les outils de plus en plus perfectionnés comme une *technique* humaine d'amélioration d'outils, donc de moyens de confinement — d'énergie — au profit des êtres humains. Ensuite, l'évolution de cette technique a consisté à améliorer progressivement l'efficacité des modes de confinement.

– **Dans le cas de la vie**, ce sont les protéines et les enzymes qui ont joué le rôle d'outils principaux. Mais un rôle identique à celui de la technique humaine — qui améliore le fonctionnement des outils — a été tenu par les co-enzymes. Comme à l'origine, on sait que l'ARN a été un co-enzyme, on peut supposer qu'un pré-ARN a joué, à un moment, le rôle d'organisateur du confinement d'énergie dans l'ensemble de la structure pré biotique en évolution. Et, par une réorganisation de la catalyse générale, l'essor de la structure des acides nucléiques a abouti à faire jouer à ceux-ci le rôle de *support* de la duplication cellulaire. C'est ainsi que cette macromolécule est apparue ensuite comme un porteur d'*informations* sur la totalité de la structure de confinement d'énergie qui, en se reproduisant, définit la « vie ». L'aspect *porteur d'information* qui s'exprime *a posteriori* est le résultat d'une lente construction de reproduction de confinement d'énergie.

Apparition des sociétés humaines mise en perspective dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle

Pour nous, le développement des sociétés humaines doit se comprendre comme une dynamique incluse dans l'évolution de la matière et de la vie. En postulant, le principe suivant lequel *les lois fondamentales de l'Univers sont les mêmes en tous lieux*, on peut faire l'hypothèse, dans cette partie relative à l'évolution des sociétés, en application du principe de relativité d'échelle, que comme dans le cas de l'expansion de l'Univers ou du développement de la Vie, ce sont des *modifications de l'espace des échelles* qui peuvent rendre compte du processus de développement des sociétés. Tout comme un changement dans l'espace des échelles semble être à l'origine des conditions d'apparition d'organisations prébiotiques sur Terre, c'est un changement d'échelles survenu chez les Hominidés, vraisemblablement illustré par des modifications des caractéristiques de leur cerveau, qui doit permettre d'expliquer le développement d'une prothèse économique définissant les sociétés humaines.

Relativité d'échelle et fractionnement du temps : accélération et analyse en termes de lois log-périodiques

On a constaté qu'une des caractéristiques de l'évolution économique était celle de la *discontinuité*. On sait que ce caractère ne se manifeste pas de manière désordonnée et présente des formes spécifiques. Le schéma qui caractérise ce type d'évolution est celui d'une *accélération*.

► Une accélération économique conduisant à la fin d'une première séquence adaptative de l'histoire de l'humanité

Quel est donc, à propos des discontinuités dans l'évolution économique, le schéma global qui pourrait apparaître en mettant en perspective la suite des périodes qui se sont succédé depuis l'origine de l'humanité ? Nous savons que la réponse est celle d'une *accélération*. Nous rappellerons d'abord ce résultat obtenu par ailleurs¹. Puis nous reviendrons sur l'ajustement en termes de log-périodicité effectué sur le mouvement accéléré. Nous exposerons la confirmation par d'autres travaux aboutissant à l'idée d'un *temps critique* — ou *singularité* — au XXI^e siècle, recensés par l'*Observatoire d'un changement accéléré* de John Smart à Palo Alto. Nous poserons le problème d'un lien entre capacité adaptative des sociétés

1. Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit.

et mouvement accéléré. Nous avancerons alors que le problème d'un temps critique — ou singularité — dans la seconde moitié du XXI^e siècle renvoie à une analyse de la nature même du fonctionnement de l'humanité. Enfin nous tenterons de préciser pourquoi d'autres variables convergent également vers le même temps critique.

► **Relecture de l'observation d'un fractionnement accéléré de l'évolution économique**

On se souvient que le rythme qui caractérise la discontinuité de l'évolution économique s'est accéléré, débutant par des phases de l'ordre du million d'années, pour aboutir à des durées de l'ordre d'environ vingt ans au XX^e siècle, et de moins de dix ans au XXI^e siècle. On doit se poser la question des limites que doit rencontrer ce rythme. On s'était en effet aperçu qu'au début de la Préhistoire, les durées de stabilité ou de crise des modes de vie des sociétés du Paléolithique inférieur étaient de l'ordre d'un à deux millions d'années. Puis la venue d'*Homo sapiens* s'est illustrée par des périodes plus courtes. La révolution néolithique a correspondu à une crise économique s'étendant sur environ une trentaine de siècles. Au moment des empires de l'Antiquité, les phases de crises et de stabilité présentaient une durée de l'ordre de quelques siècles. Après la révolution industrielle, il ne s'est plus agi que de périodes de quelques dizaines d'années : vingt-cinq ans de crise des années 1930, et vingt-cinq ans d'expansion de 1945 à 1970¹. À partir du XXI^e siècle, les rythmes sont de plus en plus rapides, donc les phases de plus en plus brèves.

► **Confirmations par d'autres auteurs recensés à l'Observatoire d'un changement accéléré, de John Smart, à Palo-Alto**

L'Observatoire d'un changement accéléré de Palo-Alto a recensé les auteurs qui ont travaillé sur le thème d'un changement accéléré des sociétés. On peut citer par exemple Von Neumann, ainsi qu'Anders Johansen et Didier Sornette². On y trouve l'intuition de Von Neumann :

Le progrès toujours accéléré de la technologie et les changements dans les modes de vie donnent à penser que nous nous approchons d'une singularité essentielle dans l'histoire de l'espèce, au-delà de laquelle les affaires humaines telles que nous les connaissons ne pourront pas continuer.

1. Grou, P. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit.

2. Johansen, A. & Sornette, D. 2001. *Finite-Time Singularity in the Dynamics of the World Population, Economic and Financial Indices*. *Physica A*. 204:485-502.

La prédiction d'un temps critique situé vers 2050 est confirmée par une étude indépendante, d'Anders Johansen et Didier Sornette portant sur des séries de production et de démographie mondiales.

► Capacité d'appropriation de l'environnement et mouvement accéléré

On a vu que chaque moment de la discontinuité de l'évolution économique se caractérisait par un *nouvel état de capacité d'appropriation de l'environnement* par les sociétés humaines. Au cours de leur évolution, les sociétés à travers la croissance de leurs modes d'organisation ont utilisé de plus en plus de *travail incorporé* — expression de Marx — celui-ci devenant lui-même de plus en plus complexe. Un accroissement de la démographie mondiale qui a suivi le mouvement depuis l'origine de l'humanité illustre le fait que l'accélération économique observée s'est accompagnée d'une accélération démographique. Et cette accélération globale conduit à la prévision d'une limite globale — productive, démographique, technologique, scientifique —, pour la seconde moitié du XXI^e siècle.

► Le temps critique — ou singularité — de la seconde moitié du XXI^e siècle renvoie à la nature de l'humanité

Le problème posé par cette prévision indiscutable d'une limite au mouvement accéléré de l'humanité est fondamental, car il s'agit d'une limite qui renvoie à la nature même de l'humanité, aux modes d'organisation qui l'ont caractérisée depuis ses débuts. Il convient donc de revenir à la définition de l'humanité à son origine. Or, on a défini plus haut la loi d'évolution des sociétés comme étant celle de recherche de gains de productivité, c'est-à-dire une transformation de l'environnement ou encore une capacité à s'approprier cet environnement. Dans ce cas, que signifie le fait que l'humanité doive atteindre un *temps critique* — ou *singularité* — dans la seconde moitié du XXI^e siècle ? Si l'on applique la définition proposée, il apparaît que la limite sera celle de l'appropriation de l'environnement. C'est ce qui est confirmé dès le début du XXI^e siècle où plusieurs indices sont déjà présents. Citons les symptômes plus apparents :

- Un accroissement démographique incontrôlé en vitesse accélérée¹.

1. Voir Chaline, J. 2007. « Le défi démographique », in : Bourgeois P. et Grou P., *Les Grands Défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle*. Ellipses. Paris. Chap. 14. P. 191-198.

– Des modifications climatiques néfastes pour la vie humaine, qui se traduisent par un effet de serre responsable d'un réchauffement de la planète.

– Un début d'épuisement des sources énergétiques. Les réserves de pétrole sont de l'ordre de quelques dizaines d'années et les guerres pour le contrôle des ressources pétrolières ont déjà commencé, par exemple en Irak en 2003.

– Un début d'inquiétude relatif aux ressources en matières premières. Les grandes manœuvres pour le contrôle des mines de matières premières, en particulier africaines, ont également commencé.

– Un début d'épuisement des réserves d'eau. Dans plusieurs régions, des conflits pour le contrôle de sources d'eau se sont déclarés.

– Un début d'épuisement de certaines espèces de poissons marins comestibles qui risque de devenir définitif si des mesures de protection ne sont pas prises.

Au cours du XXI^e siècle, le nombre de ces indices ainsi que de symptômes plus graves ne peuvent que s'accroître. Il conviendra donc de prendre en compte cet ensemble d'éléments.

► **Autres variables qui convergent vers un temps critique**

Revenons à la démarche précédente relative au temps critique prévu pour le XXI^e siècle et mentionnons qu'en même temps qu'une variable économique générale, il existe une variable démographique qui l'accompagne. Mais fait remarquable, il existe également des variables scientifiques et techniques précises, pour lesquelles la prévision d'un temps critique identique — situé vers 2050 — peut être effectuée (encadrés 3.1 et 3.2).

ENCADRÉ 3.1 : Du cyclotron au LHC, une évolution log-périodique**Ivan Brissaud**

Dès la découverte de la radioactivité en France (1896/98), les rayonnements émis ont été utilisés pour sonder la matière. Dans ce but, la nécessité de disposer d'accélérateurs de particules s'est imposée rapidement. En Grande-Bretagne un « *générateur Hautes Tensions* » est inventé en 1931. À peu près simultanément, aux USA, Van de Graaff construit l'*accélérateur électrostatique* qui porte son nom et Lawrence imagine le *cyclotron*. L'énergie de ce dernier étant limitée, le *synchrocyclotron* prend la suite pour atteindre des énergies plus élevées avant l'invention du *synchrotron*, indépendamment en URSS et aux USA. Le synchrotron à focalisation faible, puis forte, est l'outil principal de la Physique des particules qui, à ce moment-là, naît de la Physique nucléaire. Enfin les *collisionneurs* où se heurtent deux faisceaux de particules et antiparticules (protons-antiprotons ou électrons-positons), permettent un gain en énergie considérable. Dernières innovations : la cryogénie rend accessibles des champs magnétiques très élevés et des champs électriques intenses. Le *Grand collisionneur d'hadrons* (LHC) au CERN, réunissant toutes ces innovations, est devenu l'accélérateur le plus puissant à ce jour.

M. Livingston a proposé un arbre généalogique des accélérateurs. En tenant compte de sa mise à jour, cet arbre est reproduit ici en distinguant les protons des électrons (fig. 1).

Sur la fig. 2 est montrée, en fonction de la date, la variation des intervalles de temps Dt entre les bifurcations qui correspondent à l'arrivée des innovations successives. Cette figure prouve que c'est vers 1950 que se termine l'élaboration des accélérateurs de protons de basse énergie dédiés à la physique nucléaire et qu'arrivent des machines très énergiques destinées à la physique des particules. Il faut noter l'accélération du rythme des innovations jusque vers 1950, suivie d'une décélération de ce rythme après cette date. Rappelons que le CERN a été créé en 1954 et peu après à Doubna le JINR (*Joint Institute for Nuclear Research*), son équivalent en URSS.

En appliquant les relations de la log périodicité données par Nottale, Chaline et Grou en 1999, on détermine le coefficient d'autosimilarité g et le temps critique T_c :

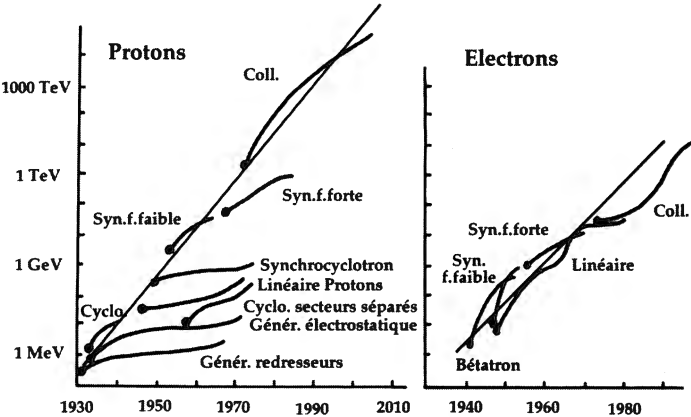


Figure 1. Chronologie et évolution des familles d'accélérateurs d'électrons et protons; apparaissent successivement les générateurs (Gen), les cyclotrons (Cyclo), les synchrotrons (Syn), à focalisations (f) faible puis forte, les collisionneurs (Coll).

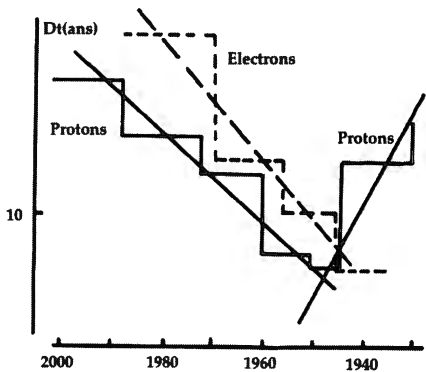


Figure 2. Intervalles de temps Dt entre familles d'accélérateurs.

Accélérateurs d'électrons	1,68+/-0,06	1932+/-3
Accélérateurs de protons	1,37+/-0,03	1930+/-2
Accélérateurs de protons	2,33+/-0,05	1956+/-4

Plusieurs remarques sont à faire qui rattachent bien ces résultats à ceux de Nottale, Chaline et Grou :

* À partir de chaque nœud de l'arbre généalogique part une famille d'accélérateurs dont les qualités sont progressivement améliorées grâce aux progrès des techniques et du matériel (informatique, matériaux, etc.). Quand les performances d'une famille, même avec des progrès notables, sont dépassées, cette famille est délaissée et reprise par d'autres disciplines (médecine, physique du solide, métallurgie, archéologie...).

* Les sites d'innovations se sont déplacés de France en Grande-Bretagne, USA, Allemagne, Pays-Bas et URSS, mais leur nombre se réduit actuellement.

* Diverses hiérarchies se manifestent en passant d'un type d'accélérateur à un autre, dans les domaines de la technique, de l'exploitation, des coûts, des buts scientifiques, depuis le petit cyclotron de Lawrence jusqu'au LHC.

* Les gains en énergie apportés par chaque type d'accélérateur permettent aux spécialistes de faire des progrès considérables en recherche : il y a un « gain de productivité » scientifique comme il y en a en économie.

* La décélération que l'on note dans la succession des familles d'accélérateurs laisse prévoir que l'on approche avec le LHC de la limite acceptable de ces techniques (synchrotrons, collisionneurs), de la même façon qu'après un séisme ou un krach financier, les répliques sont de plus en plus espacées jusqu'à être indiscernables. On peut prévoir que la physique des particules devra choisir d'autres voies expérimentales d'investigation. On perçoit des « précurseurs » comme les lasers par exemple.

* Les valeurs obtenues ci-dessus pour les rapports d'échelles sont très proches de $3\frac{1}{2} = 1,73$, $3\frac{1}{4} = 1,32$ et $3\frac{3}{4} = 2,28$, valeurs préférentielles déjà remarquées.

Référence : Brissaud I. et Baron E. 2007. « La course des accélérateurs de particules vers les Hautes Énergies et la Log Périodicité ». In : *Cybergeogéographie*, Revue européenne de géographie. 11 décembre 2007.

http://www.cybergeogeo.eu/index_14173.html

**ENCADRÉ 3.2 : Exemple de log-périodicité :
la découverte des éléments chimique**

Ivan Brissaud

La courbe de la fig. 1 donne le nombre cumulé des éléments chimiques découverts depuis 1750; auparavant ils étaient moins d'une quinzaine. Cette courbe montre que ces découvertes ont été obtenues de façon continue avec des accélérations correspondant à des techniques innovantes apparues aux moments des crises économiques bien décrites par les cycles de Kondratiev. Après chaque accélération, le rythme des découvertes se ralentit jusqu'à une pause, signe de l'épuisement de la créativité et avant l'arrivée des innovations suivantes. Ce comportement s'apparente au modèle des « *équilibres ponctués* » de Gould et Eldredge et pour l'évolution des espèces.

Au *siècle des Lumières*, grâce au renouveau des techniques expérimentales impulsées par la théorie obsolète du phlogistique relative à la combustion, une vingtaine d'éléments sont découverts. Au cycle suivant, la pile électrique imaginée par Volta fait naître l'électrochimie, en particulier l'électrolyse, d'où la mise en évidence du sodium et du potassium, etc. La spectroscopie optique en 1860 permet de détecter le césium, le rubidium alors que Mendeleïev publie son tableau qui va servir de guide dans les recherches ultérieures. En 1896, les rayons X viennent d'être mis en évidence et Becquerel découvre la radioactivité qui permet à P. et M. Curie de trouver le radium et le polonium... À Berkeley (1931), Lawrence crée le premier cyclotron, avant que Chadwick ne trouve le neutron. Cyclotrons et neutrons seront dorénavant les outils adoptés pour tenter de réaliser des réactions nucléaires dans les laboratoires, dans les réacteurs, mais, aussi, dans des explosions thermonucléaires afin de créer de nouveaux éléments et isotopes. Dans les années 1950, les chercheurs avec des accélérateurs d'ions légers et lourds, conçus spécialement, vont tenter de synthétiser d'autres éléments. À partir de 1981, grâce à la technique de « fusion froide, puis chaude », des éléments très lourds de vies très courtes sont créés au *Joint Institute for Nuclear Research* de Doubna (URSS) et à Darmstadt en Allemagne. On se rapproche de l'îlot de stabilité des « super lourds ». La fig. 2 propose un arbre généalogique des techniques ayant conduit à la découverte des éléments.

L'application des équations de la loi log-périodique proposée par Nottale, Chaline et Grou en 1999 conduisent aux valeurs de $g = 1,30 \pm 0,10$ et de $T_c = 2055 \pm 25$ pour le facteur d'autosimilarité et le temps critique. L'étude de cette évolution permet de faire plusieurs remarques qui nous relient aux conclusions des travaux de ces trois chercheurs :

* Depuis les expériences solitaires de Lavoisier jusqu'aux énormes accélérateurs d'ions lourds actuels avec leurs équipes associées, la « complexité » a fortement augmenté.

* Les innovations techniques successives ont permis des « gains de productivité » dans ce domaine comme on peut le voir par ailleurs, principalement en économie.

* Les sites des découvertes se sont déplacés en divers pays avant de se limiter, aujourd'hui, à un ou deux.

* Il convient de noter dans cette analyse l'action du hasard toujours limité par la contingence historique : ce n'est pas par hasard que les innovations citées plus haut correspondent aux cycles économiques, que la pile de Volta fut rapidement exploitée dans la France napoléonienne, etc.

* Les valeurs de g et T_c sont parfaitement compatibles avec celles obtenues par Grou, Nottale et Chaline dans l'analyse des crises économiques incluant les cycles de Kondratiev, cycles aux quels sont rattachées les innovations soulignées plus haut. La valeur de g est à nouveau proche de $3^{1/4} = 1,32$, ainsi qu'avec elle de Johansen et Sornette (2001).

(soumis à publication)

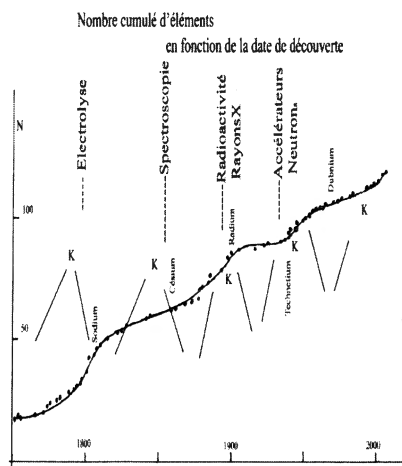


Figure 1. Nombre cumulé des éléments chimiques découverts.

Depuis 1750 ainsi que les phases de croissance et de récession des cycles de Kondratiev avec leurs maxima K.

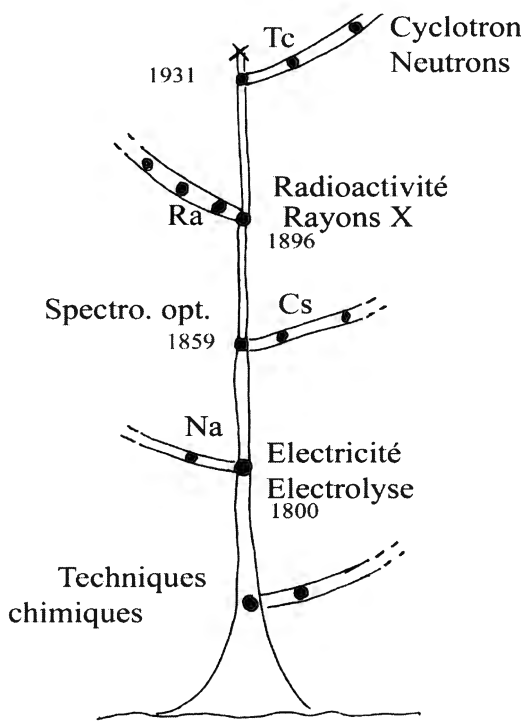


Figure 2. Arbre généalogique des techniques ayant conduit à la découverte des éléments.

Quels enseignements peut-on retenir d'une telle *convergence de temps critiques* prévus pour le milieu du XXI^e siècle ? La principale conclusion qu'on peut tirer de cette convergence entre variables générales — production, démographie, périodes de discontinuités — et variables plus précises, par exemple celles, de nature technologique, qu'on vient d'examiner dans les exemples ci-dessus, est celle d'une convergence globale. Cela vérifie, pour nous, comme on l'a déjà exprimé, que l'ensemble de tout ce qu'on pourrait nommer *une mécanique globale* — ou une *énorme prothèse* — des sociétés humaines se comporte bien comme une totalité, et que le fonctionnement de cette totalité se dirige vers une limite globale, prévue vers le milieu du XXI^e siècle.

► Nature d'une analyse en termes de lois log-périodiques

Qu'en est-il de cette analyse en termes de lois log-périodiques si l'on tente maintenant de comprendre un peu plus ce qu'exprime cette forme de loi ? Il convient d'abord de rappeler le fait que des lois log-périodiques peuvent être obtenues dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle, comme solutions

d'équations différentielles d'échelle du deuxième ordre, écrites de manière covariante. En termes physiques, il s'agit de l'équivalent dans l'espace des échelles d'une équation d'onde dans l'espace ordinaire (voir la Première partie).

Mais cette formulation ne nous exprime pas concrètement une représentation précise de la signification de la périodicité constatée. En rappelant que le processus en question est un processus de *fractalisation*, on peut énoncer, comme Nottale¹, que :

« dans l'hypothèse où la fractalisation vient bien d'une loi d'optimisation, on peut l'interpréter de la manière suivante : après une première dilatation générique qui a permis l'optimisation, il y a à nouveau blocage du système, qui se trouve à nouveau ramené à l'état précédent, au facteur d'échelle près. Le problème étant le même, la solution est également semblable, si bien qu'une nouvelle itération peut opérer. »

D'une manière générale, on peut énoncer ici, que les dynamiques que l'on observe (de l'univers, de la vie et des sociétés) sous forme de *lois log-périodiques* (encadrés 3,1, 3,2, 3,3, 3,4 & 3,5) se caractérisent par des formes d'organisation qui obéissent à des logiques, soit d'épuisement de plus en plus rapide de capacités innovatrices — cas d'une accélération — soit, si l'on se trouve dans le cas d'une décélération, d'un épuisement de plus en plus lent de capacités innovatrices — exemple d'une vie humaine depuis le moment de la fécondation.

1. Nottale L. 2000. *La Relativité dans tous ses états*. Op. cit. P. 182.

ENCADRÉ 3.3 : Évolution Log-périodique du Jazz**Ivan Brissaud**

Le jazz est une musique dont les racines s'inscrivent dans les chants *work-songs*, *spirituals*, *gospels* et *blues* des esclaves noirs amenés d'Afrique vers la Louisiane à partir de 1619 pour y travailler et y souffrir. Le jazz naît véritablement vers le milieu du XIX^e siècle, avant d'évoluer par une succession d'avancées qui soulignent des changements notables de style. Ces étapes ne se manifestent pas au hasard, mais sont connectées à des événements marquants de l'histoire des États-Unis, principalement jusqu'au milieu du XX^e siècle. Chacun des styles n'évolue que lentement ou stagne jusqu'à ce qu'un nouveau style ne vienne le remplacer avec une vive reprise de la créativité. Exemples de ces changements : la fin de la guerre de Sécession voit se développer les *jazz-bands* dans les rues de La Nouvelle Orléans en fournissant des trompettes abandonnées par les armées pour adapter des marches d'origine militaire ; les lois racistes en Louisiane en 1896 poussent les Noirs à aller à Chicago et vers la côte Est ; la prohibition favorise l'ouverture de clubs et dancings, mais introduit aussi la drogue et l'alcool chez les musiciens ; ultérieurement la crise économique de 1929 pousse à la création de grands orchestres pour remonter le moral des populations, etc.

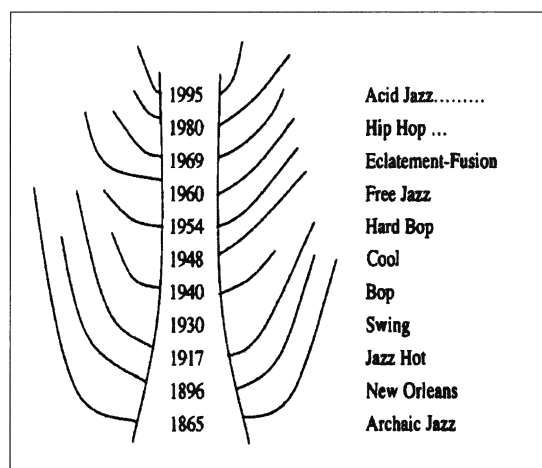


Figure 1. Arbre généalogique schématisant l'évolution du Jazz avec les dates d'apparition des styles différents aux embranchements successifs.

La fig. 2 présente l'évolution de la quantité $Dt=(T_{n+1}-T_n)$ en fonction du temps en appelant T_n le moment d'apparition du style de rang n . Il est aisé de noter une accélération jusqu'au milieu du XX^e siècle, suivie d'une décélération.

On peut appliquer la relation mathématique proposée par Nottale, Chaline et Grou pour lier les dates d'apparition T_n et T_{n+1} de deux styles consécutifs avec $g=(T_n-T_c)/(T_{n+1}-T_c)$ où g et T_c sont respectivement le coefficient d'autosimilarité et le temps critique définis par ces auteurs. Le calcul donne pour la présente analyse :

$$g = 1,34 \pm 0,14 \text{ et } T_c = 1952 \pm 4.$$

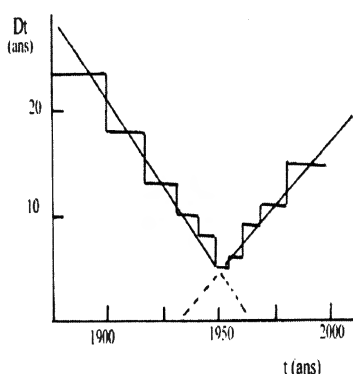


Figure 2. Variation temporelle de l'intervalle de temps entre deux embranchements successifs.

Les historiens du jazz relèvent d'une façon unanime que cette musique, qui s'est développée par étapes successives, se renouvelle à chaque fois jusqu'au *jazz cool* qui marque, comme le suggère son appellation, l'aboutissement d'une musique très calme, dépressive même, loin de son agressivité ou de sa détresse originelles. C'est la fin de la capacité évolutive. Beaucoup de musiciens, même les meilleurs, sont entraînés dans la toxicomanie, la délinquance, l'autodestruction.

Ultérieurement, après le milieu du XX^e siècle, il y a un nouveau départ qui se traduit par une ouverture aux autres musiques étrangères (cubaines, sud-américaines, européennes, asiatiques) en s'affranchissant des carcans précédents : après la Seconde Guerre mondiale et l'ouverture des frontières, c'est une lente mondialisation, comme en économie, un changement complet d'esprit ainsi que le montrent les noms des styles successifs : le *free jazz*, le

fusion jazz, le Hip Hop, l'Acid Jazz. Les lieux de création se déplacent sur la planète. Partout naissent des orchestres renommés, par exemple au Japon. On est très loin des champs de coton originels de la Louisiane. Les écarts entre changements de style sont de plus en plus grands. Les innovations sont moins marquantes et l'inspiration se tarit.

Référence : Brissaud. I. 2007. Évolution Log-Périodique du Jazz. *Mathématiques et Sciences Sociales*, 178 : 41-50.

**ENCADRÉ 3.4 : Évolution des ordres religieux
et log-périodicité Ivan Brissaud**

C'est vers 530 que saint Benoît entame au mont Cassin la rédaction de « la règle » qui porte son nom, règle destinée à définir le mode de vie des moines et les pratiques religieuses. Cette règle va diffuser dans tout l'Occident avec succès puisque le nombre de possessions bénédictines dépassera 2 500. À partir du VIII^e siècle, cependant des difficultés internes (choix de vie dans les monastères, rapports avec les pouvoirs politiques), ou externes (guerres, invasions...), ébranlent l'ordre. La réforme des abbayes bénédictines part de Cluny en 910. L'exemption qui lie directement de nombreuses communautés clunisiennes (plus de 1 000) au pape et non plus aux évêques locaux favorise la puissance et la richesse de l'ordre. Mais, dès le XII^e siècle, pour divers motifs toujours internes et externes, c'est le relâchement, avant le déclin. Pour rétablir l'observance stricte de la règle de saint Benoît, en 1098, le monastère de Cîteaux est fondé. En 1112, saint Bernard le quitte pour prendre la responsabilité de l'abbaye de Clairvaux. Sous sa direction, l'ordre de Cîteaux devient alors prépondérant en absorbant des monastères clunisiens et en créant plusieurs abbayes filles qui vont essaimer à leur tour. Exigeant des moines une vie spirituelle et matérielle très rigides, mais aussi en intervenant dans les domaines religieux séculiers, mais également politiques, saint Bernard permet à son ordre d'atteindre richesse et puissance. Mais, encore une fois, cela débouche sur des conflits conduisant à des pauses, puis à la décadence.

Les tentatives de réforme se succèdent avec plus ou moins de succès. Ainsi, à peu près simultanément, sont fondés vers 1208 les ordres mendiants : Dominicains et Franciscains. Ils ont pour but de lutter contre les hérésies et vont donc s'établir dans les villes plutôt que dans les campagnes. Ils sont rejoints en 1256 par les Augustins et les Carmes. De nouveau, des querelles, des divisions et des abus affaiblissent ces établissements.

Aucun compromis acceptable n'est trouvé, en particulier dans les querelles de l'observance stricte ou non de la règle. Pour conserver le monachisme, l'Église se résout à accepter l'éparpillement et la diversité : à partir du XIV^e siècle un grand nombre d'ordres sont créés, beaucoup disparaissent, parfois des regroupements se réalisent pour un temps (voir fig. 1).

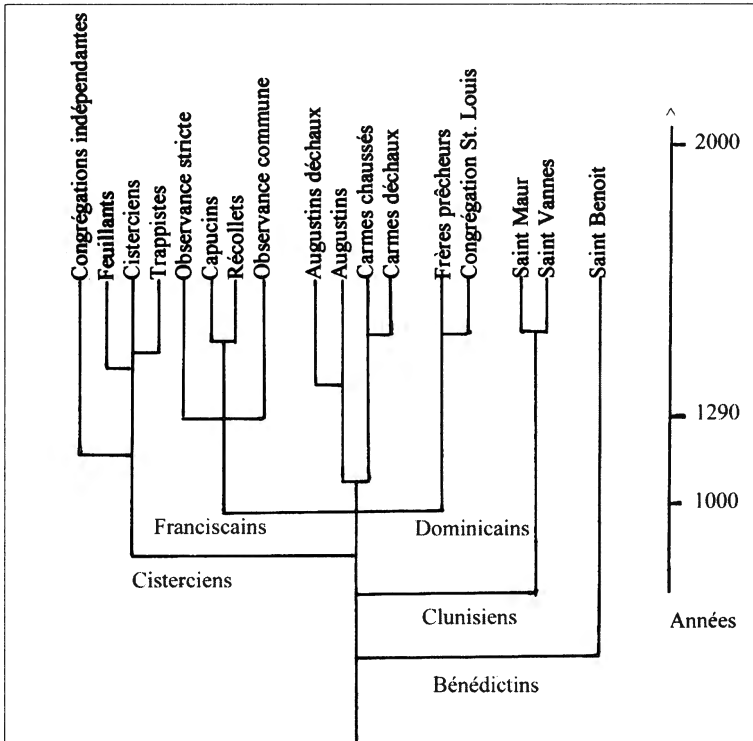


Figure 1. Arbre généalogique schématique montrant la succession accélérée des ordres jusqu'au XIV^e siècle suivie par la confusion des crises, unifications, créations et destructions des ordres et congrégations.

Ci-dessus, nous avons très schématiquement résumé l'évolution des principaux ordres jusqu'en 1300. En appliquant à cette chronologie les équations de la log périodicité avancées par Nottale, Chaline et Grou, on obtient, pour le facteur d'autosimilarité et le temps critique, les valeurs :
 $g = 2,14 \pm 0,30$ et $T_c = 1\,290 \pm 40$

Quelques remarques pour discuter et conclure ces résultats :

* Le temps critique T_c calculé plus haut correspond bien à l'époque de stagnation, d'atonie des ordres, bien connue des historiens.

* Le facteur d'autosimilarité g , voisin de 2, est bien supérieur aux valeurs habituellement obtenues dans les autres analyses. Ceci exprime *une forte accélération de l'évolution*, peut-être reliée au domaine particulier qu'est la religion?

* À chaque étape de l'évolution le processus est identique ; le nouvel ordre apparaît comme celui qui va enfin revenir à l'observance stricte. Ses succès sont éclatants dans tous les domaines, mais, peu à peu, au fil des années, toujours pour des raisons identiques (mode de vie, rapports avec les pouvoirs religieux et civils), il ne sait plus s'adapter, d'où des conflits, puis le déclin.

* Les sites d'où partent les espoirs de renouveau sont toujours différents en Italie, Espagne, France.

* Après le grand vide religieux (1275/80 à 1350/60) les ordres religieux et monastiques ne retrouvent plus leurs rôles prépondérants et à certaines époques ils frôlent la disparition complète. Par contre, depuis, ce sont les religieux séculiers qui bénéficient d'une influence dominatrice. Ainsi, le temps critique T_c a été le moment d'une *super-crise* modifiant en profondeur la place et l'évolution des diverses composantes du monde religieux catholique.

Nottale, Chaline et Grou, et indépendamment Sornette, ont annoncé vers 2050 ± 30 une super-crise économique. Peut-on s'attendre à ce qu'ultérieurement, celle-ci ait une évolution proche de celle des ordres après le XIV^e siècle?

Accepté pour publication dans *Mathématiques et Sciences humaines*, édité par l'EHESS.

• Incompréhension par la communauté des chercheurs des raisonnements en termes de temps critique prévu au XXI^e siècle

On a pu prendre connaissance en début de XXI^e siècle, de beaucoup de descriptions et prises de conscience, mais il s'agit trop souvent de constats portant sur la dimension environnementale qui sont purement descriptifs et sans références.

Dans un ouvrage intitulé *L'Enfermement planétaire*¹, André Lebeau, dresse un inventaire des grandes difficultés qu'une action, destinée à dominer les limites rencontrées par l'activité humaine, risque de mettre en évidence. Il fait d'abord référence à l'incapacité d'anticipation dont fait preuve l'espèce humaine. Puis il écrit :

« Une autre faiblesse du comportement humain tient à l'incapacité de percevoir l'unité de la menace sous la diversité des aspects. Il est évidemment nécessaire que chacun de ces aspects fasse l'objet d'une analyse spécifique qui mette en jeu des disciplines variées selon que l'on considère les sources d'énergie, la production alimentaire, l'extinction des espèces, la démographie ou la pollution de l'atmosphère. L'incapacité, pour un individu, de maîtriser plus qu'une faible partie des acquis culturels pertinents rend indispensable l'intervention de spécialistes qui apportent chacun les modes de pensée et parfois les préjugés et les ornières de leur discipline. Il est naturel que les démarches qui s'élaborent ainsi conduisent à préconiser des remèdes spécifiques. Mais la question de savoir si ces remèdes spécifiques constituent une solution globale est trop négligée. »

Puis il énonce une troisième grande difficulté :

« Enfin, la plus grande des menaces qui pèse sur l'humanité est celle qui résulte de sa division en États gardiens des intérêts et des privilèges de leur peuple comme de l'intégrité de leur territoire. C'est dans la solidité de cette structure que s'ancre le plus profondément la volonté de préserver les avantages acquis. »

Répetons-le, le processus d'accélération économique est mal compris.

Autre exemple, Geneviève Ferone², après avoir fait référence à des travaux comme ceux du GIEC, qui prévoient un changement climatique de plus en plus préoccupant au cours du XXI^e siècle, écrit :

« Sauf que la véritable frontière temporelle n'est pas 2100, mais bien plutôt 2030 ! Cette date n'a rien d'arbitraire. Nous connaissons une situation totalement inédite dans laquelle il semble qu'une très grande partie de nos défis d'ordre économiques, environnementaux, scientifiques et sociaux se donnent précisément rendez-vous en 2030. En 2030 nous serons plus de 7 milliards de bouches à nourrir, dont les deux tiers vivant en zone urbaine, sur une Terre saturée de pollution et de déchets déjà affectée par une hausse sensible des températures. En 2030 nous serons entrés dans une phase de pénurie pour le pétrole et de fortes tensions sur les autres énergies fossiles, dans un contexte d'amenuisement des ressources vivrières et d'appauvrissement des terres cultivables. »

1. 2008. Gallimard. P. 299.

2. Ferone G., 2030, *Le Krach écologique*, Grasset, 2008, p. 15.

Mis à part les arguments ci-dessus, détaillés dans le cours du développement, aucune démonstration relative au choix de la date n'est fournie. Pourquoi 2030, et pas 2025 ou 2035 ou 2040 ? Aucune justification n'est apportée, ni aucune incertitude, ou barre d'erreur estimée pour la date proposée.

Pour confirmer l'intérêt d'une analyse en termes de lois log-périodiques, examinons d'autres exemples de séries temporelles au XX^e siècle qui exprime de manière nette des données propres à l'organisation des sociétés, qu'on pouvait soupçonner. Nous prendrons comme exemples les temps critiques obtenus pour des sous-périodes d'évolution économiques au XX^e siècle concernant les *périodes socialistes* de la Russie et de la Chine (Encadré 3.5).

Encadré 3.5 : Évolution économique de la Chine et de l'URSS
Ivan Brissaud et Laurent Nottale

1- La Chine

En ce qui concerne les grandes échelles de temps, Pierre Grou a identifié (*L'Aventure économique, op. cit.*, p. 41) les grandes dates du rythme crise-non crise de l'histoire de la Chine, que voici :

{-2950, -1750, -750, -200, 200, 600, 1000, 1400, 1750}

Une analyse de ces dates montre tout d'abord une claire accélération : les quatres premiers intervalles, {1200, 1000, 550, 400}, sont décroissants de manière évidente. Le temps critique est $T_c = 1100$, qui est la date centrale de la dynastie Sung (960-1280), identifiée par Maddison (voir plus bas) comme une époque fondamentale de transformation (augmentation importante du PNB, doublement de la population). Mais ensuite, les écarts sont remarquablement réguliers : {400, 400, 400, 400, 350}. On passe donc d'une log-périodicité à une périodicité (qui, rappelons-le, est un cas particulier de log-périodicité correspondant à un temps critique repoussé à l'infini).

Sur des échelles de temps plus courtes et des dates plus récentes, on s'aperçoit que cette longue stabilité n'a plus cours. L'économiste britannique Angus Maddison (1926-) a publié les valeurs annuelles du PIB chinoises pour la période suivant l'établissement de la République populaire (<http://www.ggdnet/maddison/>). Ceci nous a permis d'identifier avec sûreté les moments où les taux de croissance étaient aux plus bas (crises), c'est-à-dire, les années 1957 (avant Le Grand Bond en avant), 1961 (conséquences désastreuses de ce Grand Bond), 1967 (révolution culturelle), 1976 (difficultés naturelles et problèmes politiques, Bande des 4), 1990 (inflation, réforme des prix).

L'observation de ces données montre une *décélération* dans la succession des minima du PIB et suggère que l'évolution de ceux-ci peut être analysée par une fonction log-périodique. L'ajustement de cette fonction conduit aux valeurs suivantes de ses paramètres :

Le facteur d'auto similarité qui règle la succession des crises est $g = 1,47 \pm 0,05$ avec un temps critique $T_c = 1948 \pm 3$.

Discussion et conclusion. Il faut souligner que ce temps critique de 1948 qui est le point de départ de la succession des crises correspond presque exactement à la prise du pouvoir par l'armée révolutionnaire (octobre 1949). Dans le cadre de cette description, le passage au système capitaliste d'État actuel est seulement une étape au cours de cette évolution* et non la fin* ou le départ vers un autre système. Ce modèle log-périodique permet de prévoir que les prochaines crises devraient se situer vers 2010 ± 3 et 2045 ± 3 sans que l'on puisse définir les causes précises ni les conséquences de celles-ci.

2- L'URSS

Pour tenter de rendre compte par la log-périodicité de l'évolution économique de l'URSS, nous avons adopté les repères historiques, bien connus suivants, après la Révolution de 1917 (voir le site <http://www.ggdc.net/maddison/>) :

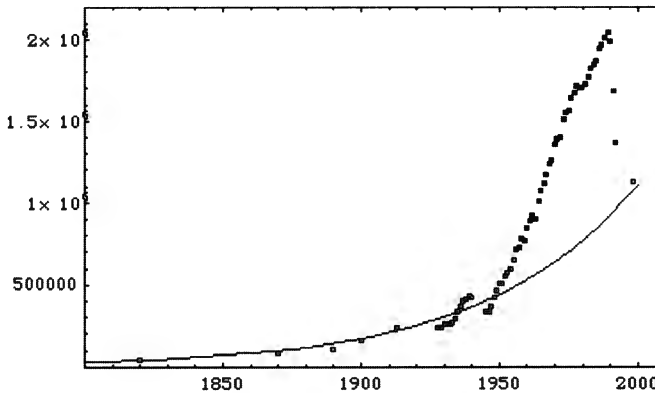
- Communisme de Guerre 1918-1921.
- Nouvelle politique économique (NEP, Lénine, 1921) : 1921-1929.
- 2^e Guerre mondiale : 1941-1945.
- Crise économique : 1980.

L'ajustement à partir de ces données des paramètres de la fonction log-périodique conduit aux résultats suivants : un facteur d'autosimilarité $* g = 2,3 \pm 0,2$ et * un temps critique, $T_c = 1916 \pm 3$.

En ce qui concerne l'évolution du PIB, celui-ci montre depuis 1800 une croissance régulière de type exponentiel qui montre des fluctuations autour des deux guerres mondiales. Un régime de croissance linéaire très forte s'y surajoute entre 1950 et 1989, qui s'effondre ensuite pour retrouver autour de 2000 la valeur qu'on aurait pu extrapoler à partir des données 1820-1913! (voir figure).

Discussion et conclusion. Comme pour la Chine, ce temps critique correspond, aux barres d'erreur près, à la prise du pouvoir par les Bolcheviks en octobre 1917. À partir de cette date, l'évolution se manifeste par une *décélération*, les crises se succédant après T_c comme se succèdent les répliques après un séisme. L'évaluation de la date de la prochaine crise donne 2065, c'est-à-dire au même moment (toujours aux incertitudes près) que la super-crise identifiée par L. Nottale, J. Chaline et P. Grou (2080 ± 30) à

l'aide de données différentes, ainsi que par Johansen et Sornette (2050 $\pm$ 20) à partir d'indices économiques, de recherche et développement, etc., eux-mêmes indépendants des études précédentes.



On constate que les évolutions de ces deux pays « socialistes » sont contrastées : des valeurs de g fort différentes, contrairement à celui de la Chine un indice PIB de l'URSS en croissance assez constante et relativement élevée de 1930 à 1970 (en dehors des années de guerre). Soulignons aussi que, comme dans les pays occidentaux, c'est dans la décennie 1970-1980, mais de façon plus brutale, que les économies de ces deux pays ont atteint leurs limites d'efficacité et doivent se transformer radicalement lors de la mondialisation économique actuelle.

On peut tout d'abord constater, aussi bien dans le cas de la Russie que dans celui de la Chine, que le *temps critique*, c'est-à-dire le moment d'une singularité pour ces deux pays, se situe lors de leurs deux révolutions de 1917 et 1949. Ce résultat est remarquable, car il signifie que ces deux dates sont un point de départ. On peut effectuer de manière évidente l'hypothèse qu'une limite avait été atteinte dans la situation antérieure et que les révolutions accomplies ont eu pour objectif d'installer une nouvelle dynamique. Ensuite, la donnée d'une décélération commune aux deux expériences permet également d'imaginer que la capacité d'innovation de ces nouveaux ensembles sociaux, issus des deux révolutions, avait atteint leur plénitude dès l'origine, puis est allée en s'amenuisant. Cet élément est lui aussi intéressant, car il suggère que le type de révolutions accomplies n'était qu'un essai, qui demandait à être transformé.

Pour conclure ce premier chapitre consacré à la dynamique évolutive des sociétés humaines, on doit insister sur l'apport des analyses en termes de lois log-périodiques, apport qui constitue une des applications de la théorie de la relativité d'échelle. Puisque certaines de ces applications permettent un début de compréhension du déroulement du XXI^e siècle, incluant un certain niveau de prédictibilité, on peut déjà poser la question de l'aide que cette théorie pourrait apporter dans une perception plus claire des issues imaginables aptes à dépasser le temps critique qui attend les sociétés humaines durant ce siècle.

Pour ouvrir dès maintenant une piste, souvenons-nous qu'on a établi plus haut que le phénomène d'accélération économique propre à l'humanité depuis son origine pouvait se diviser en trois grandes étapes. La première était celle de l'étape des chasseurs-cueilleurs où ceux-ci avaient envahi le monde, la seconde s'étendant du monde néolithique au développement du capital marchand européen s'était également conclue par la conquête de la planète, et enfin, la troisième, celle de la révolution industrielle, a abouti à la mondialisation économique. Remarquons que lors de chaque début de nouvelle étape, par exemple lors de la révolution néolithique ou de la révolution industrielle, la forme de société apparue a permis chaque fois un dépassement de la forme précédente — chasse/cueillette dépassée par l'agriculture/élevage — dans le cas de la révolution néolithique, et artisanat dépassé par l'industrie dans le cas de la révolution industrielle. Face à la grande limite du XXI^e siècle, il convient de concevoir dès le début du XXI^e siècle, un dépassement possible, vers une plus grande complexité, de toutes les caractéristiques de l'ensemble organisé — ou prothèse des sociétés — que nous avons qualifié plus haut de *mécanique globale* de la société humaine du début XXI^e siècle. Comme on a tenté de montrer, qu'une plus grande complexité de la société humaine se manifestait par un accroissement du nombre d'échelles qui la composait, il nous semble qu'un début de piste conceptuelle, celle d'un besoin d'un plus grand nombre d'échelles, nécessaire au dépassement du temps critique du XXI^e siècle, apparaît ici. Ajoutons qu'on a donné comme explication la plus profonde de la recherche de gains de productivité par les sociétés humaines, une finalité en termes d'économie de travail humain, donc en termes physiques, d'énergie. Cette recherche d'économies en termes d'énergie nous laisse également présager que fondamentalement, c'est le domaine énergétique et par suite une meilleure appropriation de ce domaine par les êtres humains, qui pourrait constituer un des enjeux principaux du dépassement du temps critique du milieu du XXI^e siècle. Ce point d'arrivée du chapitre nous permet de passer au point de départ d'un second chapitre.

3.2

Une dynamique multi-échelle observable dans l'évolution des sociétés humaines

Dans ce second chapitre, nous allons poursuivre l'étude des rapports entre processus d'organisation de plus en plus complexe et augmentation du nombre d'échelles. Puis nous nous intéresserons à la question de la distinction entre échelles individuelles et échelles collectives. Nous réexaminerons ensuite l'existence des hiérarchies et des pôles de domination en nous demandant quels types d'échelles sont concernés. Nous analyserons alors les transformations de l'espace des échelles qui se produisent lors des crises économiques, sous forme d'économies d'énergie pour la nouvelle organisation, mais également par des phases de déclins des anciennes formes. Enfin, comme on l'a suggéré en fin de premier chapitre, nous postulerons que les nouvelles organisations doivent aboutir à une nouvelle étape, plus riche en échelles que les précédentes.

Une dynamique organisatrice s'effectuant par démultiplication d'échelles

Depuis la révolution industrielle, plus particulièrement avec l'énoncé de la théorie néo-classique à la fin du XIX^e siècle, le concept de « *marché* » a pris de plus en plus d'importance. Après les années 1970, la prise de pouvoir, au niveau mondial, d'une bourgeoisie mondialisée ne détenant son pouvoir d'aucun mandat quelconque, et ne subissant aucune forme de contrôle, lui a permis d'imposer en tous lieux, un mode d'analyse de la réalité économique en termes de *marché*. Or ce concept est fondamentalement appauvrissant. Il transforme une réalité, comme on va le voir, multiple, fractionnée, établie en échelles, en un assemblage uniforme de *marchés*.

De même que la compréhension de l'évolution économique est rendue impossible par sa présentation en termes de seul « *hasard* », une analyse satisfaisante de l'organisation des ensembles économiques est

complètement travestie par sa description en termes de « marchés ». *Bien évidemment l'avantage de la construction de la pseudo-analyse en termes de marchés réside dans son point d'arrivée, où il est spécifié que, pour bien fonctionner, les marchés ne souffrent aucune forme d'intervention. On a ainsi compris au profit de quel groupe social, cette pseudo-pensée présente de l'intérêt.*

Ce rappel étant effectué, nous pouvons revenir à notre propre démarche.

La dynamique organisatrice entraîne une démultiplication d'échelles dans l'évolution économique

On a signalé que la dynamique organisatrice de l'évolution économique entraînait une démultiplication d'échelles, ou une complexification croissante, ou encore une division du travail de plus en plus grande.

Un accroissement de taille des espaces économiques

Élément supplémentaire, une démultiplication d'échelles peut s'accompagner d'un accroissement de la taille des espaces économiques. D'abord, un problème de précision de définition se pose, celui de la spécificité d'un espace économique, par exemple par rapport à un espace géographique. La méthodologie que nous proposons¹ aboutit à la définition suivante :

Un espace économique est un espace géographique structuré en même temps par les technologies du moment et par le niveau démographique correspondant à l'état de ces techniques.

Ainsi, pour nous, l'extension des espaces économiques, d'une portion de savane jusqu'à la mondialisation économique s'explique par la nature d'un lien technologie-espace économique. Nous rappellerons tout d'abord la caractéristique générale d'une tendance à l'élargissement des espaces économiques lors de l'évolution économique. Puis, nous indiquerons deux formes d'élargissement qui se succèdent dans la dynamique des espaces économiques. Nous verrons ensuite que, de même que dans le temps, chaque période atteint ses limites, chaque espace économique apparu à un moment de l'évolution, se définit aussi par des limites, ou des frontières. Nous aurons besoin de définir comment les humains

1. Grou, P., Guillon, R., Mertens-Santa-Maria, D. & Messamah, K. 2008. *Vers une très grande Europe*. L'Harmattan. Paris.

s'organisent en élaborant une architecture « *individuel/collectif* ». Nous examinerons le cas de plusieurs niveaux spatiaux engendrés par un accroissement de complexité. L'étude de la dynamique individuel/collectif sur plusieurs niveaux suggère une nouvelle analogie avec les phénomènes physiques. Nous verrons alors que l'élargissement de l'espace économique dans la *mondialisation*, aboutit à l'espace du temps critique du XXI^e siècle, cadre optimum de la coopération humaine à la fin d'une première grande étape de l'histoire des sociétés. Enfin, nous expliquerons l'impuissance de la théorie néo-classique à expliquer la réalité des phénomènes économiques que nous étudions, par l'argument qu'il s'agit plutôt d'une *idéologie du statu quo au profit de groupes sociaux dominants*, qu'un véritable outil d'analyse.

Tendance à l'élargissement des espaces et niveaux de technologie

On se souvient que, pour nous, une tendance à l'élargissement des espaces économiques est une grande caractéristique de l'évolution économique. On constate que lors de l'histoire humaine les espaces économiques se sont étendus d'une portion de savane jusqu'à l'espace lui-même, à l'échelle du système solaire. Et depuis la fin du XX^e siècle, la multinationalisation des firmes et banques a permis à l'espace économique humain d'acquérir une dimension supplémentaire.

► Réalité d'une tendance à l'élargissement des espaces économiques

L'Australopithèque vivait en nomade dans la savane, sur un espace de quelques centaines de kilomètres carrés. La naissance des grands empires de l'Antiquité correspondait à des tailles de l'ordre de la vallée d'un fleuve comme celle du Nil. L'empire britannique du XIX^e siècle a été le premier sur lequel le Soleil ne se couchait jamais ! L'empire américain, par ses productions, a dominé l'ensemble de la planète, de 1945 à 1970. Cette domination mondiale a connu un sommet lorsqu'elle s'est traduite par l'envoi d'êtres humains sur la Lune et de sondes spatiales aux confins du système solaire.

► Le niveau de technologie atteint entraîne une taille de l'espace économique qui lui correspond

Au cours de l'évolution économique la masse de l'ensemble des objets produits par l'homme a augmenté. Cette situation a résulté du processus de gains de productivité qui a permis de fabriquer une plus

grande quantité de biens en un temps identique. Par suite une diffusion de plus en plus étendue de ces richesses créées, par la vente ou l'échange, a eu pour conséquence un accroissement de l'espace lié au niveau de technologie.

Ainsi, on peut présenter une phase de conquête d'empires coloniaux, illustrée par les exemples des empires britannique et français. Une phase suivante d'élargissement de l'espace national est apparue dans le cas américain, se traduisant vers l'Ouest du continent nord-américain. Une tentative comparable de conquête d'un espace « vital » nazi en Europe n'a pas abouti. En fin de XX^e siècle, on assiste à la phase d'installation de l'espace multinational, recouvrant celui des États industrialisés, traversant leurs frontières, et unifiant la plus importante partie de la planète.

Trois grandes périodes d'extension spatiales

Comme on l'a déjà dit, la dynamique de l'élargissement des espaces économiques est une constante de l'évolution économique, et l'on peut distinguer trois grandes formes qui correspondent aux trois grandes périodes dégagées dans le chapitre précédent.

► De la savane africaine à la conquête des continents

On l'a déjà annoncé, une première période d'extension de l'espace économique est celle de la conquête du monde par les chasseurs-cueilleurs. Elle correspond également à une première étape de la *dynamique « individuel-collectif »*, celle du groupe social caractérisant les premières sociétés primitives.

► De la révolution néolithique à la conquête des océans

Une seconde période, caractéristique des progrès de sociétés restées majoritairement agricoles, voit la réalisation d'une nouvelle conquête du monde. Celle-ci se termine avec les explorations des océans à l'aide de bateaux à voile, dont les expéditions sont principalement financées par les marchands des XIV^e, XV^e, et XVI^e siècles, expressions du capital commercial européen.

► De la révolution industrielle à la mondialisation économique

Après le moment de transition du développement du « *capital commercial* » sans frontières spatiales stables, on assiste à l'apparition de nouvelles frontières spatiales, celles de l'État-nation, mais qui évoluent quantitativement jusqu'à l'installation de la mondialisation vers 1970.

Cette période se décompose elle-même en plusieurs moments :

- la constitution des espaces nationaux qui se prolongent par des empires coloniaux ;
- l'émergence d'un espace continental américain ;
- l'échec napoléonien en Europe ;
- les deux guerres mondiales comme tentatives par l'Allemagne de constituer un vaste espace européen de même nature que l'espace économique des États-Unis d'Amérique. Idem pour le Japon en Asie ;
- la fin des empires coloniaux : replis sur des espaces nationaux plus complexes — grande croissance 1945-1970 ;
- l'aboutissement de la mondialisation par la complexification des espaces économiques.

On l'a vu, d'une manière générale, le niveau de technologie d'un moment — qui correspond à la vitesse, au même moment, atteinte dans le processus d'appropriation de la nature — obéit au mouvement d'évolution technologique vers la complexité, lequel conduit à l'accroissement de la taille de l'espace économique. Et plus précisément, dans la période d'extension de la marchandise, l'évolution technologique a commandé un travail complexe incorporé de plus en plus socialisé. La division du travail a produit des « *blocs* » de travail complexes de plus en plus importants. Car s'il y a échange, on aboutit à une nécessité de débouchés situés sur un espace plus large. Au total, il semble qu'à chaque moment de l'évolution, le couple « *cerveau x nombre d'individus* » détermine un niveau de complexité de technologie, lequel induit une taille d'espace économique.

► Les extensions successives, résultats des modifications d'échelles précédentes

Chaque nouvelle extension d'espace, en modifiant l'espace des échelles précédent, entraîne une nouvelle configuration d'échelles, qui sera à son tour responsable d'une nouvelle extension. Et si l'on reprend en compte les trois grandes étapes rappelées plus haut, qui chaque fois aboutissent à une limite spatiale correspondant à la taille du monde, on peut rapprocher ce processus de celui rappelé plus haut de Nottale, où :

« après une première dilatation générique qui a permis l'optimisation, il y a à nouveau blocage du système, qui se trouve ramené à l'état précédent, au facteur d'échelle près. Le problème étant le même, la solution est également semblable, si bien qu'une nouvelle itération peut opérer. »

Cette fois un phénomène de *fractalisation* dans l'évolution économique des sociétés semble apparaître clairement.

Limites d'échelles spatiales

D'une manière générale on peut énoncer que comme lors de l'évolution économique temporelle — où chaque période atteint ses limites — un espace économique se définit aussi — on vient de le voir — par des limites, ou des frontières. Donnons quelques exemples plus précis d'une histoire des limites spatiales qui s'écrit en termes de :

- limites des villages néolithiques ;
- limites des grands empires ;
- frontières de l'État-nation, à partir de la révolution industrielle ;
- dépassement des frontières de l'État-nation dans la mondialisation économique.

► Un exemple d'accroissement d'espace économique et de multiplication d'échelles : la mondialisation économique

En effet, si l'on étudie l'évolution économique on s'aperçoit que de tous temps à un niveau de technologie accompagné d'un niveau démographique, a correspondu un type d'espace économique. Ainsi, par exemple l'emploi de techniques de domestication du Nil dans l'Égypte ancienne a engendré un type d'espace économique structuré en même temps par la technologie — barrages, canaux d'irrigation, voies de communication — et aussi par un niveau démographique, correspondant aux besoins en main-d'œuvre nécessaire à la réalisation des grands travaux d'irrigation. En corollaire, les gains de productivité accrus obtenus dans la production agricole ont permis le niveau démographique constaté. Au total, la population a ainsi atteint un nombre plus élevé que celui que connaissaient les villages du Nil avant le développement des techniques de domestication du fleuve.

Puis, au fur et à mesure que les technologies ont évolué dans le sens des gains de productivité, la démographie a vu son niveau s'accroître et la nature des espaces économiques se modifier. Rappelons que ces transformations se sont également caractérisées par l'élargissement de ces espaces économiques, phénomène qui représente une des principales données de l'évolution économique.

Par suite, en fin de XX^e siècle, le stade d'élargissement atteint — celui de l'espace mondial — est la conséquence de la *révolution technologique mondialisante* réalisée après 1970. On a dit plus haut à ce propos, qu'avec l'apparition de ce nouveau type d'espace économique, a été remis en question le rôle de référence quasi-unique joué par l'État-nation depuis la révolution industrielle. En effet, ce moment s'était caractérisé par

l'établissement d'un espace fermé, entouré de barrières de protection douanières, délimitant des formes d'espace à proportion quasi-identiques, tels ceux de la Grande-Bretagne, de la France, un peu plus tard de l'Allemagne. Les rapports d'échanges entre ces espaces avaient généré un type d'économie nommée *Économie Internationale*.

Ces espaces économiques nationaux ont ensuite acquis des dimensions d'empires coloniaux ou d'espace quasi-continental dans le cas des États-Unis d'Amérique. En Europe, ils ont continué à s'élargir, malgré la décolonisation, par un début d'unification et par des flux d'exportations, dans les vingt-cinq années de l'après Seconde Guerre mondiale. Cette dernière période a précédé le début de la mondialisation économique. Avec la naissance de *l'économie mondiale*, une abondante littérature a énoncé la perte d'importance du rôle de l'État-nation, certains auteurs allant même, jusqu'à en prédire la disparition.

Pour nous, cette vision est erronée, car la nouvelle réalité n'a pas du tout entraîné une suppression de la fonction de l'espace national. Elle n'a fait que la modifier. Et, phénomène encore plus remarquable, un nouveau constat doit être effectué : *l'émergence d'un espace économique mondial, non seulement ne s'accompagne pas de la disparition de l'espace national, mais au contraire, se complète par le développement de deux autres types d'espaces économiques supplémentaires, l'un à l'échelle continentale et l'autre à l'échelle locale/régionale*. Ce processus, qui prend ici la forme d'une démultiplication d'éléments, est connu et fréquent lors de dynamiques évolutives ; il s'agit de l'effet de complexité croissante d'un ensemble.

Dans le domaine économique, un phénomène de complexité croissante a pour résultat d'augmenter la productivité de l'ensemble concerné. On le comprend aisément puisque le processus d'accroissement du nombre des éléments de l'ensemble a pour conséquence une augmentation de la division du travail, elle-même puissant moyen de hausse de productivité.

Ainsi, on est passé après 1970, d'un ensemble constitué d'espaces économiques nationaux — reliés entre eux par des échanges commerciaux — à une démultiplication d'espaces, illustrée par :

- l'apparition d'un espace mondial ;
- le renforcement de plusieurs espaces quasi-continentaux ;
- la présence toujours active d'un très grand nombre d'espaces nationaux ;
- et enfin, le développement d'une multitude d'espaces locaux/régionaux.

► Quel statut accorder à chaque échelle ?

Dans cette nouvelle configuration de division du travail, il convient de souligner l'importance de chaque échelle, car chaque échelle a son propre rôle à jouer, et aucune n'est plus importante qu'une autre. Par suite un niveau d'action peut être plus approprié qu'un autre en raison du but recherché. On peut intervenir sur l'échelle la plus basse, sur une échelle intermédiaire, ou sur l'ensemble. On a rappelé plus haut que, dans la mondialisation encore plus que précédemment, la contrainte technologique propre à l'histoire de l'humanité, était déterminante. Si l'on se fixe comme objectif de mettre en application cet impératif technologique, se pose le problème du rôle de chaque échelle.

De l'époque de la révolution industrielle jusque vers 1970, la question du lieu d'une intervention était superflue. C'était dans le cadre de l'État-nation, pris ou non dans sa globalité, que les actions s'effectuaient. Dans le cadre européen, un processus de construction économique entre quelques pays avait démarré pendant les années 1950, avec au départ un nombre d'États-nations concernés limité, puis le phénomène s'est ensuite accentué.

Dans la mondialisation, chacune des quatre nouvelles échelles économiques apparue présente ses propres spécificités.

L'échelle mondiale est le lieu d'action des firmes et banques multinationales. Ce sont elles qui structurent l'économie mondiale, et qui sont les vecteurs de la mondialisation. Celles-ci ne peuvent se développer dans n'importe quelles conditions. Il leur faut par exemple un environnement indispensable de libre circulation des marchandises et des capitaux, etc.

L'échelle continentale s'illustre par exemple par le cas américain de l'ALENA, espace de libre circulation de marchandises établi entre les États-Unis, le Canada et le Mexique. La caractéristique propre à l'échelle d'un espace *continental* réside dans le fait qu'elle se situe à égale distance entre la nationale et la mondiale, servant ainsi de lieux/relais, d'intersection entre les deux précédentes. C'est elle qui focalise le plus grand essor du commerce mondial, car c'est principalement entre pays du même continent que s'effectue l'accroissement des échanges mondiaux.

L'échelle nationale garde encore de l'importance, car, bien que le rôle de l'État se soit modifié, il y conserve de nombreuses fonctions, comme par exemple la politique budgétaire dans le cas européen.

Quant à *l'espace local/régional*, il représente un nouveau lieu où doivent être réglées beaucoup de questions qui ne peuvent plus l'être au niveau national, par exemple l'effort éducatif, l'essor technologique,

ou la politique de l'emploi. Ainsi, chaque échelle présente une égale importance.

Si l'on se fixe un objectif d'application d'un modèle d'impératif technologique, l'échelle mondiale telle qu'elle a été définie ne peut être prise en compte. On imagine mal en effet en début de XXI^e siècle la possibilité de définir une politique technologique à l'échelle de la planète. On pourrait concevoir des types de politiques globales qui concernent les technologies de préservation de l'environnement, ou certaines qui organiseraient des transferts de technologie vers les pays pauvres. Il faut cependant savoir que le contexte de début de XXI^e siècle est celui d'un fort déficit organisationnel mondial. Mais rien n'empêche, en attendant, qu'un impératif technologique soit réalisé sur les trois autres échelles de la complexité mondiale : aux échelles continentale, nationale, et locale/régionale. C'est ce qui doit être réalisé.

Échelles individuelles et échelles collectives

Une application importante de l'élaboration d'une architecture en échelles est illustrée par le mode de transformation d'organisations deux à deux, en termes d'« échelles "individuelle" ou "collective" ».

Combinaisons d'échelles « individuel/collectif »

Au sein de limites spatiales, les structures socio-économiques sont historiquement de nature collectives, mais résultent chaque fois de l'élaboration d'une architecture « individuel/collectif ».

► Absence de liens entre « individuel » et « collectif » dans la pensée économique dominante

On examinera successivement la théorie néo-classique puis d'autres courants de pensée exprimés au XX^e siècle.

• Structuration « individuel/collectif » et théorie néo-classique

Qu'il s'agisse de dégager une loi d'évolution des sociétés, de mettre l'accent sur la réalité des discontinuités, d'insister sur les hiérarchies économiques, ou de prévoir l'existence d'un temps critique au XXI^e siècle, la théorie économique néo-classique, dominante dans l'enseignement des sciences économiques au début du XXI^e siècle, ne fournit aucune réponse.

Il en va de même évidemment face au problème d'une structuration « individuel/collectif ». Les rapports entre d'une part, les unités individuelles de production, de consommation, etc., présentées comme appartenant au domaine de la micro-économie, et d'autre part l'ensemble de ces unités de production, de consommation, etc., qui définissent le domaine de la macroéconomie sont ignorés. Le manque de liens entre les deux niveaux est expliqué par une absence de passage — sorte de fatalité incompréhensible — appelée « *no bridge* » (sans pont). Cette lacune ne préoccupe pas ses auteurs, puisque dans leur conception idyllique — qui ne présente aucun rapport avec la réalité — les unités économiques se rencontrent sur les marchés, dont le bon fonctionnement conduit de toutes manières à un optimum économique, dit « *parétien* », du nom de l'économiste Pareto, auteur de la prédiction.

• Structuration « individuel/collectif » et autres courants de pensée du XX^e siècle

Rappelons qu'au XX^e siècle, le cadre de pensée keynésien s'est situé d'emblée à un niveau « collectif » puisque macro-économique par définition. Par suite, le problème d'un « *no bridge* » entre les unités économiques individuelles et le fonctionnement collectif d'une macroéconomie n'a pas été envisagé.

Signalons qu'en fin de XX^e siècle, *l'École française de la Régulation* s'est située dans une conception évolutionniste bien plus proche de la réalité. Cependant elle accorde encore peut-être une trop grande importance à une donnée d'emblée totalisante. Par exemple, entre 1945 et 1970, c'est un type de rapport salarial qui aurait été déterminant pour caractériser l'ensemble du niveau d'organisation dans les pays industrialisés, car ce type de « *rapport salarial* » aurait imprimé une marque globale au niveau « collectif », « *régulant* » ainsi l'ensemble des fonctionnements « *individuels* ». Une réponse précise à la question du rapport entre « individuel » et « collectif » mériterait d'être proposée.

Au total, en début de XXI^e siècle, le besoin d'une conception satisfaisante d'un lien « individuel/collectif » se fait sentir.

► Une architecture « individuel/collectif » construite dans une dynamique logique, particulièrement aux moments de crise de l'évolution économique

Constatons d'abord l'évidence que le rapport entre « individuel » et « collectif » n'est pas dichotomique, qu'il n'est pas victime d'une coupure, d'un « *no-bridge* » incompréhensible, puisque l'« individuel » a pour destin d'adhérer au « collectif » et que le « collectif » est formé

d'« individuel ». Au contraire ce rapport se construit dans une continuité logique, où l'« individuel » s'insère dans un processus architectural allant vers le « collectif » de manière spontanée. Dans cette architecture en construction, chaque élément individuel contient du collectif, et le collectif est constitué de parts d'individuel.

L'exemple de la Révolution néolithique, celle qui fait passer l'humanité de la chasse-cueillette à l'agriculture-élevage, permet d'imaginer, à son tout début, des jaillissements de formes « individuelles » agricoles et d'élevage, peu organisées collectivement. Ces nouvelles formes se sont insérées dans le contexte général précédent de chasse/cueillette. Ces premières installations, illustrées par des modes de vie plus stables qu'auparavant, sont apparues en Asie Mineure et dans le Moyen-Orient actuels vers -8000 av. J.-C., et s'expliquent parce qu'à ce carrefour entre trois continents, l'accumulation et la rencontre d'expériences nouvelles y étaient plus aisées qu'ailleurs. Puis il a fallu du temps pour que l'organisation collective stable du village néolithique s'installe définitivement, remplaçant la collectivité de type « horde » des chasseurs-cueilleurs précédents.

Ainsi, on peut concevoir que dans une première phase, se produit un jaillissement de formes individuelles, accompagnées de formes collectives embryonnaires. *Il s'agit de l'apparition d'un nouveau monde économique, d'abord caractérisé par des formes individuelles peu organisées collectivement, qui ont pour fonction d'entamer la destruction de l'ensemble « individuel/collectif » précédent. Cette première période est celle d'une crise économique.* On a vu plus haut qu'il convient de donner une signification bien précise au concept : on entend bien par « crise économique » le processus de « destruction créatrice » propre à la naissance d'un nouveau monde économique entraînant la mort du précédent.

Lorsque l'ancien monde a été éliminé, par exemple celui des chasseurs-cueilleurs d'avant la Révolution néolithique, le niveau collectif qui s'est construit de manière compréhensible pendant la période de crise, permet le bon déroulement d'une nouvelle période de prospérité. Dans notre exemple, le couple « individuel/collectif » néolithique peut donner sa pleine mesure. Et la durée de stabilité de cette forme économique s'est étendue sur plusieurs milliers d'années.

Poursuivant dans le cadre proposé, on sait que du fait de la loi de recherche de gains de productivité, il arrive toujours un moment où le fonctionnement d'un monde prospère atteint ses limites de productivité. Dans le contexte néolithique, de nouveaux jaillissements « individuels » apportant de nouveaux gains de productivité sont nécessaires pour que le progrès technique se poursuive. Une nouvelle période de crise

économique occasionnée par exemple par l'émergence d'un système d'irrigation s'est profilée, accompagnée d'une nouvelle structuration continue « individuel/collectif ».

D'autres exemples d'élaboration d'une architecture « individuel/collectif » construite en continuum, aux moments de crise de l'évolution économique, peuvent être fournis. Effectuons un bond à travers les âges pour parvenir au XX^e siècle. On sait que les éléments « individuels » constitutifs de la grande croissance industrielle des années 1945-1970, symbolisée elle-même par la chaîne de montage humaine, se sont installés dans la crise des années 1920-1945. Ce sont les « jaillissements individuels » de quelques grandes entreprises, surtout américaines, accompagnés de débuts de manifestations « collectives » d'interventionnisme étatique de l'administration Roosevelt, qui ont caractérisé cette phase. L'idée d'une architecture progressive de l'« individuel » vers le « collectif » en période de crise économique, est illustrée ici. Puis, une phase de stabilité « individuel/collectif » s'est étendue de 1945 à 1970, permettant la plus forte croissance économique observée jusqu'alors. L'État keynésien a représenté la forme « collective » de cette période. Enfin, des limites de productivité sont apparues vers 1970.

Au total, on doit concevoir une structuration « individuel/collectif » aboutie comme le prolongement architectural cohérent d'actions partielles, et non comme leur somme, ou encore comme un parachutage distinct venu ultérieurement « réguler » la somme des pratiques individuelles. Ajoutons que ce processus est pour nous, propre aux phases de crise économique.

► Esquisse d'un modèle d'architecture « individuel/collectif » dans l'évolution économique

On peut ainsi esquisser un modèle d'architecture « individuel/collectif » qui se déroule en trois étapes et caractérise un moment de l'évolution économique. On assiste d'abord à l'apparition d'un nouveau monde économique dans une période de crise. On constate que des unités économiques « individuelles » se structurent de manière continue, sans discontinuités temporelles ni spatiales, aboutissant à un tout collectif. Le jaillissement de formes individuelles peu organisées collectivement au départ, contribue à détruire l'ensemble « individuel/collectif » précédent.

Puis, la crise terminée, ce monde économique fonctionne en engendrant de la prospérité, car une nouvelle architecture « individuel/collective » s'est mise en place et fonctionne de manière stable, jusqu'à ce que des limites de productivité soient atteintes. Une nouvelle crise

économique se produit alors, caractérisée par l'apparition de nouvelles formes économiques. De nouveaux jaillissements « individuels » se manifestent, détruisant l'ancienne combinaison « individuel/collectif », et contribuant à construire une nouvelle organisation collective.

Cas de plusieurs échelles spatiales engendrées par un accroissement de complexité

La tendance à la complexité croissante se manifeste aussi dans les cas d'ensembles économiques à plusieurs échelles

Lorsque l'évolution économique engendre le passage d'un ensemble économique à une seule échelle à un autre ensemble à plusieurs échelles, la définition de la complexité croissante s'applique *a fortiori*. Car on constate que dans ces cas, on assiste à un accroissement encore plus net du nombre des formes organisées ainsi qu'à un accroissement des liens entre ces formes d'organisations.

► Exemples d'ensembles économiques à plusieurs échelles

C'est dans l'Antiquité qu'on rencontre les premières formes d'ensembles économiques à plusieurs échelles. On a abordé plus haut le cas des premières civilisations autour de fleuves, à propos d'une application possible du concept d'auto-organisation. En Égypte ancienne, on peut discerner schématiquement deux échelles d'activité économique : celle du *village*, élément de base de l'ensemble économique, et celle du *pouvoir de l'administration de l'Empire*, avec à sa tête le Pharaon. La situation de complexité croissante est vérifiée, puisque le nombre des éléments économiques du nouvel ensemble s'est accru par rapport au précédent, et que le nombre des liens entre ces degrés d'organisations s'est également accru. Et la nouvelle configuration se manifeste sur deux échelles.

De même, un peu plus tard, au sein des Empires grec ou romain, on peut constater la présence de deux ou trois échelles, celle des villages, celle des provinces, et celle du centre de l'Empire.

Si l'on refait un bond jusqu'au XX^e siècle et que l'on examine le cas de la construction européenne, on constate que cette dynamique installe également deux nouvelles échelles économiques, celle de l'Europe et celle des différents États-nations qui la constituent.

**• Architecture « individuel/collectif »
sur plusieurs échelles dans l'évolution économique**

Ni dépérissement, ni renforcement des anciennes échelles. Complétons maintenant notre problématique en termes d'architecture « individuel/collectif » en l'appliquant à l'apparition de plusieurs échelles (fig. 3,1 & 3,2). Nous concluons après examen d'exemples historiques, que dans ces dynamiques particulières, on assiste ni à un dépérissement, ni à un renforcement des échelles existant auparavant.

– Architectures « individuel/collectif » à plusieurs échelles

Réexaminons un des premiers cas de construction « individuel/collectif » à deux échelles. Par exemple, les villages néolithiques situés sur les rives du Nil, lorsqu'ils étaient autonomes, présentaient un degré de productivité agricole correspondant à l'étape néolithique. Puis il est apparu qu'avec des procédés de retenue d'eau permettant un début d'irrigation, la productivité s'est améliorée. À l'origine, ces innovations ont été développées à une échelle locale, résultat d'une coopération installée entre quelques villages. La composante « individuelle » du village néolithique s'est adjoint un début de composante « collective », mais encore peu développée. Puis, cette dynamique « collective » de retenue du Nil, avec construction de barrages de plus en plus importants, s'est étendue sur une échelle provinciale d'abord, puis de royaumes intermédiaires, jusqu'à l'unification de l'Empire par un pouvoir central pharaonique unique. On a bien assisté à une construction architecturale « individuel/collectif » continue, sans dichotomie, sans « no-bridge », compréhensible, accomplie par de petits groupes de villages néolithiques, puis de provinces, jusqu'à ce que se fédère un « collectif » impérial. On n'a certainement pas constaté d'apparition *a posteriori* d'un pouvoir central « collectif » venu d'en haut imposer un système global d'irrigation du Nil à l'ensemble des villages néolithiques « individuels ». Et, lorsque l'organisation « individuel/collectif » a été réalisée, un nouvel ensemble économique « collectif », impérial et néolithique, a fonctionné sur deux échelles.

– L'« individuel » d'une échelle peut être constitué du « collectif » de l'échelle inférieure

On peut remarquer que dans ce processus, le « collectif » du village, c'est-à-dire l'ensemble des paysans, est devenu l'« individuel », l'unité de base de l'ensemble « collectif » de l'empire. Notons que la combinaison des deux échelles a permis d'obtenir d'énormes gains de productivité,

transformant pour une très longue durée l'Égypte ancienne en grenier à blé de la Méditerranée.

De même, au XX^e siècle, la structuration « individuel/collectif » des États-nations vers la construction européenne s'est effectuée lentement, du début de la CECA, jusqu'à une Europe à quinze, en passant par le Marché commun, le *serpent monétaire*, etc., pour aboutir à un nouvel ensemble à deux échelles à la fin du XX^e siècle. Le processus s'est poursuivi au XXI^e siècle et a eu pour résultat une Europe à vingt-sept nations. Cette fois, ce sont les « États-nations », « collectifs » constitués par les unités économiques de l'État-nation, qui sont devenus « individuels » dans la construction « individuel/collectif » de l'Europe. Et il est incontestable que la construction européenne, effectuée sur les deux échelles, nationale et continentale, a permis au moins pendant un certain nombre d'années, un essor économique de l'ensemble européen¹.

– Ni dépérissement, ni renforcement des échelles inférieures, mais modification de leurs fonctions

Dans le cas de l'Égypte ancienne, il est important de noter que l'apparition de l'échelle impériale n'a conduit ni au dépérissement de l'échelle du village néolithique, ni à son renforcement. Le fonctionnement à deux échelles a seulement engendré une transformation de l'échelle néolithique, lui ôtant des caractéristiques acquises par l'échelle impériale, comme par exemple la gestion de l'irrigation, mais lui en conférant d'autres comme par exemple celles de la gestion d'une productivité agricole devenue bien supérieure à l'état antérieur. Ainsi, dans cette nouvelle construction, chaque échelle doit jouer son rôle, sous peine de remettre en question la cohérence du fonctionnement de l'ensemble.

On peut constater une situation identique dans les cas de la Grèce antique et de l'empire romain, en cohérence avec les échelles occupées par les provinces sous leur domination.

Quant à l'exemple européen, on sait que si à la fin du XX^e siècle, dans la zone Euro, l'échelle de l'État-nation a pu être déchargée de la fonction d'émission monétaire au profit de l'échelle supérieure, d'autres tâches pouvant laisser supposer un apparent renforcement sont apparues. On peut conclure dans ce cas encore, ni au dépérissement, ni au renforcement des échelles existant antérieurement, mais à une modification permettant à l'ensemble de fonctionner dans une grande cohérence.

1. Grou P., Guillon R., Mertens-Santa-Maria D. & Messamah K. 2008. *Vers une très grande Europe. Op. cit.*

D'une manière générale, le statut de l'État-nation dans la mondialisation doit être pensé dans le cadre de l'accroissement de complexité qui a engendré quatre échelles, et le débat entre dépérissement ou renforcement des structures de l'espace national peut sembler futile puisque l'on sait que la réponse est : ni l'un ni l'autre, mais qu'on a seulement assisté à une transformation de son rôle.

On peut aussi donner l'exemple de la structure du capital des firmes multinationales pendant les années 1980. La hiérarchie mondiale s'exprimant alors dans la composition du capital des firmes, les firmes « individuelles » de haut de hiérarchie, incluaient peu de « collectif » c'est-à-dire de capital public, alors que des firmes « individuelles » appartenant à des pays moins bien situés dans la hiérarchie mondiale incluaient beaucoup de « collectif », c'est-à-dire de capital public. Ainsi, dans cet exemple, il apparaît bien qu'au niveau mondial, l'« individuel » est issu du « collectif » d'un niveau inférieur, le niveau national dans cet exemple.

Nature du lieu dit « marché » ?

On a rappelé au début du chapitre que la notion de marché et celle de son bon fonctionnement sont constamment mises en avant par la théorie néolibérale — ou néo-classique — pour justifier une absence d'intervention publique dans le secteur de l'économie. Rappelons sa définition. Qu'est-ce qu'un « marché » ? La définition d'un « marché » découle de celle d'une « marchandise » : il s'agit d'un produit fabriqué par un producteur « autonome » ayant pour but l'échange avec un autre produit, fabriqué par un autre producteur autonome. La loi d'échange dépend alors du temps de travail contenu dans chacun des deux produits.

Il convient de noter que la nature « autonome » de ce type d'échange résulte d'une situation sociale. C'est la société qui autorise le degré d'autonomie que l'échange illustre. Si l'on examine l'évolution historique, on constate que c'est au sein de sociétés non marchandes — celles de l'Égypte Ancienne, ou de la Grèce antique — que des sphères marchandes sont apparues. Puis, le degré de décentralisation atteint par les sociétés a permis une extension beaucoup plus importante de la sphère marchande. Mais néanmoins, un grand nombre d'actes économiques, qui relèvent de l'organisation de la société, donc du domaine « collectif », sont demeurés non marchands, par exemple l'éducation – pas partout –, la culture – pas partout –, la recherche, la défense, l'ordre public, etc.

La grande efficacité de la production marchande qu'il faut bien sûr souligner, réside d'abord dans son caractère autonome, donc permettant une grande « liberté » de décision, d'action, etc., et ensuite dans sa motivation, celle de la rémunération individuelle appelée *profit*.

De ces caractéristiques, il faut ainsi retenir que le « marché » appartient à un espace autonome autorisé par les sociétés, un domaine de nature « individuelle », qui n'est absolument pas concerné par le domaine « collectif » de ces sociétés. Or, rappelons *qu'une société se définit par la combinaison des niveaux « individuel » et d'un niveau « collectif »*.

Et si une intervention publique est refusée, cela signifie tout simplement que les tenants de cette pensée refusent à l'échelle « collectif » d'intervenir dans un espace par nature d'échelle « individuel ». On aboutit au paradoxe que ce sont des acteurs d'une échelle « individuel » qui étendent leur « autonomie » à l'ensemble de la société, donc que l'échelle « collectif » est dominée par une échelle « individuel ».

Que proposer en poursuivant notre raisonnement ?

L'alternative se situe-t-elle entre un tout « collectif » ou le « marché » ? On entend ici « tout collectif » au sens du « collectivisme » des pays en retard d'industrialisation comme l'URSS ou la Chine, qui n'avaient pas un choix autre que celui d'une planification rigide pour construire leur industrie ? Sûrement pas, parce qu'une décentralisation des actions économiques est nécessaire lorsqu'un niveau de développement est atteint.

Alors, « réguler le marché » comme on l'entend dire parfois ? Comment peut-on imaginer qu'il faille « réguler » des échelles « individuel » qui se sont organisées en une échelle « collectif » pour construire une autre échelle « collectif »

Il convient plutôt d'organiser une échelle « collectif » où les échelles « individuel » retrouvent leur place « individuel ».

Un type d'organisation qui peut illustrer ce cas de figure a existé en France, des années 1945 aux années 1980. Il s'agissait d'une combinaison entre une planification dite « souple », où un niveau « collectif » proposait des objectifs à l'aide d'un « Plan » indicatif, élaboré par un commissariat au Plan, objectifs proposés aux échelles « individuel » — les entreprises — accompagnées par toute une série de mesures incitatives.

On peut ne pas être satisfait de la combinaison « individuel/collectif » réalisée pendant cette période, mais le rappel de ce cas permet d'illustrer un type de relations « individuel/collectif » où chaque échelle est à sa place.

Ce n'est plus le cas depuis l'émergence de la mondialisation économique, où les échelles « individuel », représentées par les firmes

multinationales, fonctionnent dans leur propre intérêt, sans qu'existe une échelle « collectif », construite en fonction des intérêts « collectif » du monde.

**Réalité économique à une échelle donnée :
des « marchés » ou une multiplicité
de fractionnements économiques ?**

On doit à Benoît Mandelbrot la prise de conscience qu'une grande partie de la réalité est constituée de données « *fractales* ». La théorie de la relativité d'échelle est bâtie sur cette conception de la réalité, mais dans un cadre relativiste où les différentes échelles n'ont aucune existence absolue, et ne sont définies que par leurs rapports deux à deux. On constate également en sciences sociales, et en particulier en sciences économiques que la réalité est beaucoup plus proche de celle d'un ensemble d'éléments fractionnés, dans une réalité organisée en fractionnement, que de l'uniformité unifiée par le concept creux de « marché ».

Ainsi on constate que les « marchés » des matières premières, les « marchés » des devises, les « marchés » des titres financiers, n'ont en commun entre eux que d'être baptisés « marchés » par la classe sociale dominante pour la raison simple que cette classe a intérêt à ce que l'argent circule sans entraves entre ces différents lieux.

Le choc financier de 2007-2009 est une parfaite illustration de l'analyse appauvrissante de la réalité effectuée en termes de « marchés ». Une multiplicité d'éléments appartenant à différents secteurs, illustrant le fractionnement de la réalité, et qui par conséquent n'avaient rien à voir entre eux — crédit bancaire, immobilier, matières premières, énergie — ont été réunis sous le vocable de « marchés » dans le but de pratiquer une spéculation générale. Le résultat a été, dès 2007, un effondrement aussi général et un chaos économique dont le monde entier a fait les frais.

**Application du modèle architectural
« individuel/collectif » à l'émergence de la mondialisation**

En reprenant l'exemple de l'émergence de la mondialisation économique, on constate un lent processus de construction continue de l'« individuel » vers ce qui aurait dû — et doit — devenir un « collectif » mondial.

► L'émergence de la mondialisation économique

La Grande Croissance des années 1945-1970 a atteint ses limites de productivité, à la fin des années 1960, à un tournant situé vers 1970. En même temps, l'État keynésien, organe « collectif » de la période, a commencé à voir son efficacité remise en question.

D'après notre schéma en discontinuités de l'évolution économique, il doit s'ensuivre une phase de crise économique, permettant au nouveau monde qui apporte une révolution technologique, de détruire le précédent. C'est ce qui s'est passé pendant la crise des années 1970-1980. À ce moment, sont apparues de nouvelles technologies, comme celles de l'électronique, des nouveaux matériaux, de nouvelles énergies, etc., commandant de nouvelles entreprises « individuelles » à dimensions plus vastes, parce que les coûts de ces techniques étaient plus élevés qu'auparavant. La taille du capital s'accroissant, celle des débouchés est devenue nécessairement plus large et le phénomène de multinationnalisation des firmes a pris son essor. *De là date le début de la mondialisation économique de la fin du XX^e siècle.*

• Un lent processus de construction de l'« individuel » vers un « collectif » mondial

Pour reprendre notre schéma de structuration « individuel/collectif », ce sont les firmes multinationales qui ont représenté les jaillissements « individuel », à partir desquels le processus « individuel/collectif » de la mondialisation devait se constituer.

Mais le niveau mondial au début du XXI^e siècle se caractérise par un énorme manque d'organisation « collective » et les acteurs privés demeurent tout puissants. L'expression « *les maîtres du monde* » a été employée à propos des dirigeants des grands groupes industriels et bancaires du monde industrialisé. Elle reflète le poids sans précédent acquis par la production des grandes firmes dans l'économie mondiale. Les décisions prises par ces acteurs sont peu contrôlées, et ne prennent pas en compte les besoins des peuples des pays dans lesquels les firmes sont implantées. Le motif unique de leurs actions est le profit. La motivation est normale pour des chefs d'entreprises, mais ce qui l'est moins est l'absence de mondialisation des contre-pouvoirs face à ces entreprises.

Il convient de noter néanmoins qu'un lent processus de construction continue de l'« individuel » vers un « collectif » mondial a commencé à se mettre en place. L'exemple de la création d'agences spécialisées de l'ONU peut être donné. Mais ces créations sont censées illustrer une

étape de mi-parcours de cette structuration collective qui aurait dû être atteinte au début du XXI^e siècle.

Mais d'une part, en cas de conflits entre agences, aucune instance d'arbitrage n'existe, et d'autre part, l'entreprise de structuration collective mondiale doit se poursuivre vers un stade plus abouti : par exemple, un Conseil de sécurité économique de l'ONU, trouvant sa légitimité dans le contrôle d'un Parlement élu au suffrage universel apparaîtrait comme un aboutissement naturel du processus « individuel/collectif » mondial.

Pour le moment, quelle est la cause du blocage de la poursuite de la construction du « collectif » mondial ?

Elle trouve son origine au niveau des États-nations et se manifeste nettement depuis les années 1990. Elle se situe plus particulièrement aux États-Unis d'Amérique, mais d'une manière générale chez tous les acteurs « individuel » mondiaux qui ne veulent pas céder une parcelle du pouvoir qu'ils détiennent depuis les années 1970.

• Existence de quatre échelles dans la mondialisation économique

On constate depuis le tournant de la mondialisation, qu'au couple mondial/national s'est ajouté à un couple continental/local, présent de manière inégale dans le paysage antérieur.

• Existences à des degrés divers de deux échelles : continentale et locale/régionale

Depuis le milieu du XX^e siècle, deux catégories d'échelles étaient présentes de manière inégale dans le paysage économique, les deux échelles, continentale et locale/régionale.

D'abord *l'échelle continentale*, illustrée en Europe par la construction européenne, s'est mise en place avant la naissance de la mondialisation économique des années 1970. On se souvient que les premières formes « collectives », celles de la *Communauté européenne du charbon et de l'acier* (CECA), datent de l'après seconde guerre mondiale. Cette échelle s'est renforcée sans cesse depuis. Par contre, en Amérique du Nord, les institutions de l'ALENA se sont mises en place après le début de la mondialisation. Également, en Asie, en Amérique du Sud et en Afrique, on a assisté à la naissance de premières formes collectives continentales.

Ensuite, *l'échelle régionale/locale* qui existait également antérieurement à la mondialisation, peut apparaître en Europe ou ailleurs comme un prolongement des anciennes régions pré-industrielles comme dans le cas des Lander allemands, des régions italiennes et espagnoles. Mais, il

faut souligner que le poids de cette « échelle s'est accru depuis le début de la mondialisation. Le cas français, État-nation très centralisé jusqu'à la fin du XX^e siècle, en voie de décentralisation depuis, illustre le fait que l'émergence d'espaces économiques régionaux est une nécessité dans le nouveau contexte.

• Le mondial et le national

On a vu comment un mouvement de jaillissement « individuel » de firmes et banques multinationales décelé à un tournant situé vers 1970, a commencé à installer une échelle mondiale autonome. Ce processus, en remettant en question le rôle de référence quasi-unique de l'État-nation depuis la révolution industrielle, est à l'origine de la double question posée ici : assiste-t-on, suite à la montée en puissance d'une échelle mondiale, à un début de dépérissement de l'instance nationale ? Ou bien, pour faire face à une nouvelle situation, perçue comme dommageable, sommes-nous témoins d'un renforcement des États-nations ?

Pour répondre à cette double question, il nous faut nous demander à quelle rationalité répond l'existence de quatre échelles dans la mondialisation économique ?

• Efficacité de la démultiplication en quatre catégories d'espaces — ou d'échelles — économiques : ni dépérissement, ni renforcement de l'État-nation dans la mondialisation économique

Nous soulignerons maintenant que la démultiplication en quatre catégories d'espaces économiques permet une plus grande efficacité économique. Celle-ci a besoin des quatre échelles pour fonctionner, ce qui signifie qu'aucun d'entre eux ne doit dépérir ou être renforcé au détriment des autres.

• Démultiplication en quatre catégories d'espaces — ou d'échelles — économiques, plus grande efficacité économique

On a ainsi assisté après 1970 à la naissance d'un nouveau paysage où s'est effectuée une multiplication par quatre des niveaux économiques : au national, s'est ajouté le mondial, mais également le continental — illustré par l'exemple de l'Union Européenne — et enfin le local/régional, représenté par exemple par les régions européennes.

Mais on ne constate pas de remplacement de niveaux existants comme celui de l'État-nation par d'autres comme celui du niveau mondial. Par contre, le niveau national — en partie transformé — s'est maintenu,

malgré le développement de deux autres catégories, celle du continental et celle du local/régional.

Pour saisir la rationalité du processus il faut se souvenir qu'en s'accroissant, la complexité économique permet d'obtenir une hausse de gains de productivité. Elle permet de faire fonctionner la totalité d'un ensemble de manière plus efficace.

Dans le cas de la mondialisation économique, les quatre nouveaux niveaux ont permis de générer une qualité meilleure de production que celle qui avait cours sur un seul type d'espace, le national. La mondialisation est d'ailleurs le résultat d'une révolution technologique qui a commandé un espace économique plus vaste que celui de l'ancien État-nation.

**• Une contrainte de cohérence des niveaux :
ni dépérissement, ni renforcement de l'État-nation**

Si l'on a pu constater que le développement de l'espace mondial a remis en question le rôle de référence quasi-unique de l'État-nation depuis la révolution industrielle, on peut affirmer que la fonction de l'espace national n'a pas pour autant disparu. De plus, les deux autres types d'espaces qui ont pris place dans l'installation d'une nouvelle hiérarchie — espaces de type continental et local/régional — contribuent à l'édification de l'ensemble. Pour nous, depuis 1970, *la multiplication par un facteur quatre des niveaux spatiaux est l'expression de la tendance à la complexité croissante dans l'évolution économique*. On l'a dit, en s'accroissant, la complexité permet de faire fonctionner la totalité d'un ensemble économique de manière à gagner de la productivité.

Ce résultat, observable au XXI^e siècle, se situe dans le prolongement de la *parabole des épingles* énoncée par Adam Smith au XVIII^e siècle dans son ouvrage sur les causes de la richesse des nations. Il montrait que plusieurs personnes fabriquant chacune une épingle devait être remplacée par une division du travail où chaque personne accomplissait une étape précise de la fabrication des épingles. Une organisation qui divise le travail est plus complexe que la simple répétition d'un travail identique. L'auteur y voyait la source des gains de productivité. Les révolutions technologiques sont à l'origine de formes de division du travail de plus en plus démultipliées, qui accroissent la productivité des ensembles économiques. Ainsi, une augmentation du nombre d'échelles, et un accroissement du nombre des liens entre échelles, dans un tout articulé de manière organisée, permet une plus grande efficacité.

Dans cette perspective, la cohérence de l'ensemble a pour corollaire que chaque échelle économique possède sa propre spécificité et remplit

sa propre fonction. Remarquons que la puissance de l'ensemble à quatre échelles résulte de l'articulation de quatre processus de structuration « individuel/collectif » où à chaque échelle, le « collectif » de l'une joue le rôle « individuel » de l'échelle supérieure, ce qui est précisément une manifestation de la relativité des échelles : local/régional, « collectif » de la région, jouant le rôle d'individuel du national, national, « collectif » du régional, jouant le rôle « individuel » du continental et continental, « collectif » du national, pouvant jouer un rôle « individuel » dans le « collectif mondial ».

Ainsi, les quatre nouvelles échelles de l'ensemble économique mondial, si elles sont bien articulées entre elles, génèrent un type de production où les gains de productivité sont plus élevés que ceux qui étaient réalisés sur un seul type d'espace, le national : il s'agit de tous les produits issus de la Révolution technologique mondialisante, qui illustrent en fin de XX^e et en début de XX^e siècle la recherche de gains de productivité par les sociétés humaines.

Dans ce degré plus élevé d'organisation mondiale, les États-nations sont toujours présents, mais transformés. Certaines fonctions ont été perdues — par exemple la fonction monétaire en Europe — mais d'autres se sont affermies ou devraient l'être, comme par exemple celle d'une réponse à un impératif technologique de plus en plus incontournable.

La méthodologie en terme de complexité croissante nous avait préparés à ce type de situation lorsqu'on avait examiné des cas à plusieurs échelles — comme celui de l'Empire égyptien défini par un niveau néolithique et un niveau impérial. Nous avons conclu que l'apparition du niveau impérial n'avait conduit ni au dépérissement du niveau néolithique, ni à son renforcement.

Si l'on se replace dans le débat du tournant du XXI^e siècle portant sur le dépérissement ou l'accentuation du rôle de l'État-nation, on répondra catégoriquement *qu'on n'assistera pas à un remplacement progressif de celui-ci par le niveau mondial*. De même, on ne constatera pas un renforcement significatif de cette instance. Pour nous, le rôle de l'espace national s'est maintenu, accompagné de quelques modifications.

Et ce maintien s'est effectué dans le contexte de l'apparition de deux autres catégories d'espaces, celle du continental et celle du local/régional.

**• Application de l'analyse log-périodique
aux quatre échelles mondiales, en termes démographiques**

Une étude de taille critique démographique des régions des pays industrialisés aboutit à une taille critique située — vers 2010 — entre 4 et 6 millions d'habitants¹.

Une autre étude portant sur une estimation de taille critique continentale vers 2050 aboutit au chiffre d'1 milliard d'habitants. Comme entre 2000 et 2010, la population mondiale se situe vers six milliards d'habitants, ne peut-on pas estimer, vers 2010 un espace d'échelles, où la région-type serait à 6 millions d'habitants, le pays-type à 60 millions, le continent à 600 millions, sachant que le monde se trouve à 6 milliards ? Apparaîtrait ainsi un espace d'échelles dont la nature prendrait la forme 6-60-600-6000.

**► Un cas particulier : un État-nation en décalage
avec l'espace mondial**

Nous rappellerons le problème posé par la distorsion créée par les États-Unis lors de déclenchement d'actions nationales unilatérales, dans un contexte de mondialisation, où les formes de domination — si il y en a, ne peuvent plus être réalisées par un État-nation, même d'une taille presque continentale.

Une leçon que l'on tire est que chaque échelle de l'ensemble organisé doit garder sa place pour maintenir la cohérence et l'efficacité de l'ensemble. Si l'une des échelles n'obéit pas à cette règle, la cohérence de l'ensemble peut être remise en question. La meilleure illustration de notre propos est le blocage préoccupant au début des années 2000 de la poursuite de la construction « collective » mondiale. Il se manifeste depuis les années 1990 par le « renforcement » inapproprié d'un niveau national, celui des États-Unis d'Amérique.

► Échelles « individuel/collectif » et démocratie

Si le thème de la démocratie est présent dans l'histoire des sociétés depuis l'Antiquité gréco-romaine, c'est parce qu'il semble que ce régime politique est celui qui permet la meilleure combinaison « individuel/collectif » dans le fonctionnement d'une société. Pourquoi ? Parce que la nature de la combinaison entre échelles de type « individuel » et échelle de type « collectif » semble la meilleure si elle obéit à un principe précis.

1. Grou, P. 2007. *Pour un redécoupage des régions françaises. Mondialisation économique et taille des régions*. L'Harmattan. Paris.

• Une combinaison « individuel/collectif » la plus pertinente

Pour aboutir à la nature de la combinaison « individuel/collectif » la meilleure, il s'agira de rassembler ce qu'il y a de plus profondément commun aux échelles « individuel » pour réussir à établir une échelle « collectif » la plus efficace. L'énoncé que l'on propose ici est donc : « *un rassemblement de ce qu'il y a de plus profondément commun à une échelle de type "individuel", en vue de l'établissement d'une échelle de type "collectif"* ». Il exprime vraisemblablement une loi générale de passage, d'une échelle de type « individuel » à une échelle de type « collectif ». En effet, qu'il s'agisse de passages à des degrés de complexité plus élevés lors de l'évolution du vivant ou des sociétés, ou encore de la pensée humaine, lorsque l'on recherche ce qu'il y a de profond et commun dans deux théories apparemment incompatibles pour trouver une nouvelle théorie qui dépassera les deux précédentes, cette loi semble posséder une très vaste portée. On peut vérifier son efficacité lors du fonctionnement d'un groupe d'humains, d'un couple, etc. Elle permet de comprendre également l'avantage du fonctionnement d'une vraie démocratie pour le bon fonctionnement d'une société.

• Un blocage de la démocratie dans les pays industrialisés en début de XXI^e siècle ?

Ce constat est effectué par plusieurs études¹. Car, peut-on dire que le fonctionnement de la démocratie dans les pays industrialisés a toujours obéi à la règle énoncée plus haut ? Par exemple, dans le cas du XX^e siècle, peut-on dire qu'aux États-Unis, ou en France, les dirigeants politiques élus dans ces deux démocraties, ont été réellement l'émanation d'un rassemblement de volontés les plus profondément communes provenant des échelles de type « individuel » de ces deux peuples, en vue de l'établissement d'une échelle de type « collectif », qui aura été l'expression politique d'une volonté de type « collectif » de chacun de ces deux peuples ? Il est délicat de fournir une réponse à cette question et nous n'en fournirons pas ici.

En revanche, en début de XXI^e siècle, on peut constater que les peuples des pays industrialisés sont de plus en plus soumis à un contexte obscurantiste, éducatif, culturel, médiatique, de démagogie politique², etc. — et le problème d'un bon fonctionnement de la démocratie se pose de plus en plus nettement. Connaissant le degré d'aliénation des individus constituant ces deux peuples — si l'on reprend les exemples

1. Cf. par exemple Guy Hermet. 2007. *L'Hiver de la Démocratie*. Armand Colin. Paris.

2. Grou, P. (à paraître). *L'Obscurantisme du XXI^e siècle. La toute-puissance de l'argent*.

des États-Unis et de la France — il apparaît en effet qu'ils ne peuvent plus exprimer un rassemblement de ce qu'il y a de plus profondément commun à leur échelle « individuel » et que l'établissement d'une échelle « collectif » ne peut qu'aboutir à un résultat dévoyé.

Une réflexion effectuée dans les termes qu'on vient de proposer s'impose donc de manière urgente. Elle permettra d'en tirer les leçons, en vue d'actions ouvrant la voie à l'établissement d'une démocratie plus satisfaisante.

Les schémas ci-dessus (fig. 3.1. & 3.2) tentent de dresser un tableau des modes de fonctionnement possibles de la démocratie dans le monde. Deux chemins sont mentionnés, un chemin direct et chemin indirect. Le chemin direct est celui où les individus mandatent directement leurs représentants vers les quatre échelles des « collectif » existant. C'est bien sûr celui où la pratique démocratique devrait être la plus efficace. Dans le cas français, il existe trois chemins : ceux des élections régionales, nationales, et européennes.

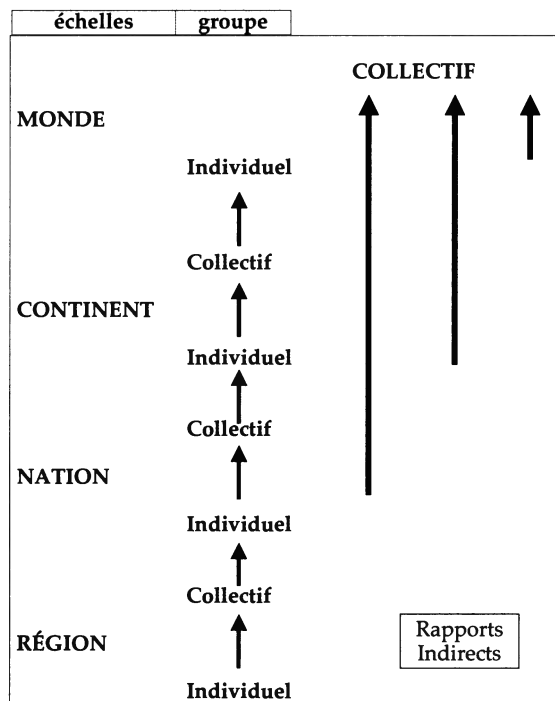


Figure 3.1. Échelles politiques et démocratie dans le monde. Rapports indirects.

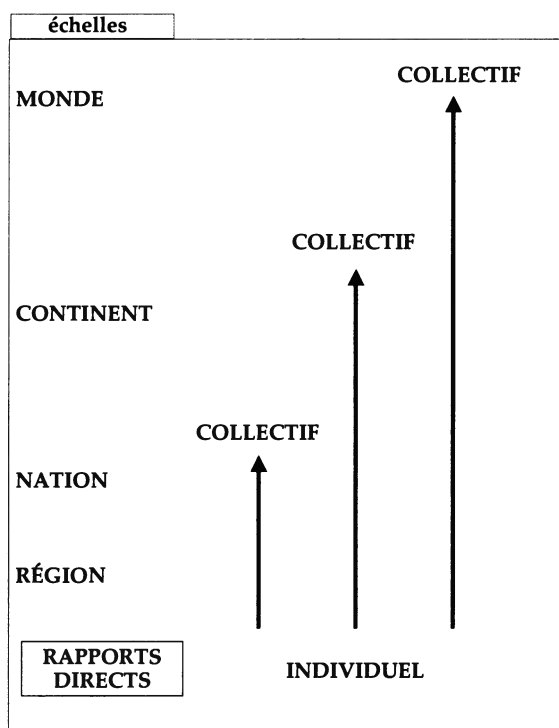


Figure 3.2. Échelles politiques et démocratie dans le monde. Rapports directs.

Le chemin indirect est celui où des représentants d'un « collectif », situés à une échelle, sont envoyés à une autre échelle comme représentants « individuels ». Ainsi, lorsque des représentants de l'État français — instance « collective » nationale — sont envoyés à l'Organisation des Nations unies, pour jouer leur rôle « individuel » à cette échelle « collective » mondiale. Le schéma illustre les lacunes de ce qui pourrait être une démocratie mondiale, puisqu'aucun chemin direct n'existe entre les individus qui peuplent la planète et l'échelle « collective » mondiale.

Schémas identiques dans les domaines physique et biologique ?

L'étude de la dynamique « individuel/collectif » à plusieurs échelles suggère de nouvelles analogies avec les phénomènes physiques et biologiques.

► Analogie avec les échelles physiques

La première analogie concerne les échelles physiques où l'échelle « individuel » correspond à une géodésique et le « collectif » à un ensemble de géodésiques. En passant à une échelle supérieure et en prenant une distance sur l'ensemble des géodésiques précédentes, on observe à nouveau *UNE SEULE géodésique, vue à une résolution différente*.

► Analogie avec les échelles du vivant

De même on peut proposer une autre analogie avec les échelles du vivant (cellule, tissu, organe). Il convient en effet de remarquer qu'en observant une nouvelle fois la dynamique évolutive des espèces vivantes, on aboutit à un type d'analogies identiques (fig. 3.3). Un examen rapide de la dynamique « individuel/collectif » de l'évolution du vivant montre que par exemple la constitution d'une cellule s'est également effectuée de manière compréhensible. On n'a pas décelé de dichotomie préexistante entre les éléments « individuel » constitutifs de la cellule et le « collectif » de la cellule une fois celle-ci constituée. On peut imaginer un processus global — une dynamique architecturale logique — qui a abouti à la constitution d'une cellule. De même, lors du bond de complexité croissante réalisé par des organismes unicellulaires vers les organismes multicellulaires, on a assisté à un résultat analogue à celui observé lors du bond de complexité du passage de l'État-nation à la mondialisation. L'apparition des organismes multicellulaires n'a abouti ni à un dépérissement, ni à un renforcement de la morphologie des cellules anciennement autonomes face à l'organisme dont elles ont fait depuis partie.

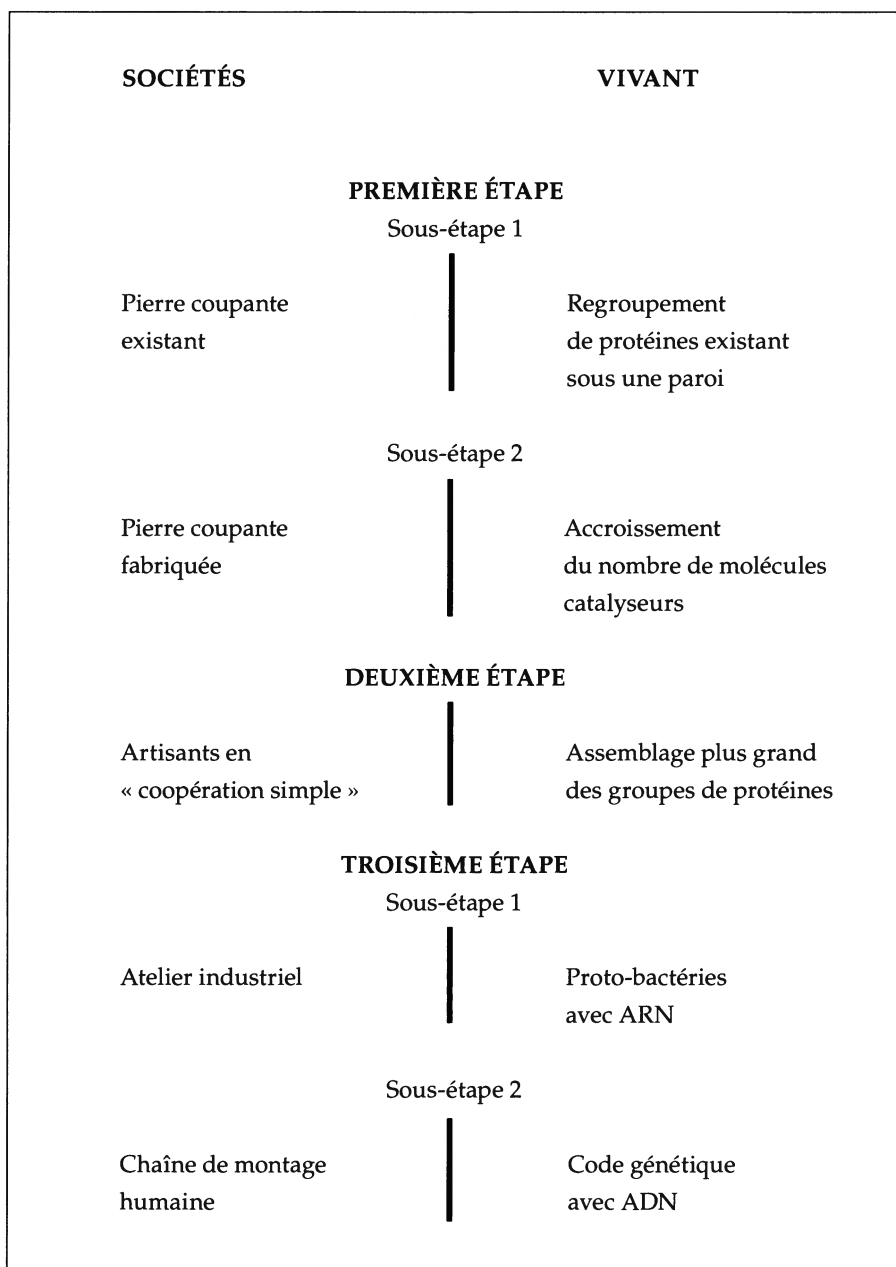


Fig. 3.3. Schémas parallèles des étapes de l'évolution du vivant et des sociétés.

Mondialisation et espace de temps critique

L'élargissement de l'espace économique dans la mondialisation, aboutit à l'espace du temps critique du XXI^e siècle. Il s'agit d'un cadre optimum de la coopération humaine à la fin d'une première grande étape de l'histoire humaine. Il semble qu'une montée de ce que Marx appelait la « coopération » depuis la révolution industrielle et l'extension de la sphère marchande ait été atteinte. Il s'agirait du degré le plus élevé atteint lors de la mondialisation économique et au moment du temps critique. Pour imaginer un mode de dépassement de ce type d'espace, il convient d'imaginer — comme on l'a dit plus haut — un nouveau niveau de complexité, caractérisé par un plus grand nombre d'échelles.

► Hiérarchies et pôles de domination : quelles échelles en cause ?

Nous rappellerons tout d'abord l'existence du phénomène de hiérarchie économique. Nous diviserons ensuite l'histoire humaine en trois grandes périodes d'installations de hiérarchies économiques. Puis, nous décrirons les deux formes prises par la domination américaine entre 1920 et le début du XXI^e siècle. Enfin, nous reviendrons sur le phénomène de dévoiement de la dynamique adaptative des sociétés humaines par des groupes sociaux dominants, lorsqu'ils s'approprient la plus grosse part de la production mondiale.

● Hiérarchies et pôles de domination : quelles échelles en cause ?

Existence d'un phénomène de hiérarchie économique

Pourquoi existe-t-il de tout temps des hiérarchies et pôles de domination ? On avait énoncé dans l'ouvrage précédent que les gains de productivité étaient plus élevés — ou la vitesse de transformation de la nature plus rapide — dans les lieux dominants de la hiérarchie mondiale, car ceux-ci bénéficiaient d'atouts qui n'existent pas ailleurs. Il apparaissait que l'inégalité était une donnée fondamentale de l'évolution des sociétés. On avait rappelé comment, de la Préhistoire aux Multinationales, on avait assisté à une succession de déplacement, chronologique et géographique, de pôles de domination. Car la recherche de gains de productivité par les sociétés humaines ne s'est jamais effectuée de manière uniforme. Comme lors de l'évolution des espèces vivantes, on a toujours constaté l'apparition localisée de foyers novateurs. Par exemple, la Révolution néolithique s'étant tout d'abord produite au Moyen-Orient, on peut dire que c'est dans cette région, du fait de l'existence de concentrations vil-

lageoises liées au développement de l'élevage et de l'agriculture, que se sont situées les premières polarisations économiques. Les polarisations qui ont succédé à la révolution néolithique se sont implantées — on l'a vu — autour des grands fleuves des premiers empires, égyptien, mésopotamien, indien et chinois. On se souvient également qu'en Occident, elles se sont produites autour de la Grèce, de Rome, de Byzance, de l'empire arabe, des cités italiennes, de la Hollande, de la Grande-Bretagne qui a accompli la révolution industrielle. On avait vu aussi qu'au XX^e siècle, le principal pôle de domination a tout d'abord été celui des États-Unis, puis celui, plus difficile à définir, constitué par l'espace multinational. On s'était alors demandé, pourquoi l'évolution socio-économique s'était effectuée de manière polarisée, hiérarchisée, non uniforme ? On avait répondu alors, qu'il était aisé de s'apercevoir que la meilleure combinaison permettant de nouveaux gains de productivité ne pouvait se réaliser en tous lieux à la fois. Et, les multiples combinaisons qui se sont succédées ne présentaient chaque fois les meilleures conditions qu'en des endroits précis. On avait alors cité l'Europe comme exemple du mode combinatoire idéal permettant le début de la révolution industrielle, car c'est là que les meilleures conditions — techniques et politiques —, étaient réunies, plutôt qu'en Chine ou ailleurs. En prolongeant le raisonnement précédent, on avait avancé qu'en s'éloignant des lieux des meilleures combinaisons, on assistait à une articulation de sous-pôles de moins en moins générateurs de gains productivité. Et, on avait signalé qu'un schéma hiérarchique entre structures de pôles de domination, sous-pôles, pôles périphériques, ainsi dessiné, pouvait être représenté par des images mathématiques de nature fractale, car auto-similaires.

• Trois grandes périodes de hiérarchies dans l'histoire humaine

Nous avons déjà insisté plusieurs fois sur le fait que l'on pouvait résumer l'évolution économique en trois grandes périodes. Reprenons la même démarche à propos de l'installation de hiérarchies.

– Première grande période : hiérarchies internes à la tribu

Pendant la première grande période de l'humanité, celles des sociétés dites « primitives » de chasseurs-cueilleurs, les hiérarchies sont internes à la microsociété nomade. Elles sont définies par le pouvoir d'un chef de tribu ou d'un conseil d'anciens. Les niveaux de productivité sont identiques dans l'ensemble du monde.

– Deuxième grande période : de la révolution néolithique à la révolution industrielle ?

Les hiérarchies qui s'installent dépendent de la meilleure capacité technologique d'abord, puis scientifique ensuite, dans la domestication des éléments naturels présents. Par exemple, il s'agit d'abord d'obtenir les meilleurs gains de productivité dans la domestication de plantes, d'animaux, puis de fleuves (Ex : Égypte ancienne) puis de mer (Grèce ancienne), puis de terres (routes romaines), puis de voies maritimes.

– Troisième grande période : de la révolution industrielle au XXI^e siècle

Les hiérarchies dépendent encore plus d'une capacité scientifique et technologique. À partir du XVIII^e siècle, c'est le pays qui obtient les niveaux de productivité les plus élevés qui vise la domination mondiale : cas de la Grande-Bretagne aux XVIII^e et XIX^e siècles, cas de États-Unis d'Amérique au XX^e siècle.

À la fin du XX^e siècle, c'est uniquement la capacité à former du travail très qualifié, lié à des technologies de pointe qui est déterminante dans l'obtention d'un haut niveau de gains de productivité¹. On a souligné ailleurs, que vers 1970, des limites de productivité avaient été atteintes dans le monde industrialisé, illustration du phénomène de discontinuité qui s'est traduit par une crise économique jusque vers 1990. Rappelons que la nature de cette crise résultait, en schématisant, de limites de productivité atteintes de la chaîne de montage humaine (le « *taylorisme* »). Ces limites ont été dépassées pas des technologies de robotisation, d'où la fin du travail déqualifié programmée depuis 1970 ! D'où un impératif technologique, pas nouveau, mais qui exclut cette fois le travail déqualifié dans les pays anciennement industrialisé (États-Unis, Europe), ce qui n'a pas été compris, des années 1970, à la fin du XX^e siècle, et même encore en ce début de XXI^e siècle².

Formes de la domination américaine de 1920 au début de XXI^e siècle

On a assisté au XX^e siècle, de 1920 à 1970, à une domination d'un État à dimensions presque continentales, les États-Unis d'Amérique, sur l'ensemble des autres États-nations du monde. Cette domination d'un espace de taille unique a fonctionné de manière spectaculaire jusqu'au

-
1. Grou P., 2005. *Impératif technologique ou déclin économique ?*. L'Harmattan. Coll. « Questions contemporaines ». Paris.
 2. Reich, R. 1993. *L'Économie mondialisée*. Dunod. Paris.

moment de l'émergence de la mondialisation économique. Puis, en tout début de XXI^e siècle, une situation nouvelle est apparue, celle d'une volonté de maintien d'une domination américaine de type « national » face à la mondialisation économique. En effet, une partie du groupe social dominant aux États-Unis a voulu maintenir dans l'étape de la mondialisation, une forme de domination propre à l'étape précédente, celle d'un État à taille remarquable, presque continentale. Il s'en est suivi une situation lourde de dangers qui a abouti à une extension des foyers de conflits militaires dans le monde. En termes de hiérarchie d'échelles, cette pratique équivaut à ce qu'une échelle d'un niveau inférieur intervienne brutalement à un niveau supérieur.

L'exemple le plus évident de cet état de choses est celui de la stratégie étatique américaine se heurtant à une partie du reste du monde lors de la mainmise des intérêts pétroliers américains sur les réserves pétrolières d'Irak, au moment où les ressources énergétiques de la planète se raréfient, élément le plus spectaculaire de la limite globale étudiée plus haut. En revanche, une autre partie du groupe social dominant originaire des États-Unis se désintéresse de plus en plus de ce qui se passe sur le territoire américain, ce qui a pour effet d'engendrer un déclin économique relatif de ce pays.

***Dévoiement des différences de productivité
par des groupes sociaux dominants, qui s'approprient
la plus grosse part de la production mondiale***

D'une manière générale, les groupes sociaux réalisant les niveaux de productivité les plus élevés d'une hiérarchie ont toujours trouvé normal que les rémunérations inégalitaires et les écarts de richesse apparus soient un résultat définitif. En ce début de XXI^e siècle, on a assisté à l'installation d'un pouvoir hiérarchique au niveau mondial, ne connaissant aucune limite, qui a entraîné un phénomène d'accroissement des écarts. Se développe ainsi un dévoiement inégalitaire de la dynamique de recherche de gains de productivité par les sociétés humaines. Cet état de choses résulte de la prise de pouvoir par une *bourgeoisie mondialisée*, « devenue maîtresse du monde ». Pour régner sans limite les porte-parole de cette classe dominante, disposent d'une théorie, incapable d'expliquer la réalité, mais qui propose en permanence le slogan « *liberté sur les marchés* », liberté sensée régler tous les problèmes et parvenir à une optimisation de l'activité économique. Cette théorie, dite « *néo-classique* » appelée également « *libéralisme* », est une idéologie au service des positions dominantes.

C'est pourquoi d'ailleurs, si l'on réexamine l'histoire de la pensée économique, on s'aperçoit que depuis la révolution industrielle du XVIII^e siècle, les auteurs appartenant à des pays situés en haut de hiérarchie économique mondiale ont produit la plupart du temps des théories « libérales ». En revanche, c'est dans les pays qui voulaient rattraper leur retard technologique, que se sont plus fréquemment exprimés des courants de pensée préconisant des politiques interventionnistes. On constate que la Grande-Bretagne a été « Mercantiliste », c'est-à-dire « interventionniste », aux XVI^e et XVII^e siècles, quand l'activité des marchands hollandais dominait l'Europe. Mais au XIX^e siècle, quand la Grande-Bretagne a elle-même, dominé le monde, elle a diffusé la pensée dite « classique » de David Ricardo, c'est-à-dire la première forme de pensée « libérale ». De même, les États-Unis d'Amérique, qui étaient protectionnistes au XIX^e siècle, sont devenus « libéraux » au XX^e et au XXI^e siècle, lorsqu'ils ont atteint le haut de hiérarchie technologique mondiale. De plus, l'État fédéral américain n'a pas respecté lui-même la pensée libérale, parce qu'il a longtemps été interventionniste. Il apparaît ainsi que le « libéralisme » ne présente aucun intérêt en tant que théorie explicative de la réalité, mais joue un rôle important en tant qu'idéologie du *statu quo*. On constate ainsi que, quand un pays a atteint une position dominante grâce à une action « collective » appropriée, il décide qu'il n'a pas intérêt à ce que les pays concurrents le rattrapent grâce à d'autres actions « collectives » appropriées. Des théoriciens originaires de ce pays prescriront donc aux responsables « collectifs » des autres pays de laisser leurs « marchés » fonctionner tout seuls, c'est-à-dire de ne surtout pas agir sur ceux-ci. *La théorie « libérale » — dite néo-classique — est bien une idéologie au service de positions dominantes.*

Effets des pratiques de la bourgeoisie mondialisée en début de XXI^e siècle

On l'a dit à propos des actions de la bourgeoisie des États-Unis d'Amérique, des fractions majoritaires des bourgeoisies mondialisées se désintéressent des territoires dont elles sont originaires, situées aux échelles continentale, nationale et locale régionale. Ces pratiques ont pour résultat une désorganisation de l'ensemble de ces échelles articulées entre elles et par suite de multiples phénomènes de déclin/diffusion sur l'ensemble de ces parties du monde.

Le choc financier de 2007-2009 est une autre conséquence de ces situations de désorganisation de l'espace des échelles dans le monde, suite aux pratiques totalitaires d'une bourgeoisie mondialisée au pouvoir sur l'espace mondial depuis la fin du XX^e siècle.

Évolution et transformations de « l'espace des échelles » : gains d'énergie dans les crises économiques, accompagnés de déclin

Crises économiques et déclin/diffusion

On a vu qu'une crise économique présentait, pour nous, l'aspect de dualité proposé par Joseph Schumpeter et résumé par l'expression de « *destruction créatrice* ». En effet, pour lui, un monde qui a atteint ses limites de capacité innovatrice entre dans une phase de destruction, cependant que de nouvelles capacités innovatrices vont caractériser un nouveau monde « créateur » de nouvelles richesses, pour nous plus économes d'énergie. Il suffit de remplacer « *capacité innovatrices* » par « *gains de productivité* » pour retrouver des termes identiques à ceux de notre démarche. Comment examiner plus précisément d'abord la phase de destruction de l'ancienne organisation ?

► Apparition de limites

• Une première période. Limite endogène, sans destruction exogène ?

Dans une première grande période de l'histoire humaine, il semble que des limites de productivité soient apparues d'elles-mêmes, car on constate que les nouveaux gains de productivité ont mis des siècles à se mettre en place. On peut situer cette première grande étape dans un temps qui se serait étendu des origines de l'humanité jusqu'à la révolution industrielle.

• Une seconde période : destruction exogène ?

Une seconde période serait celle qui suit l'industrialisation des sociétés et on constate alors que les apparitions de nouvelles technologies ont semblé se succéder de manière très rapide. Les sanctions immédiates des limites de gains de productivité, elles-mêmes atteintes de plus en plus rapidement, se seraient-elles produites, cette fois, sous la pression d'innovations devenues exogènes ?

Déclin simple : simple diffusion

Quelle que soit la réponse apportée, on peut se demander à propos des crises économiques, si les mondes économiques qui disparaissent lors des phases de crises, après un premier moment qu'on peut qualifier de *déclin*, sont caractéristiques de processus de « *diffusion* » ?

Universalité des processus de diffusion

Quelle est la définition d'un processus de diffusion ? Posons-nous la question en physique d'abord, en biologie ensuite et enfin en sciences sociales ?

► Analogie avec la diffusion en physique

En physique, le phénomène de diffusion se caractérise par une entropie croissante et correspond, en général, à une désorganisation. D'autre part, nous avons rappelé dans les chapitres 1 et 5, que si l'on inverse le signe du potentiel quantique dans la représentation hydrodynamique de l'équation de Schrödinger généralisée, les équations correspondantes deviennent des équations de la diffusion. Les trois situations possibles (i) présence d'un potentiel quantique, (ii) son absence et (iii) son inverse, correspondent donc respectivement à des propriétés (i) d'auto-organisation (typique des fluides quantiques), (ii) d'organisation faible des fluides classiques ou (iii) de désorganisation diffusive.

► Transposition au vivant ?

Une des manifestations du phénomène de diffusion dont on peut faire l'hypothèse dans le cas du vivant, et plus particulièrement chez les mammifères, et en particulier chez les êtres humains, est le développement de cancers. Dans ce cas, l'énergie d'une partie de plus en plus importante de l'organisme est employée à la destruction du fonctionnement de l'organisme.

► Diffusion, déclin, et obscurantismes en sciences sociales

En sciences sociales, dans le cadre de la caractéristique des discontinuités économiques, intéressons-nous à l'aspect uniquement « destruction » dans la période de crise (si l'on assimile celle-ci au moment de destruction du processus de « destruction créatrice » décrit par Joseph Schumpeter), et laissons de côté l'aspect « création ». On peut alors assimiler le terme « *destruction* » à celui de « *déclin* ». Du déclin de l'Empire égyptien sous la dernière dynastie des Ptolémées, à celui de l'Empire

romain aux premiers siècles de l'ère chrétienne, et dans les cas d'une multiplicité d'autres exemples qui se succèdent au cours de l'histoire, le terme de « *déclin* » est souvent employé. Il correspond, pour nous, au processus qui entraîne la disparition des mondes économiques qui ont atteint leurs limites de productivité — dans ce que nous nommons « *discontinuités économiques* ». Peut-on alors employer à ce propos le concept de « *diffusion* » — propre à la physique et, on l'a vu, également à la biologie — en tentant de l'appliquer aux sciences sociales ?

Les périodes de déclin sont des moments où il semble qu'à toutes les échelles d'une société, se produisent des phénomènes de laisser-aller, d'absence d'utilisation d'énergie à bon escient, de gaspillage de créativité, comme si l'objectif à atteindre par toutes les échelles se situait à l'opposé de la réalisation d'un projet cohérent. On pourrait, à ce propos, employer le terme d'« *auto-désorganisation* » d'une société, par conséquent à l'opposé du concept d'« *auto-organisation* » d'une société, qu'on a tenté de définir dans notre premier chapitre.

Or, on l'a dit, en sciences physiques, dans le cadre de la relativité d'échelle, des phénomènes qui se caractérisent par leur auto-organisation peuvent, par simple inversion du signe d'un « potentiel quantique », devenir de type diffusif et donc se désorganiser. Ajoutons que pendant les périodes de crises économiques, les lieux en déclin sont parfois caractérisés par des phases de « *pensée obscurantiste* ».

Ces moments d'obscurantisme accentuent les phases de déclin et sont dus à une volonté d'empêcher le dépassement du déclin par la dynamique opposée, de nature « créatrice », ou auto-organisatrice. Pour reprendre l'exemple du déclin de l'Empire romain, on se souvient que les empereurs de cette période, pour continuer à maintenir leur pouvoir dans un cadre en phase d'auto-désorganisation, diffusaient le binôme « pain et jeux du cirque », qui avait pour effet d'endormir toute possibilité par la population d'une prise de conscience de la dégradation de la situation.

Ainsi, notons ici qu'une poussée de pensée obscurantiste peut, en se manifestant dans une situation d'auto-désorganisation, aggraver le phénomène déjà présent, et empêcher définitivement l'apparition de l'aspect créateur, auto-organisateur, qui peut apparaître dans les phases de crise propres aux discontinuités économiques.

Espace des échelles de l'être humain au XXI^e siècle : condition humaine ou inhumaine ou nouvelle condition humaine ?

Un mode de vie caractérisé par la « technoscience »

Pour certains, l'essor de la révolution industrielle, qui, au cours des XVIII^e, XIX^e, XX^e, et XXI^e siècles, s'est répandu sur l'ensemble de la planète a installé un mode de vie caractérisé par la « techno science » qui transforme le mode de vie des êtres humains d'une manière qui les déshumanise complètement. Lorsqu'on sait, en plus, que la « machine économique globale » définie plus haut se dirige vers les limites du temps critique annoncé pour le XXI^e siècle, on ne s'étonnera pas de trouver un fort mouvement critiquant la « technoscience ».

Une condition inhumaine ?

Ollivier Dyens écrit dans un texte qui a pour titre *La Condition inhumaine*¹ et comme sous-titre *Essai sur l'effroi technologique* :

« Ce livre posera la question du malaise que l'humain ressent face à l'incompatibilité des réalités biologiques et technologiques dans lesquelles il existe simultanément. Pourquoi l'humain est-il si inquiet aujourd'hui, face aux technologies ? se demandera ce livre. Pourquoi l'homme a-t-il l'impression que les technologies le menacent ontologiquement, métaphysiquement ? Pourquoi tant d'inquiétude alors que la relation entre le vivant et les technologies précède l'apparition de l'"Homo sapiens" et que l'émergence de la civilisation humaine en est dépendante ? Pourquoi ? Parce que les technologies contemporaines, proposera ce livre, remettent en question, non seulement la perception que nous avons du monde, mais bien aussi les universaux qui nous ont aidés, à travers les millénaires, à rationaliser notre présence en celui-ci. »

Et encore, un peu plus loin :

« Il ne cherchera pas à condamner ou à encenser la technologie, mais bien à utiliser la multiplication des niveaux de réalité qu'elle nous offre pour examiner le vertige contemporain ».

Par suite :

« Qu'est-ce que la réalité biologique ? La perception du monde selon la physiologie de chaque espèce. Si la matière biologique est la dimension de la

1. Dyens O. 2008. *La Condition inhumaine. Essai sur l'effroi technologique*. Flammarion. Paris. P. 15, 36, 49-50, 177, 180.

réalité qui est commune à tous, la réalité biologique, elle, « est la dimension qui est propre à chaque espèce. »

Puis :

« Qu'est-ce que la réalité technologique ? Si la réalité biologique est la perception du monde selon les sens et la physiologie propre à chaque espèce, la réalité technologique est la perception du monde selon les sens humains « et » technologiques (et j'entends « technologiques » de façon très large ici : tout ce qui est construction et qui transforme soit la matière, soit la perception, bref tout ce qui machines, moteurs, outils mais aussi langages, science, et même arts). »

Alors :

« En fait, plus il y a de technologies, plus le reflet que l'humanité reçoit d'elle-même et de son monde se multiplie ; paradoxalement, moins elle est alors capable de se définir, de le comprendre, de se conceptualiser, de le rendre cohérent. C'est cette impossibilité qui est à la base de la condition inhumaine. »

Une nouvelle condition humaine

Mais finalement Dyens conclut :

« Que la réalité doit être perçue comme une matière qui est toutes les dimensions à la fois, qui est toutes les échelles en même temps. Que les technologies ne doivent pas être perçues et analysées comme de simples outils dont l'impact est mesurable, dont la présence est délimitable, mais comme des phénomènes aussi enchevêtrés à l'humanité que les bactéries. »

Au total, on assiste à une dynamique de dépassement d'une condition « inhumaine » l'auteur parvenant à la conclusion que :

« la réalité doit être perçue comme une matière qui est toutes les dimensions à la fois, qui est toutes les échelles en même temps ».

Conclusion du second chapitre

Ainsi, un raisonnement en termes de relativité d'échelle permet en particulier, au début XXI^e siècle, non seulement une analyse de la condition humaine qui évacue la notion critiquable de « *condition inhumaine* », mais permet au contraire de développer une nouvelle conception, beaucoup plus riche, celle qui pourra éventuellement aider à dépasser le temps critique du milieu du XXI^e siècle.

3.3

Une nécessité scientifique de prédictibilité

Le travail du scientifique consiste à trouver les lois qui régissent son domaine. Or, une idéologie fortement présente en fin de XX^e siècle et en ce début de XXI^e siècle, en particulier dans le domaine des sciences du vivant et dans celui de l'histoire des sociétés, *réfute une démarche de recherche de lois scientifiques en opposant les arguments, soit d'une soumission à un dogme religieux déterministe, soit d'une impossibilité due à l'existence d'un hasard tout puissant*. Ce n'est pas ici le lieu de tenter d'expliquer une attitude qui nous paraît de *nature obscurantiste*. Pour nous, l'humanité a toujours progressé dans les périodes où elle remettait en question les paradigmes antérieurement installés, et cette démarche n'a aucune raison de cesser.

Notion de prédictibilité à caractère indéterministe

On se souvient que nous avons précédemment proposé d'utiliser la notion de « *prédictibilité à caractère indéterministe* » dans l'évolution économique¹. Nous exprimions tout d'abord le fait qu'à première vue, cette définition semblait contradictoire en elle-même. Mais nous précisons que ce n'était pas le cas, puisque l'on peut très bien prédire une direction prise par une série d'événements, sans qu'un déterminisme précis nous donne exactement le point d'arrivée des événements en question. L'exemple de la prédictibilité à caractère indéterministe — probabiliste — de la mécanique quantique est là pour illustrer ce type de processus. De même, comme on l'a vu, en sciences humaines, on peut prédire des directions, des « *temps critiques* », des probabilités d'occurrence d'événements, mais pas les détails exacts des formes prises par les événements.

Pour schématiser, on avait résumé cette démarche en posant la question de la convergence ou de la contingence dans l'évolution et on avait abouti à une *loi de convergence* large, complétée par une *indétermination* de manifestations concrètes. Considéré sous l'angle de la convergence, on avait rappelé que le mouvement de recherche de gains de productivité était une constante de l'évolution des sociétés, dont on avait fait la

1. Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit.

principale loi de l'évolution économique. Cette tendance a, pour nous, entraîné, par la combinaison de plusieurs facteurs, une localisation de la révolution industrielle en Europe. Et on avait posé la question de savoir si tous les éléments étaient réunis dès l'origine de l'humanité pour la convergence vers une révolution industrielle située en Europe. Nous avons répondu par la négative. Puis, nous avons rappelé qu'*a contrario*, pour beaucoup d'auteurs, le phénomène de la révolution industrielle avait été le fruit du hasard, un résultat fortuit dû à l'addition d'une série de transformations agricoles, démographiques, techniques, et politiques qui, encore par hasard, s'étaient trouvées réunies en Europe. En nous plaçant dans notre perspective de large convergence, pour nous, la révolution industrielle devait se produire tôt ou tard, et c'est à ce moment qu'un processus d'auto-organisation devait se manifester. Le seul problème demeurant, était celui du lieu où un tel processus devait apparaître. C'est pourquoi nous avons énoncé l'existence d'une *loi de convergence* large, complétée par une *indétermination* de manifestations concrètes. Pour ce qui est de la convergence large, nous avons fait l'hypothèse qu'à partir du moment où l'Australopithèque — ou son successeur *Homo ergaster* — ont inventé l'outil en évolution, s'était manifestée une loi de convergence se traduisant par une dynamique d'accroissement de productivité. Une fabrication d'outils plus perfectionnés, d'habits, une amélioration du mode de vie des hommes ont suivi. Ensuite, la conquête du feu par *Homo erectus* a permis une plus grande sécurité, une transformation des conditions alimentaires, un début d'organisation de l'habitat. Nous avons ensuite noté qu'une première grande rupture, celle de la Révolution néolithique, avait été un aboutissement de cette convergence. Et nous avons imaginé logiquement que la naissance de l'agriculture, de l'élevage, de l'habitat sédentaire, et le développement de l'outillage qui accompagnait cette tendance devait conduire tôt ou tard à une seconde grande rupture, celle de la révolution industrielle, qui s'est réalisée en Europe.

Le problème qu'on avait posé par rapport à ces événements était celui d'une prédictibilité plus précise, par exemple celui de la localisation de telles ruptures. On s'était rendu compte que la loi, nommée *loi de convergence*, ne fournissait pas de réponse. Et pour nous, la Révolution néolithique aurait très bien pu se produire en un autre endroit que le Moyen-Orient, et la révolution industrielle se dérouler en Chine, en Inde, voire en Amérique précolombienne ou en Afrique, plutôt qu'en Europe.

Le caractère indéterministe de la prédictibilité, ou l'indétermination concrète, son aspect contingent, par rapport à la convergence, résident

dans ces questions. On peut néanmoins répondre que c'est vraisemblablement parce que le Moyen-Orient se trouvait au carrefour de trois continents que s'y est accumulé un ensemble d'expériences concernant la domestication de plantes — céréales et vigne — et d'animaux — chèvres et loups, qu'une révolution créant la sédentarisation et installant agriculture et élevage s'y est produite. De même, en Europe, on a depuis longtemps fait l'hypothèse qu'un ensemble de conditions sociales a permis à une nouvelle classe de marchands d'acquérir une autonomie rendant possible l'investissement de capitaux dans la production. Et pour nous, c'est pourquoi une révolution industrielle s'y est déroulée.

En sciences sociales économiques, impossibilité évidente de la moindre prédictibilité dans le cadre de l'idéologie néo-classique

On s'est déjà étendu — plus haut — sur l'impossibilité pour la théorie néo-classique de répondre aux problèmes posés par l'Économie politique. On a énoncé depuis le début de notre développement, que c'est une analyse en terme d'ensemble organisés en échelles, qui nous paraissait la démarche la plus pertinente pour comprendre l'évolution économique. Par suite, il existe une *impossibilité de coexistence* entre une conception en termes « *d'éléments organisés en échelles* » et une conception en termes de « *marchés* ». Le concept de marché, fort prisé par la pensée libérale néo-classique est dangereux parce qu'il est utilisé d'une manière qui ne correspond pas à la réalité. On a vu plus haut que les « marchés » sont des lieux d'échange entre acteurs « individuels ». Ces lieux ne peuvent rendre compte du fonctionnement de l'organisation d'une société, composée d'un ensemble d'échelles articulées entre échelles « individuel » et échelles « collectif ». Pour que ce soit le cas, il faudrait que l'on accepte qu'une coalition d'échelles « individuel » aient confisqué le fonctionnement de la société à son profit. Il convient de remarquer que ce cas de figure existe actuellement à l'échelle mondiale avec des prolongements sur les autres échelles de nature continentales, nationales, et locales/régionales.

En Europe, c'est au Moyen Âge lors du renouveau des circuits commerciaux des XI^e-XIII^e siècles que le « marché » avait pris un nouvel essor. À l'origine, il avait été le lieu où les marchands proposaient des produits qu'ils s'étaient procurés en d'autres lieux, ceux de la production artisanale. L'endroit où sont vendues les marchandises est l'aboutissement d'une longue chaîne d'actes économiques plus importants que leur lieu de conclusion — le marché. Pour paraphraser une phrase célèbre,

on pourrait énoncer que « *le marché est ce qui reste lorsque tous les autres problèmes ont été réglés. Lorsqu'il existe, le marché est le lieu de conclusion d'un processus dont l'existence est rendue possible parce que tous les problèmes économiques ont été résolus* ».

Et insistons bien sur le fait que lorsque tous ces problèmes ont été résolus, on se situe encore dans un cas de figure d'échelle individuelle. Pour qu'une société fonctionne correctement, on l'a vu plus haut, il doit exister une multiplicité de passages entre échelles, de nature « individuel/collectif ». À partir de là, un raisonnement en termes d'ensembles organisés en échelles — ensembles en évolution — permet une prédictibilité à caractère indéterministe.

Les approches en termes d'évolution d'ensembles organisés permettent une prédictibilité à caractère indéterministe

Pour notre part, on a toujours pensé qu'une absence de prédictibilité était incompatible avec toute démarche scientifique. En sciences sociales, dans la discipline économique, la théorie néo-classique cache aussi son impuissance théorique derrière une profusion de modèles mathématiques dont les présupposés de départ sont faux la plupart du temps. La dernière manifestation de cette réalité a été le choc financier de 2007-2009, où le caractère scandaleux de la spéculation débridée, en cours depuis 2004, a été camouflée par une profusion de « *modèles* » de technique financière, encourageant les pratiques de « *titrisations* ». Ces modèles, véritables cautions fournies à la spéculation, ont prouvé leur caractère néfaste, lors de l'effondrement général de l'énorme bulle financière, en 2008.

Examinons une série d'exemples où un raisonnement en termes d'ensembles organisés nous a permis de pratiquer un mode de prédictibilité à caractère indéterministe.

Prédiction que l'inflation des années 1970 correspondait à une première forme de crise économique

Le premier problème qu'on peut rappeler est celui de l'inflation des années 1970, qu'on expliquera comme une première forme de la crise économique qui s'est étendue pendant les années 1970-1980¹. On s'était basé sur l'analyse d'un ensemble organisé où la monnaie jouait son rôle

1. Grou, P. 1977. *Monnaie, crise économique*. PUG-Maspero/ Paris.

d'élément participant au fonctionnement de l'ensemble. Cette approche n'a évidemment rien de commun avec l'approche néo-classique où la monnaie est un bien dont la valeur est dépendante d'un équilibre entre offre et demande réalisé sur le « marché » de la monnaie. La définition de la monnaie de crédit émise au XX^e siècle dans les pays industrialisés sans plus aucune référence à l'or — à l'exception des États-Unis jusqu'en 1973 — est, pour nous, celle d'une créance sur l'économie, c'est-à-dire qu'elle est émise par les banques pour que les entreprises bénéficient du crédit nécessaire au fonctionnement de leur activité économique. Pendant les années de grande croissance, de 1945 à 1965, les taux d'inflation moyens dans les pays industrialisés étaient demeurés inférieurs à 3 %, ce qui signifie qu'une bonne activité économique constatée permettait le maintien d'une valeur quasi stable des créances sur les économies industrialisées. Par suite, une valeur quasi stable des créances sur les entreprises, entraînait une valeur quasi stable de la monnaie. Mais, à partir de la fin des années 1960, un processus général d'inflation s'est manifesté dans le monde industrialisé. Ce phénomène ne pouvait que correspondre, pour nous, à une dévalorisation des créances émises par les banques sous forme de monnaie. Quelle pouvait bien être la cause de cette dévalorisation ? Pour nous, il s'agissait de difficultés des entreprises, exprimées par un endettement qui allait en s'accroissant. Ces difficultés annonçaient, pour nous, une phase de crise, moment des discontinuités propres à l'évolution économique d'ensembles organisés — alors que les crises économiques n'existent pas dans la théorie néo-classique. La prédiction que nous avons effectuée de l'inflation comme première forme d'une crise économique a été réalisée puisqu'une grande crise s'est étendue des années 1970 jusqu'à la fin des années 1980. Le moment de la seconde forme de la crise, caractérisé par un fort chômage, ne s'est réalisé qu'à partir de l'année 1982. Cette date ne pouvait être prévue à l'année près et elle correspond à l'aspect indéterministe de la prédictibilité.

Prédiction de durée de la crise des années 1970-1980

On se souvient peut-être que durant les années 1970, pour certains, une croyance dans l'efficacité des politiques keynésiennes qui, pensaient-ils, avait permis la phase de croissance — appelée plus tard « *trente glorieuses* » — était bien établie. Cette croyance a empêché une prise de conscience, que ce qui se passait alors était une crise qui durerait longtemps. Quant aux tenants de la pensée néo-classique, on a vu que pour eux les crises n'existaient pas ou étaient dues, comme en 1929, au

mauvais fonctionnement des marchés. Pour nous, la crise apparue vers 1970 était une phase s'inscrivant dans les discontinuités de l'évolution économique. Cette analyse fait évidemment référence à la dynamique d'ensembles économiques organisés développée ici. Au XX^e siècle, compte tenu de l'accélération économique, ces phases avaient une durée de l'ordre de vingt à trente ans — la crise des années 1930 avait duré de 1920 à 1945. Par suite, on pouvait prédire pendant les années 1970 qu'on avait affaire à une crise qui durerait plusieurs années. Or, aussi bien le personnel politique, que les experts économiques assuraient à ce moment qu'une reprise économique se produirait l'année suivante. La crise des années 1970-1980 s'est effectivement terminée à la fin des années 1980. Une fois encore, le caractère indéterministe de la prédiction de la durée de la crise s'est illustré par une impossibilité de prédire l'année exacte de sa fin.

Prédiction de l'éclatement des « Kereitsu » japonais et des « Jaebul » coréens

La prédiction de l'éclatement des « *Kereitsu*¹ » japonais et des « *Jaebul* » coréens a fait suite à une analyse de sous ensembles de grandes firmes mondiales dont les stratégies étaient organisées pendant les années 1980 de manière hiérarchisée. En effet, au sein d'un échantillon des plus grandes firmes mondiales classées par chiffre d'affaires, on trouvait en haut de la hiérarchie, des firmes — par exemple américaines — à la production très spécialisée — par exemple, en électronique comme IBM — et au capital très dispersé. Puis, à une seconde échelle, on trouvait des firmes rassemblées en « groupes financiers » — exemple des *Kereitsu* japonais — peu spécialisés, puisque dans des groupes comme Sumitomo ou Mitsubishi, la production était très diversifiée, de Sumitomo Chemical à Sumitomo Heavy Industries ou de Mitsubishi Electric à Mitsubishi Chemical. Le capital de ces groupes était détenu principalement par une banque, la Sumitomo bank dans le cas du Kereitsu Sumitomo, la Mitsubishi bank dans le cas du Kereitsu Mitsubishi, conséquence d'un endettement important à l'origine. Enfin, plus bas dans la hiérarchie, on trouvait des conglomérats coréens — les *Jaebul* — comme Samsung, Hyundai, ou Daewo, qui fabriquaient la plus large gamme de produits et étaient pilotés et possédés par des familles, mais financés par l'État coréen.

1. Les *kereitsu* ou *zaki* sont des conglomérats d'entreprises variées reliées par des liens financiers dépendant d'une banque unique. En Corée, on utilise le terme de *chaebol* ou de *jaebul*.

Comme le Japon était placé dans une dynamique qui lui avait permis de devenir la seconde puissance industrielle du monde (le *miracle japonais*), et que la Corée s'installait dans le statut de nouveau pays industriel (NPI), nous avons effectué, d'abord pour les groupes financiers japonais en 1982¹, puis en 1988 pour les conglomérats coréens², la prédiction, qu'à terme, aussi bien les Keretsus japonais que les *Jaebul* coréens éclateraient pour se transformer en plusieurs firmes et banques autonomes, spécialisées dans des directions précises, profils propres aux firmes de haut de hiérarchie. C'est lors du choc financier asiatique de 1997, que ces deux catégories de groupes ont éclaté. En effet, les chocs, financiers entre autres, ont souvent pour résultat de servir de révélateurs de situations inadaptées. Depuis 1997, les Keretsus japonais et les *Jaebul* coréens se sont restructurés, rapprochant leurs profils organisationnels des firmes de haut de hiérarchie. Dans ce cas encore, nous avons effectué une prédiction, mais son caractère indéterministe a résidé dans le fait que la date des restructurations prédites ne pouvait pas l'être de manière précise.

Prédiction fin des années 1980 d'une accélération économique

En 1987, nous avons énoncé les principes qui apparaissaient pour nous comme grandes caractéristiques de l'évolution économique³. Nous les avons rappelées au début de notre présent propos. Y figurait celle d'une accélération économique peu perçue à l'époque. Bien évidemment, ce constat n'avait aucun rapport avec le retour de la pensée néo-classique qui se manifestait fortement à ce moment. C'est encore une analyse en termes d'ensembles organisés — que nous nommions alors systèmes — qui nous avait permis de comparer les durées des phases de crises et de stabilités économiques de la dynamique évolutive des ensembles des sociétés humaines. Nous, nous sommes alors posés la question du type de limite que cette accélération annonçait. Mais notre prédiction s'est heurtée à une indétermination.

-
1. Grou, P., 1982, *La Structure financière du capitalisme multinational*, Presses de la Fondation nationale des sciences politiques.
 2. Grou, P. 1988. *L'Émergence des géants du Tiers-Monde*. Publisud. Paris.
 3. Grou, P. 1987. *L'Aventure économique*. Op. cit..

Prédiction d'une singularité pour les sociétés humaines au XXI^e siècle

C'est en 2000 que la prédiction d'un temps critique des sociétés humaines a été réalisée par une analyse en termes de lois log-périodiques. Le résultat a permis une prédictibilité plus fine, mais à nouveau à caractère indéterminé. Les conséquences de cette prédiction ont été développées plus haut dans notre présent développement¹.

Prédiction d'un accroissement de chaos économique dû aux chocs financiers

Depuis 1987, on assiste à des chocs financiers de plus en plus importants, dus à une spéculation mondiale sans freins, qui s'enroulent autour de l'accélération économique. Cette situation est due à une absence d'échelle « collective » au sein de l'échelle mondiale. Le choc de 2007-2009 avait été prédit dès 2005, par François Morin² suite au constat, réalisé à ce moment, du montant des titres financiers en circulation rapporté au montant de l'activité économique effective. Il convient de remarquer qu'une pratique toute puissante de l'argent installe, pour ses besoins spéculatifs, un champ d'application constitué par la réunion d'une multiplicité de domaines — par nature fractionnés. Elle transforme ainsi une fragmentation naturelle en un « marché unique » de plus en plus vaste.

Cette unification superficielle et malsaine, d'une multiplicité de domaines différents — car « fractionnés » — comme celui de la monnaie, de l'immobilier, des matières premières, des titres financiers, de l'énergie, etc., sert de champ de spéculation élargi, qui conduit régulièrement — comme il est aisé de le prédire — à des effondrements générateurs de chaos mondial.

Car une bourgeoisie mondialisée, « maîtresse du monde », occupe de sa toute puissance une échelle « individuel » au sein de l'« échelle mondiale », sans qu'une échelle « collective » soit apparue. On constate également que cette classe dominante, sentant vraisemblablement sa domination de plus en plus menacée par une accélération économique qui risque de remettre son pouvoir en question, diffuse un obscurantisme de l'argent qui atteint toutes les sociétés industrialisées de la planète. L'obscurantisme de l'argent continuera, si rien n'est fait pour le com-

1. Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit. Paris.

2. Morin, F. 2005. *Le Mur de l'argent*. Seuil. Paris.

battre, à développer, entre autres, une spéculation financière mondiale, génératrice de plus en plus de chaos économique mondial.

Prédiction d'une inadaptation de la production automobile mondiale dès le début du XXI^e siècle, due à l'épuisement des ressources naturelles énergétiques des sociétés humaines

Suite au choc financier de 2007-2009, qui comme tous les précédents chocs, sert, en particulier, de révélateur de la situation générale, il apparaît que l'industrie automobile mondiale et principalement l'industrie automobile américaine, sont les victimes de premiers signes de la limite prédite pour le XXI^e siècle ; les trois grands groupes General Motors, Ford et Chrysler se trouvent, fin 2008, au bord de la faillite. Cette situation structurelle d'un déclin des anciennes formes de l'industrie automobile se poursuivra. La prédiction d'une grande crise au XXI^e siècle est de plus en plus vérifiée, mais les formes qu'elle prend début XXI^e siècle, et celles qu'elle prendra courant XXI^e siècle, demeurent évidemment à caractère indéterminé.

Conclusion de la troisième partie

Dans cette partie consacrée à l'évolution des sociétés et à une tentative d'analyse en terme de relativité d'échelle, on a pu constater :

- Tout d'abord que les êtres humains étaient le produit d'une évolution rythmée, fractionnée, qui faisait déjà de ceux-ci le produit d'un « *jeu d'échelle* » élaboré dans le temps.
- Ensuite, que la situation des sociétés humaines au XXI^e siècle pouvait se définir comme une construction multi-échelle développée par exemple de l'échelle régionale à l'échelle mondiale, en passant par les niveaux intermédiaires nationaux et continentaux.

Par suite, on est parvenu à la définition d'un être humain riche de sa constitution en termes de multiplicité d'échelles que nous qualifierons d'être multi-échelle. Il convient d'opposer cette conception de l'être humain à celle de la pauvreté de l'être micro dimensionnel ramené à son individu et à l'instant présent. Cet individu est le résultat de la toute puissance de l'argent diffusé en début du XXI^e siècle et produit de la caste mondiale qui domine actuellement la planète¹.

1. Grou, P. (à paraître). *L'Obscurantisme du XXI^e siècle. La toute-puissance de l'argent.*

Quatrième partie

La théorie de la relativité d'échelle : formalisme mathématique

Nous donnons dans cette annexe une version encore résumée, mais plus détaillée du formalisme de la relativité d'échelle que dans sa présentation générale de la première partie (pour une version complète, se reporter aux articles originaux). Pour ce faire nous commencerons par un rappel rapide des théories de la relativité du mouvement (galiléenne, restreinte et généralisée), car le déroulement des idées et les concepts fondamentaux introduits dans ces théories ont servi de canevas à leurs généralisation aux transformations d'échelle.

4.1

Rappel : Relativité galiléenne du mouvement

Galilée est le découvreur de la relativité du mouvement inertiel, qu'il a érigé en principe :

quel que soit le mouvement que l'on attribue à la terre, il est nécessaire que, pour nous qui sommes les habitants d'icelle et par conséquent participants de celui là, il reste parfaitement imperceptible et comme n'étant pas...

Dans ce cadre, le mouvement d'un corps libre, non soumis à une force (dit inertiel) est rectilinéaire et à vitesse constante. Autrement dit, la transformation des coordonnées spatiale (x) et temporelle (t) dans un changement relatif de vitesse (v) du système de coordonnées est donnée par les relations simples :

$$x' = x + v t$$

$$t' = t$$

Encadré 4.1 : Invariant relativiste (relativité galiléenne)

Une règle de longueur l (supposée réduite pour simplifier à un segment de droite) dans l'espace ordinaire à trois dimensions se projette suivant trois valeurs x , y et z sur trois axes orthogonaux (par exemple largeur, longueur et hauteur dans une pièce). Dans une rotation de la règle (un changement d'orientation) ou du système de référence lui-même, les trois coordonnées x , y et z varient, mais, quelle que soit cette variation, une grandeur fondamentale reste constante : la longueur de la règle, donnée par la relation de Pythagore,

$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

4.2

Relativité restreinte du mouvement

Dans le cadre de la *relativité restreinte du mouvement* construite indépendamment au début du XX^e siècle par Poincaré et Einstein, espace et temps deviennent chacun des projections (l'une tridimensionnelle, l'autre monodimensionnelle) d'un même espace-temps. Le mouvement lui-même se ramène alors à un changement d'orientation (dans l'espace-temps), si bien que ses effets peuvent être compris comme une extension des effets, bien connus, de changement d'orientation (Poincaré, 1905 ; Einstein, 1905).

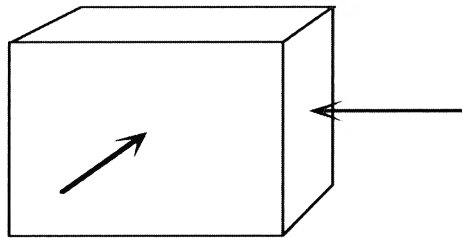


Figure 4.1. Les différentes faces d'un cube nous apparaissent de manière différente, en fonction de son état relatif d'orientation par rapport au système de référence.

Considérons en effet un corps tridimensionnel, comme, par exemple un parallélépipède. Il est clair qu'en général, nous voyons la plupart de ses différentes arêtes et faces non pas sous leur longueur vraie, mais projetées et donc apparemment contractées. Si l'une est face à nous, automatiquement celles qui lui sont orthogonales « disparaissent » : leur longueur projetée devient nulle. Si nous tournons l'objet devant nous, ou, d'une manière équivalente, si nous tournons autour de lui (ce qui est un aspect essentiel de la relativité), la face « disparue » réapparaît (fig. 4.1). C'est grâce à notre expérience de la nature des rotations dans l'espace à trois dimensions que nous comprenons ce qu'il en est : il n'y a pas eu réellement disparition et apparition, ce n'est pas de la magie, mais c'est seulement la nature relative des trois coordonnées d'espace

qui s'exprime. Ainsi dans l'espace euclidien à trois dimensions, bien qu'une règle ait globalement une longueur invariante indépendante du repère (donnée par la relation de Pythagore), les longueurs projetées sur trois axes orthogonaux n'ont rien d'invariant et dépendent, elles, du repère (voir encadré 4.1). Si, pour quelque raison, les changements de repère possibles étaient limités, un être qui verrait toujours la règle par l'extrémité risquerait de se tromper longtemps sur sa nature (c'est ainsi que la nature de globe sphérique de la Lune, qui présente toujours la même face à la Terre, a longtemps échappé à l'humanité).

En ce qui concerne le mouvement, un effort supplémentaire est nécessaire pour « sortir de la caverne ». Il s'agit de réaliser que *passer du repos au mouvement n'est rien d'autre qu'effectuer une rotation dans l'espace-temps*. Pour expliquer ce point essentiel, considérons un objet au repos dans un système de coordonnées spatio-temporel, où le temps est tracé verticalement et l'espace horizontalement. Dire qu'il est au repos relatif signifie que dans ce repère, les coordonnées qui définissent sa position ne varient pas au cours du temps, alors que le temps continue de s'écouler ! Sa trajectoire dans l'espace-temps est donc une droite verticale (fig. 4.2).

Mettons maintenant ce même corps en mouvement uniforme : le temps s'écoule toujours, mais la coordonnée spatiale va aussi varier régulièrement au cours du temps. Sa trajectoire spatio-temporelle devient une droite inclinée qui a *tourné* par rapport à celle représentant le repos. Ainsi, *passer du repos au mouvement dans l'espace correspond à une rotation dans l'espace-temps* (fig. 4.2).

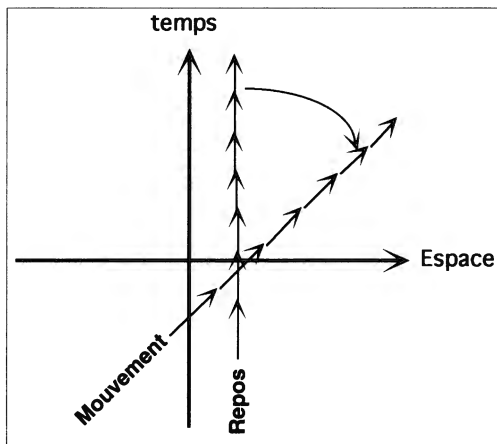


Figure 4.2. Dans l'espace-temps, on passe du repos au mouvement (par rapport à un repère donné) par une rotation.

On tient là l'essence de la théorie de Poincaré et Einstein de la relativité restreinte du mouvement. Il n'y a pas un espace et un temps séparé, mais un espace-temps à quatre dimensions, dont les trois dimensions spatiales et la dimension temporelle ne sont que des projections.

Encadré 4.2 : Invariant relativiste (relativité restreinte)

Deux événements très proches l'un de l'autre sont séparés spatialement par des intervalles dx , dy et dz sur trois axes orthogonaux, et par un intervalle de temps dt , dans un repère donné. (On appelle événement l'ensemble des quatre coordonnées spatiales et temporelle). En relativité restreinte, ce n'est plus ni l'intervalle spatial,

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

ni l'intervalle temporel

dt ,

qui sont invariants dans un changement de système de coordonnées, mais une combinaison quadri-dimensionnelle des deux,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2).$$

Il s'agit là d'une généralisation à quatre dimensions de la relation de Pythagore, mais dans laquelle l'espace et le temps se soustraient au lieu de s'ajouter. L'espace-temps décrit par une telle « métrique », initialement introduit par Poincaré en 1906, est appelé *espace-temps de Minkowski*.

Les longueurs des objets semblent alors se contracter dès que leur vitesse relative se rapproche de la vitesse de la lumière¹, ce qui signifie que l'angle de rotation dans l'espace-temps s'accroît. Nous n'en avons pas l'expérience directe, tout simplement parce nous demeurons limités, dans notre expérience courante, à de toutes petites vitesses relatives (même les 100 km/s atteints par un vaisseau spatial ne représentent qu'1/3 000^e de la vitesse de la lumière). Nous sommes dans la même situation, par rapport à l'axe des temps que par rapport à la Lune, ce qui la faisait confondre avec un disque plat. Il y a aussi une différence essentielle avec les rotations dans l'espace ordinaire à 3 dimensions : bien que temps et espace se combinent en un authentique espace-temps, ils n'ont pas pour autant le même statut dans cette combinaison. Au lieu de s'ajouter dans la relation de Pythagore généralisée qui les unit, ils se soustraient. Autrement dit ce sont des *rotations hyperboliques* au lieu d'être des *rotations sphériques* (fig. 4.3 et 4.4).

1. La vitesse de la lumière dans le vide est égale à $c = 299\,792\,458$ m/s.

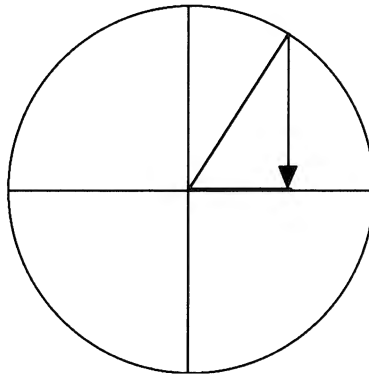


Figure 4.3. Rotation sphérique.

Dans une telle rotation, la longueur projetée est toujours inférieure à la longueur « vraie » (l'invariant de longueur) : il y a contraction (apparente) des longueurs.

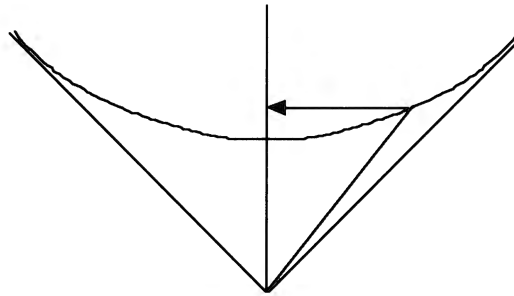


Figure 4.4. Rotation hyperbolique.

Dans ce cas, la longueur projetée est supérieure à la longueur invariante. C'est ce qui arrive pour le temps par rapport à l'invariant spatio-temporel. Il y a « dilatation » (apparente) du temps.

En conséquence, contrairement à ce qui se passe dans l'espace à trois dimensions, où l'on peut faire un tour complet, ceci est exclu dans l'espace-temps. Les rotations spatio-temporelles sont limitées à 45° , ce qui correspond à l'indépassabilité de la vitesse de la lumière. Ce point n'est pas secondaire, car il assure la causalité, sépare le passé et le futur et interdit de retourner dans son propre passé (fig. 4.5)!

Dans ce cadre, la vitesse de la lumière joue un rôle semblable au point de fuite dans un effet de perspective (fig. 4.6). Si nous regardons la photographie de deux rails de chemin de fer partant à l'infini, nous les voyons rejoindre apparemment leur point de fuite, et nous voyons les traverses, que nous savons pourtant également espacées dans l'espace, se rapprocher les unes les autres de plus en plus sur la photographie tout en restant en nombre infini. Si nous avançons le long des rails, aussi loin que nous allions, et si nous reprenons une photo, nous reverrons exacte-

ment la même chose, nous ne nous serons pas rapprochés de l'horizon. De même, la vitesse de la lumière n'est en fait rien d'autre que l'infini quadri-dimensionnel projeté dans le sous-espace tridimensionnel.

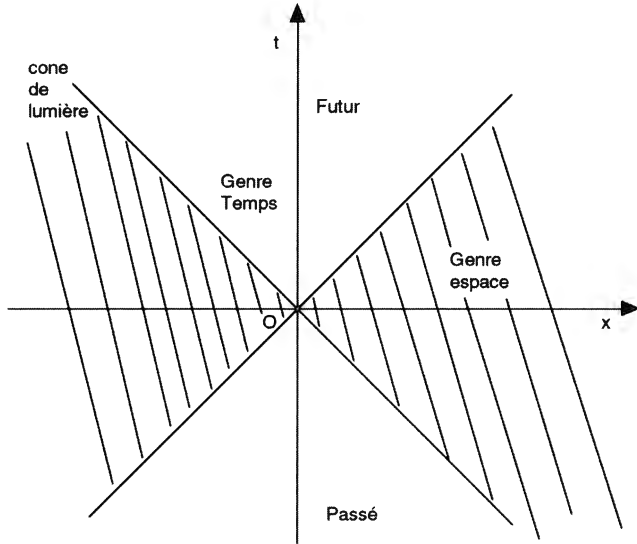


Figure 4.5. Les rotations dans l'espace-temps que l'on identifie au mouvement (dans l'espace au cours du temps) ne sont pas tout à fait similaires aux rotations dans l'espace tridimensionnel.

En effet, ce sont des rotations hyperboliques qui sont limitées à un certain « angle » de rotation (45° si on prend une même unité pour l'espace et le temps). Cette limite est le cône de lumière, qui correspond à la vitesse invariante limite (celle de toute particule de masse nulle dans le vide). Cette propriété sépare le passé du futur et assure la causalité.

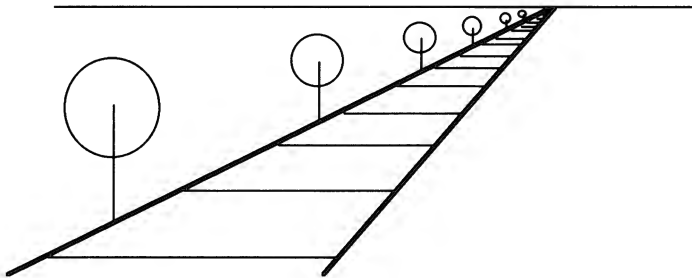


Figure 4.6. Point de fuite à l'horizon dans un effet de perspective (voir texte).

Encadré 4.3 : Loi de composition des vitesses en relativité restreinte

Il en est de même des vitesses en relativité restreinte, qu'on peut ajouter sans fin, sans jamais s'approcher de la vitesse de la lumière dont la nature est celle d'un tel horizon, comme le montre la loi de composition des vitesses,

$$u \oplus v = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} < c$$

où u et v sont deux vitesses qui se combinent pour donner la somme ci-dessus, laquelle n'est pas égale à $u + v$ comme dans la théorie galiléenne. Cette somme généralisée reste toujours inférieure à la vitesse de la lumière c .

Dans ce cadre explicatif spatio-temporel où la valeur numérique de l'instant donné par une horloge n'est qu'une projection sur l'axe du temps, de même que la longueur observée d'un objet n'est que la projection sur un axe spatial de sa longueur invariante, les effets relativistes qui ont pût paraître étranges et paradoxaux deviennent aisés à comprendre.

Ainsi deux événements simultanés dans un repère peuvent ne pas l'être dans un autre. Il s'agit là encore d'un simple effet de projection (fig. 4.7) : de même, comme notre vision est bidimensionnelle, nous avons l'expérience de voir au même point de notre oeil des objets dont nous savons qu'ils sont situés à des distances différentes.

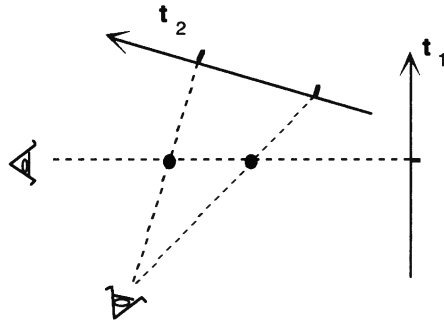


Figure 4.7. La simultanéité ou non-simultanéité d'un événement dépend du repère.

On le comprend très bien en se souvenant qu'en relativité restreinte le temps, comme les variables spatiales, est la projection sur un axe de la « longueur » spatio-temporelle totale. Ainsi deux événements peuvent nous apparaître simultanés dans un repère (de même que deux points situés à des distances différentes dans l'espace peuvent être vus par notre oeil au même endroit) alors qu'ils ne le seront pas dans un autre.

Un des paradoxes de la relativité restreinte (paradoxe au sens d'un énoncé étonnant mais vrai, non d'une contradiction) qui a le plus marqué les esprits est le paradoxe de Langevin, ou paradoxe des jumeaux. Deux jumeaux se séparent, l'un restant sur Terre, l'autre partant dans un vaisseau spatial à une vitesse proche de celle de la lumière. Quand celui-ci revient, il constate qu'il est plus jeune que son jumeau. Ce paradoxe se comprend très bien en s'appuyant sur le même constat : les temps observés dans un repère sont une projection du temps vrai (propre) donné par l'horloge entraînée avec les événements dont on mesure la chronologie (fig. 4.8). On comprend alors comment il est possible que la *dilatation des temps*¹ se fasse, pour le mouvement inertiel, de manière symétrique. Tant qu'il n'y a aucune accélération, un vaisseau en mouvement par rapport à la Terre verra les intervalles de temps des événements terrestres dilatés par rapport à son propre temps, et la réciproque sera vraie : les intervalles de temps mesurés sur Terre pour les événements du vaisseau apparaîtront également dilatés, car chacun des deux est projeté sur le repère de l'autre (fig. 4.8). Par contre, si l'on veut re-synchroniser les horloges au même point, il faut que le vaisseau fasse demi-tour, et l'accélération nécessaire à cette opération brise la symétrie. Le temps passé sur Terre, sera alors plus long que celui donné par les horloges du vaisseau.

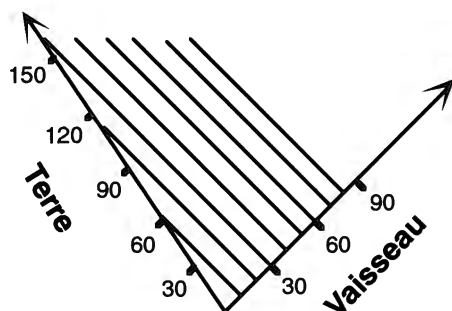


Figure 4.8. Les intervalles de temps propre écoulé sur le vaisseau sont vus sur Terre comme dilatés par effet de projection.

La réciproque est vraie, du fait de la symétrie du problème (la Terre et le vaisseau sont en mouvement relatif, il n'y a aucun mouvement intrinsèque de l'une ou de l'autre) : les intervalles de temps propre écoulé sur Terre sont vus sur le vaisseau également comme plus long.

1. Expression impropre : ce sont les coordonnées temporelles projetées qui apparaissent « dilatées » par effet de projection dans une rotation hyperbolique.

4.3

Relativité généralisée (gravitation et mouvement accéléré)

Avec la compréhension de la relativité de la gravitation, une nouvelle étape essentielle a été franchie par Einstein en 1915. De même qu'un observateur, entraîné dans le mouvement rectiligne uniforme d'un véhicule, ne sent pas ce mouvement, un observateur en chute libre dans un champ de gravitation (c'est-à-dire en mouvement uniformément accéléré), ne sent plus son propre poids (fig. 4.9). Autrement dit, pour lui la gravitation a disparu, il est en *apesanteur* : dans le repère uniformément accéléré, le mouvement du corps, qui est parabolique par rapport à la Terre, redevient rectiligne uniforme ou même, s'annule, le corps apparaissant comme au repos. La gravitation elle-même n'est pas absolue, mais relative au choix du système de référence. C'est ce qu'Einstein a réalisé en 1907, et qui l'a amené à poser le *principe d'équivalence locale* entre un champ de gravitation et un champ d'accélération. C'est ainsi que la théorie d'Einstein est à la fois théorie de la *relativité généralisée du mouvement*, puisqu'elle s'applique aussi aux mouvements accélérés, et *théorie relativiste de la gravitation*. Il a également été inspiré pour sa construction par l'expérience du baquet tournant de Newton et le principe de Mach (voir fig. 4.10).

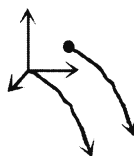


Figure 4.9. Le mouvement de chute accéléré de forme parabolique par rapport à la Terre disparaît dans un repère qui est lui-même en chute libre dans le champ de gravitation.

Par rapport à un tel repère, il y a repos ou mouvement rectiligne uniforme : ni la géométrie (la forme parabolique), ni la dynamique (l'accélération attribuée en théorie newtonienne à une « force » de gravitation) n'ont d'existence absolue.

La compréhension par Einstein et Poincaré de l'effet d'induction électromagnétique comme effet de relativité restreinte du mouvement avait anticipé sur cette découverte. En effet, on y voyait déjà un champ magnétique apparaître, ou disparaître, du seul fait du changement de l'état de mouvement relatif de l'observateur. Le point remarquable est que le même champ magnétique apparaît, que l'on déplace devant soi un fil électrique, ou que l'on se déplace de manière équivalente devant le fil sans y toucher. Voilà qui pouvait encore sembler magique. La solution au problème était l'existence du champ électromagnétique dans sa globalité et, sachant qu'un mouvement est une rotation dans l'espace-temps, l'annulation dans le repère au repos (qui correspond à une certaine orientation relative dans l'espace-temps) de certaines de ses composantes. (C'est un effet de l'espace-temps à quatre dimensions similaire à celui du cube dans l'espace ordinaire à trois dimensions, globalement invariant, mais dont chaque face sera vue en projection, certaines pouvant ainsi apparemment disparaître : on peut faire disparaître la face aussi bien en tournant le cube qu'en tournant soi-même autour du cube.) Cependant, avec cette compréhension relativiste de l'induction électromagnétique, l'étape de la possibilité de disparition totale d'un champ dans certains repères n'avait pas été franchie.

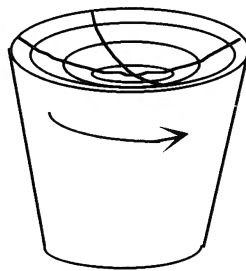


Figure 4.10. Expérience du baquet tournant de Newton.

Le mouvement de rotation semble pouvoir être caractérisé de manière intrinsèque, par la déformation de la surface du liquide. La solution suggérée par Mach et apportée par Einstein (sous une forme différente) à ce problème est que cette rotation est bien relative, mais à des corps très lointains (en dernier recours, à l'Univers dans son ensemble).

Un autre aspect essentiel de la relativité généralisée d'Einstein concerne la géométrie de l'espace-temps. En relativité restreinte, espace et temps sont devenus relatifs, mais l'espace-temps pris globalement reste absolu et non structuré : c'est un cadre rigide et vide. La relativité générale introduit un changement conceptuel majeur, anticipé par Leibniz et Berkeley, mais qui n'avait jamais pu être construit explicitement : l'espace-temps (le

cadre, le contenant) devient souple, structuré (il possède une propriété géométrique appelée courbure ; voir figs. 4.11-4.13), dynamique, et mis en correspondance avec son contenu (la matière et l'énergie).

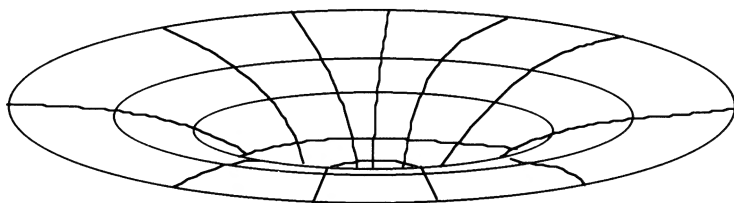


Figure 4.11. Courbure de l'espace-temps (modèle simplifié à deux dimensions).
Dans un tel espace-temps courbe, la particule peut aller localement « tout droit » (tel un cycliste sur un anneau de vitesse aux virages relevés) et décrire globalement une orbite fermée.

C'est là un achèvement d'autant plus remarquable que l'espace-temps n'est en rien un « objet », il n'est pas à la matière ce que la toile est à la peinture. C'est une abstraction transcendant les objets particuliers, puisqu'il est défini, par des relations géométriques entre les inter-distances entre objets : remplacer les objets-tests par d'autres, ne change rien à ces relations, elles demeurent même en leur absence. Ceci peut être éprouvé à l'aide de rayons lumineux, dont la déviation permet de valider directement la courbure de l'espace-temps.

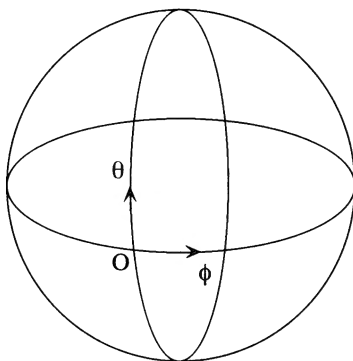


Figure 4.12. La surface d'une sphère comme espace à deux dimensions.
Un tel espace « sphérique », ainsi que l'a découvert Gauss, peut se caractériser globalement de manière intrinsèque uniquement à l'aide de deux variables internes (telles la longitude et la latitude) sans faire référence à l'espace tri-dimensionnel dans lequel il est plongé. Cette caractérisation se fait à l'aide d'une relation de métrique (qui généralise la relation de Pythagore) qui n'est plus celle d'un espace euclidien.

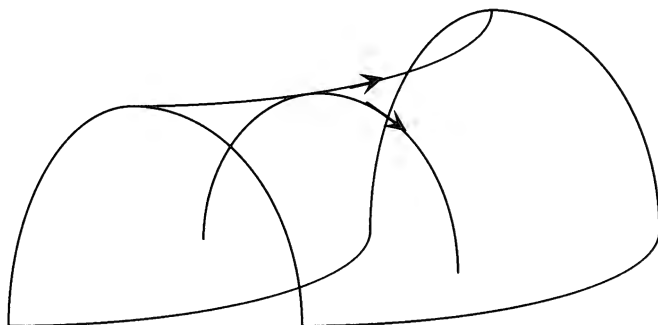


Figure 4.13. Espace à deux dimensions de type hyperbolique.

La découverte de la métrique caractérisant la surface d'une sphère a pu être généralisée par Gauss, Bolay et Lobatchevski à des espaces hyperboliques infinis qui ne sont pas (quand leur courbure négative est constante) plongeables dans l'espace euclidien tridimensionnel.

Encadré 4.4 : Invariant relativiste (relativité générale)

En relativité générale du mouvement, l'invariant relativiste dans un changement de repère est une nouvelle fois généralisé. Son expression minowskienne de relativité restreinte,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2),$$

reste valable localement (en un point) dans un système de coordonnées en chute libre, en raison du principe d'équivalence. La forme plus générale de la métrique, incluant l'existence du champ de gravitation et la possibilité de se placer dans un système de coordonnées curvilignes quelconque, s'écrit :

$$ds^2 = g_{jk}(x,y,z,t) dx^j dx^k.$$

Cette notation, qu'on doit à Einstein, signifie qu'on effectue la somme sur les indices semblables situés en haut et en bas. Les indices courent de 0 à 3, où $x^0 = t$, $x^1 = x$, $x^2 = y$ et $x^3 = z$. Les coefficients g_{jk} , qui valaient (1, -1, -1, -1) et 0 ailleurs dans le cas de la relativité restreinte, forment maintenant une matrice (un « tenseur ») et ne sont plus constants, mais deviennent des fonctions des coordonnées.

Ce sont eux qui généralisent le potentiel newtonien. Celui-ci n'était donné que par une seule fonction des coordonnées, c'est ce qu'on appelle un potentiel scalaire. Le potentiel électromagnétique avait été une première généralisation du potentiel newtonien : on était passé dans ce cas à un potentiel vectoriel, c'est-à-dire représenté par un vecteur comprenant quatre valeurs (trois pour sa partie magnétique et une pour sa partie électrique, de même que les coordonnées spatio-temporelles). En relativité générale, le potentiel devient tensoriel, et prend de plus un nouveau sens géométrique de définition de la structure de l'espace-temps, si bien que ses coefficients sont appelés potentiels de métrique.

Il s'agit là d'un changement de niveau très profond pour les théories de la relativité, qui s'accompagne d'un accroissement équivalent de leur ambition explicative. Dans le cadre newtonien, le champ de gravitation apparaissait comme un *champ universel*, une force apparemment irrépressible, qu'on croyait forcément existante. Pourtant, la théorie de la relativité généralisée (du mouvement) établit qu'il n'existe pas en soi, mais seulement de manière relative. La gravitation existe dans un repère, mais pas dans un autre : autrement dit son existence même résulte du changement de repère. Un même corps, chutant vers le sol, est décrit dans le repère lié à la Terre comme tombant, lié, entraîné, soumis à la force d'attraction newtonienne, et simultanément décrit dans un repère accéléré qui suit sa chute comme immobile, libre, n'étant soumis à aucune force ! Ainsi la triple correspondance (relativité-vide d'existence absolue-liberté) s'exprime complètement dans la théorie d'Einstein :

** le mouvement accéléré ainsi que la gravitation, sont relatifs au système de référence ;*

** il existe un système, celui qui est entraîné avec le corps, où la gravitation disparaît localement ;*

** dans ce système, les lois du mouvement sont celles du mouvement galiléen libre.*

Pour paraphraser Galilée, la *gravitation est comme rien*, la gravitation est comme si elle n'était pas. C'est le couple formé du corps considéré et du système de référence qui est signifiant, c'est la relation entre eux qui fait sens, *l'objet en soi* ou le *référentiel seul* (qui est lui-même toujours concrètement manifesté par un autre corps) n'ont aucun sens ni physique, ni d'aucune sorte.

L'outil utilisé par Einstein pour construire la théorie de la relativité généralisée sur cette base de réflexion est la construction d'une « dérivée covariante » (voir encadré 4.5), à partir de laquelle les équations du mouvement peuvent être écrites sous forme d'équation des géodésiques.

En terme de la dérivée covariante, cette équation s'écrit sous la forme de compacité maximale :

$$Du^{\mu} = 0 .$$

Cette forme est celle de l'équation du mouvement galiléen libre, inertiel, dépourvu de toute force, bien qu'il s'agisse là de l'équation du mouvement d'un corps dans un champ de gravitation aussi complexe qu'il soit. Le processus de déploiement (Alunni et Nottale, 2009) de cette équation s'effectue à travers l'expression de la dérivée covariante d'un vecteur (voir encadré 4.5).

**Encadré 4.5 : Dérivée covariante et équations d'Einstein
en relativité généralisée**

La dérivée covariante d'un vecteur contravariant s'écrit (ici sous sa forme de dérivée partielle) :

$$D_{\mu} A^{\nu} = \partial_{\mu} A^{\nu} + \Gamma^{\nu}_{\rho\mu} A^{\rho}.$$

Appliquée à la quadrivitesse $u^{\mu} = dx^{\mu} / ds$, elle donne à l'équation du mouvement une forme « newtonienne » où apparaît une « force » gravitationnelle généralisée :

$$d^2 x^{\mu} / ds^2 + \Gamma^{\mu}_{\nu\rho} (dx^{\nu} / ds) (dx^{\rho} / ds) = 0.$$

Le déploiement se poursuit en remplaçant les symboles de Christoffels par leurs expressions en fonction des potentiels de métrique,

$$\Gamma^{\mu}_{\nu\rho} = (1/2) g^{\mu\lambda} (\partial_{\rho} g_{\lambda\nu} + \partial_{\nu} g_{\lambda\rho} - \partial_{\lambda} g_{\nu\rho}),$$

Les potentiels de métrique sont à leur tour solutions des équations du champ d'Einstein (c'est-à-dire ici de la géométrie de l'espace-temps), qui prennent elles-mêmes une forme compactée,

$$R_{\mu\nu} - (1/2) R g_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu},$$

laquelle se déploie à travers l'expression du tenseur de Ricci en fonction des Christoffels :

$$R_{\mu\nu} = \partial_{\rho} \Gamma^{\rho}_{\mu\nu} - \partial_{\nu} \Gamma^{\rho}_{\mu\rho} + \Gamma^{\rho}_{\mu\nu} \Gamma^{\lambda}_{\rho\lambda} - \Gamma^{\rho}_{\mu\lambda} \Gamma^{\lambda}_{\nu\rho}$$

En effet, dans le but d'élaborer sa théorie de la relativité du mouvement généralisée, Einstein a défini trois principes premiers, qui ont transformé profondément la manière de faire de la physique. Il s'agit du principe de relativité, dont Einstein a reformulé et généralisé l'énoncé initial dû à Galilée et repris par Poincaré, du principe de covariance générale et du principe d'équivalence. Puis il a défini un outil physico-mathématique, appelé aujourd'hui dérivée covariante, chargé de mettre en oeuvre ces principes, en connexion avec un autre principe essentiel relié à la description géométrique : le principe géodésique, qui est à la fois une généralisation du principe de Fermat-Maupertuis et une explicitation relativiste du principe d'action stationnaire.

Nous allons ici rappeler la nature de ces principes et leur étroite inter-relation, ainsi que celle de la dérivée covariante associée, en nous plaçant dans le cadre élargi d'une relativité non forcément réduite à celle du mouvement. Ceci nous permettra de montrer ensuite comment ces principes généraux peuvent être appliqués à la construction de nouveaux outils, dans le cadre de la théorie de la relativité des échelles.

**Le principe de relativité, tel qu'Einstein l'a posé en 1916, énonce que « les lois de la physique doivent être d'une nature telle qu'elles s'appliquent*

dans des systèmes de référence de mouvement quelconque » (postulat de la relativité du mouvement).

* *Le principe de covariance général* [Einstein 1916] exige que « *les lois générales de la nature doivent être exprimées par des équations qui sont valides pour tous les systèmes de coordonnées, c'est-à-dire covariantes (de manière générale) dans toute substitution, quelle qu'elle soit.* » Einstein rajoute aussitôt, après cette définition : « *il est clair qu'une théorie physique qui satisfait à ce postulat satisfera aussi au postulat de relativité générale.* » Quelques lignes plus loin, il identifie cette exigence avec le fait de ne pas donner la préférence à certains systèmes de coordonnées plutôt qu'à d'autres. Weinberg (1972) l'exprime de la manière suivante : « *l'équation conserve sa forme sous une transformation générale de coordonnées $x \rightarrow x'$.* »

* *Le principe d'équivalence* a été établi par Einstein neuf ans plus tôt. À partir de la remarque qu'une personne qui tomberait en chute libre dans un champ de gravité ne sentirait plus son propre poids, il pose l'équivalence locale entre un champ d'accélération uniforme et un champ de gravitation : « *Nous allons [...] faire l'hypothèse de la complète équivalence physique entre un champ de gravitation et l'accélération correspondante du système de référence. [...] Cette hypothèse étend le principe de relativité au cas d'un mouvement de translation uniformément accéléré du système de référence.* »

Ce principe implique, d'une part, qu'on peut faire localement disparaître le champ de gravitation, en se plaçant dans le repère accéléré entraîné (qui deviendra un référentiel localement géodésique en relativité générale) : l'existence même de la gravitation au niveau local devient ainsi relative au choix du système de coordonnées et, d'autre part, qu'on peut, inversement, fabriquer par le choix d'un système accéléré une « gravité artificielle » localement indiscernable de la gravité « naturelle ».

* *Le principe géodésique* pose que les trajectoires des particules libres dans le champ de gravitation (c'est-à-dire qui ne sont soumises à aucune autre « force ») sont données par les géodésiques de l'espace-temps. L'équation des géodésiques se déduit alors du principe de stationnarité de l'invariant de longueur-temps (identifié au temps propre). Sachant que l'action est automatiquement proportionnelle à l'invariant de longueur en théorie géométrique de la relativité (car elle doit être un scalaire invariant de la théorie), principe géodésique et principe d'action stationnaire coïncident dans un tel cadre. Autrement dit, l'action trouve son sens complet dans le cadre des théories de la relativité, dans lesquelles le principe de moindre action

se ramène à un principe de Fermat-Maupertuis (de minimisation du temps propre).

Ces principes fondateurs se ramènent tous, *in fine*, au seul principe de relativité. On constate en effet que, dans leur formulation einsteinienne :

- * le principe de relativité est un principe très général portant sur les lois fondamentales de la physique ;
- * le principe de covariance en est la traduction opérante en ce qui concerne notre mode d'expression de ces lois, c'est-à-dire les équations de la physique ;
- * le principe d'équivalence en est la version spécifique à la gravitation.

Ainsi la validité des lois dans tout système de référence (principe de relativité) se traduit par une invariance de forme des équations dans un changement de référentiel (principe de covariance). Enfin on précise la nature des changements de référentiel qui sont spécifiques à la description d'un champ ou phénomène particulier, en l'occurrence la prise en compte des référentiels accélérés pour rendre compte du champ de gravitation (principe d'équivalence comme principe de relativité de la gravitation).

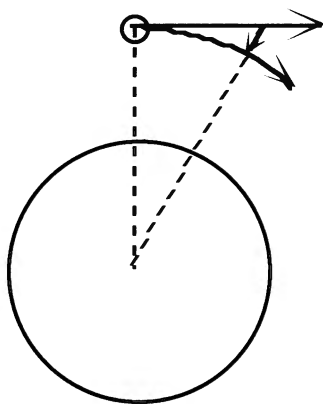


Figure 4.14. « La lune tombe comme la pomme. »

Newton a pu unifier la gravité locale (la pomme tombe) avec la gravitation des astres (la lune ne tombe jamais) en se fondant sur la relativité et la loi de l'inertie galiléenne. D'après celle-ci, la lune ayant une certaine vitesse à un moment donné devrait poursuivre son mouvement et s'éloigner de la Terre. Comme ce n'est pas le cas, elle « tombe » en fait à chaque instant vers la Terre, comme la pomme.

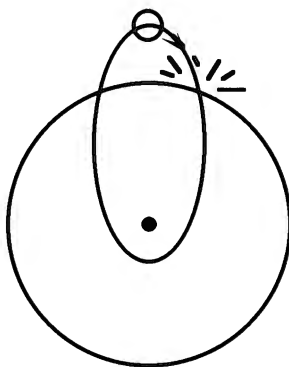


Figure 4.15. « La pomme ne tombe pas comme la lune. »

La version einsteinienne de la théorie de la gravitation (relativité généralisée) prend le contre-pied de l'argument newtonien (fig. 4.14). Une pomme semble tomber vers la Terre, mais c'est une illusion liée au choc avec le sol. Du seul point de vue de la gravitation elle-même, si le sol n'était pas là, l'objet poursuivrait son trajet sur une orbite fermée et remonterait au bout de quelques dizaines de minutes. La pomme, comme la lune, n'est rien d'autre qu'un satellite orbitant autour de la Terre suivant une géodésique de l'espace-temps courbé par sa masse, c'est-à-dire en mouvement localement libre dans cet espace-temps.

Le principe de covariance a été critiqué par Weinberg (1972), au point de lui dénier toute efficacité et de considérer que la théorie de la relativité générale se construit en fait comme manifestation du seul principe d'équivalence. Il est vrai que l'énoncé donné par Einstein n'est pas assez précis, mais la propre pratique d'Einstein dans son utilisation du principe de covariance, comme outil de construction de la théorie, nous semble éclairer son sens de manière suffisante pour le compléter et lui redonner son efficacité. La critique repose sur le fait que si l'on écrit une équation de la physique dans un repère quelconque en insérant tous les termes variés qui manifestent la complexité du repère, on obtient une équation extrêmement compliquée qui ne changera plus de forme dans un nouveau changement de repère : une telle équation n'est pas pour autant covariante, contrairement à la définition donnée par Einstein. Mais, dans la pratique, la recherche de covariance des équations de la physique n'est pas un procédé statique s'appliquant à l'intérieur d'une théorie donnée, mais bien un procédé dynamique de passage d'une théorie à une autre : ayant mis les équations de la physique sous une forme simple conservée dans certains changements de repère (par exemple les repères inertiels à vitesse constante), on exigera de garder la même forme simple, y compris dans des changements de repère plus complexe (par exemple les repères accélérés).

On peut alors distinguer :

* Une covariance faible, dans laquelle la forme conservée dans les nouveaux changements de repère est la même que dans la théorie précédente : il en est ainsi des équations du champ d'Einstein, qui ont la même structure que l'équation de Poisson qu'elles généralisent (mais en gardant comme elle un terme de source, ce qui a toujours fait considérer la relativité générale comme une théorie provisoire par son créateur).

* Une covariance forte, où la forme recherchée est la plus simple possible, celle d'équations du vide : il en est ainsi des équations du mouvement d'Einstein, comme rappelé ci-dessus, qui sont écrites comme équations des géodésiques sous forme d'équations du mouvement galiléen libre dans le vide. Ces équations s'obtiennent aussi bien comme manifestations du principe d'équivalence, du principe de covariance forte, que du principe de moindre action devenu principe géodésique (Landau et Lifchitz, 1970).

4.4

La théorie de la relativité d'échelle

Le *principe de relativité d'échelle* est une extension aux changements d'échelle du principe de relativité. Un tel concept s'impose comme principe premier contraignant la description d'un *espace-temps continu non différentiable*. Ici, la non-différentiabilité ne signifie pas qu'on ne puisse différentier : le postulat de continuité, qui est gardé dans cette approche, implique qu'on puisse toujours définir des éléments différentiels. Son sens est que le rapport de tels éléments différentiels, comme dans la définition de la vitesse $v = dx/dt$, peut ne pas être défini quand on fait tendre dt vers zéro et qu'on passe à la limite $dt = 0$ (qu'il devienne infini ou qu'il fluctue indéfiniment). C'est donc la dérivée qui n'est plus définie au sens ordinaire dans un espace-temps non différentiable.

Cet abandon de l'hypothèse de différentiabilité implique, quand on garde la continuité, une *dépendance explicite des coordonnées en fonction des résolutions*, autrement dit une *géométrie fractale pour l'espace-temps*. En conséquence, la description physique d'un tel espace-temps n'implique pas pour autant l'abandon des équations différentielles, à condition que celles-ci agissent également dans l'« espace des échelles », qui est l'espace des résolutions (voir plus loin). Comme on le verra dans l'exposé qui suit (Nottale, 2001, 2002), différents niveaux de descriptions des lois d'échelles physiquement possibles (invariantes d'échelles, puis covariantes d'échelle, ce qui signifie une invariance de forme des lois d'échelle) peuvent alors être proposés, depuis l'autosimilarité la plus simple jusqu'à des lois d'échelle non linéaires (« *dynamique d'échelle* »), en incluant les couplages échelle-mouvement qu'on identifie aux *transformations de jauge* (qu'on évoquera plus loin). Les effets induits par les structures internes non différentiables sur la dynamique transforment alors la mécanique classique en une mécanique de type quantique...

Introduction

La théorie de la relativité d'échelle (Nottale, 1989, 1992, 1993, 2002) consiste à généraliser le principe de relativité en l'appliquant, non seulement au mouvement, mais aussi aux transformations d'échelle (en particulier aux transformations des résolutions spatio-temporelles). Dans la formulation d'Einstein, le principe de relativité consiste à affirmer que les lois fondamentales de la nature doivent être valides dans tout système de coordonnées, quel que soit son état. Comme on l'a vu, depuis Galilée, ce principe avait été appliqué aux états de position (origine et orientation des axes) et de mouvement (vitesse, accélération) du système de coordonnées, états qui ont la propriété de n'être jamais définissables de manière absolue, mais seulement de manière relative. L'état d'un système de référence ne peut être défini que par rapport à un autre repère.

Il en est de même en ce qui concerne les changements d'échelle. L'échelle d'un système ne peut être définie que par rapport à un autre système, et possède donc bien la propriété fondamentale de relativité : seuls des rapports d'échelle ont un sens, jamais une échelle absolue. Dans la nouvelle approche, on réinterprète les *résolutions*, non plus seulement comme propriété de l'appareil de mesure et/ou du système mesuré, mais comme *propriété géométriques de l'espace-temps*, caractérisant l'état d'échelle du référentiel au même titre que les vitesses caractérisent son état de mouvement. Ainsi l'ensemble des résolutions définit un véritable *espace des échelles*, de même que les positions et les instants définissent l'*espace-temps standard*. Le principe de relativité d'échelle consiste alors à affirmer que les lois fondamentales de la nature s'appliquent quel que soit l'état d'échelle du système de coordonnées.

Quelle est la nécessité d'ajouter un tel principe premier à la physique fondamentale ? Il s'impose dès l'instant où l'on veut *généraliser la description actuelle de l'espace et du temps*. Celle-ci se cantonne en général à des variétés différentiables (même si des singularités sont possibles en certains points particuliers). Une voie de généralisation de la physique actuelle consiste donc à tenter d'abandonner l'hypothèse de différentiabilité des coordonnées spatio-temporelles, qui était à la base de la relativité restreinte et générale d'Einstein et de toute la physique. Comme nous allons le constater, la conséquence principale d'un tel abandon est que *l'espace-temps devient fractal*, au sens où il acquiert une dépendance explicite (qui va jusqu'à la divergence) en fonction des résolutions spatio-temporelles.

Abandon de l'hypothèse de différentiabilité de l'espace-temps

Si l'on analyse l'état de la physique fondée sur le principe de relativité jusqu'à Einstein, on constate que c'est l'ensemble de la physique classique, y compris la théorie de la gravitation à travers la relativité généralisée du mouvement, qui est fondée sur ce principe. La physique quantique, bien que compatible avec les relativités galiléenne et restreinte du mouvement, semble y échapper en ce qui concerne ses fondations. On peut alors se demander si une nouvelle généralisation de la relativité qui inclurait dans ses conséquences les effets quantiques reste possible. Or *généraliser la relativité, c'est généraliser les transformations envisageables entre systèmes de coordonnées*, donc la définition de ce que sont les systèmes de référence possibles, et finalement les concepts d'espace et d'espace-temps. La relativité générale d'Einstein repose sur l'hypothèse que l'espace-temps est riemannien, c'est-à-dire descriptible par une variété au moins deux fois différentiable : autrement dit, on peut définir un continuum d'événements spatio-temporels, puis des vitesses qui sont leurs dérivées, puis des accélérations par une nouvelle dérivation. Dans ce cadre, les équations d'Einstein sont les plus générales des équations les plus simples qui soient covariantes (c'est-à-dire invariantes de forme) dans des transformations de coordonnées deux fois différentiables (voir encadré 4.5).

De même que le passage de la relativité restreinte à la relativité généralisée est permis par un abandon d'hypothèse restrictive, celle de la « platitude » (son caractère euclidien ou pseudo-euclidien) de l'espace-temps à travers la prise en considération d'espaces-temps courbes, une nouvelle ouverture est donc possible par l'abandon de l'hypothèse de différentiabilité. Il s'agira de décrire un continuum spatio-temporel qui ne soit plus forcément partout ou presque partout différentiable.

Espace-temps fractal

L'outil essentiel de la physique, depuis Galilée, Leibniz et Newton, ce sont les *équations différentielles* (voir encadré 4.6). Abandonner l'hypothèse de la différentiabilité de l'espace-temps, donc des systèmes de coordonnées et des transformations entre ces systèmes, n'est-ce pas abandonner les équations différentielles ?

Ce problème crucial peut en fait être contourné grâce à l'intervention du concept de géométries fractales en physique de l'espace-temps. Par leur biais, on peut traiter de non-différentiabilité à l'aide d'équations

différentielles. Ainsi, la deuxième étape de la construction de la théorie consiste à retrouver l'outil physico-mathématique qui semblait avoir été perdu dans une telle généralisation, par l'élaboration d'un double calcul différentiel (dans l'espace ordinaire et dans l'espace des échelles).

Encadré 4.6 : Équations différentielles

La plupart des équations de la physique s'écrivent sous forme d'équations différentielles. Celles-ci mettent en œuvre la méthode cartésienne consistant à diviser un système complexe, indescriptible directement dans sa globalité, en petites parties plus simples dont les relations entre elles et avec des effets extérieurs sont, elles, possibles à décrire. Les caractéristiques du système dans son ensemble sont alors obtenues par une intégration de ces équations. Par exemple, ayant considéré un petit déplacement dans l'espace entre x et $x + dx$, où dx est un élément différentiel tendant vers 0, la manière dont une grandeur physique $f(x)$ varie dans un tel déplacement infinitésimal (elle devient $f + df$) sera décrite par une équation différentielle, impliquant la dérivée première df/dx , seconde d^2f/dx^2 , etc.

Il est remarquable que les solutions de telles équations peuvent montrer une grande diversité incluant des caractéristiques nouvelles par rapport à l'équation elle-même, du fait du processus d'intégration.

Dépendance des coordonnées en fonction des résolutions

Cette possibilité résulte du théorème suivant (Nottale, 1993), lui même conséquence d'un théorème du mathématicien Lebesgue :

Une courbe continue, mais partout ou presque partout non dérivable, possède une longueur dépendant explicitement de la résolution à laquelle on la considère, et tendant vers l'infini quand l'intervalle de résolution tend vers zéro.

Autrement dit, *une telle courbe est fractale* au sens général donné par Mandelbrot (1975, 1982) à ce terme. Appliqué à un système de coordonnées d'un espace-temps non différentiable, ce théorème implique une géométrie fractale (Nottale et Schneider, 1984 ; Ord, 1983 ; Nottale, 1989, 1993) pour l'espace-temps, aussi bien que pour le référentiel. De plus, c'est la dépendance en fonction des résolutions elles-mêmes qui résout le problème posé. Considérons en effet la définition de la dérivée, appliquée par exemple à une coordonnée (ce qui définit la vitesse) :

$$v(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} [x(t+dt) - x(t)]/dt$$

La non-différentiabilité n'est rien d'autre que la non-existence de cette limite. Mais on peut remarquer qu'un passage effectif à la limite est en réalité physiquement impossible. En effet, l'atteindre effectivement nécessiterait une énergie infinie d'après la relation temps-énergie de Heisenberg. La méthode de la théorie de la relativité d'échelle consiste alors tout simplement à toujours considérer des éléments différentiels de plus en plus petits et tendant vers zéro, mais *sans passer à la limite*. Au lieu de se placer uniquement à la limite $dt = 0$ comme dans le calcul différentiel ordinaire, on garde toute l'information de ce qui se passe pendant que dt tend vers 0, en faisant de l'élément différentiel dt , qui représente la résolution du point de vue théorique (elle résulte d'un découpage de plus en plus fin de l'intervalle de temps t), une variable explicite.

Une coordonnée $x(t)$ devient alors une coordonnée fractale $x(t, dt)$, et la vitesse est redéfinie comme $v(t, dt)$, fonction explicitement dépendante de la « variable d'échelle » dt . On résout ainsi le problème en ne cherchant plus à passer à la limite, mais seulement à suivre le comportement de cette fonction quand on va vers la limite, c'est-à-dire au cours des zooms successifs sur l'intervalle dt (de même qu'on peut se diriger vers un horizon sans jamais l'atteindre). L'intérêt d'une telle méthode est, de plus, que quand la fonction considérée est différentiable, on la retrouve comme cas particulier pour $dt = 0$, $v(t, 0)$, de la nouvelle fonction à deux variables, $v(t, dt)$. Autrement dit, la nouvelle représentation, résultant d'une généralisation, contient la précédente comme cas particulier, ce qui signifie qu'il ne saurait y avoir de contradiction ou d'opposition entre elle et le calcul différentiel ordinaire. On peut même remarquer que cette nouvelle forme de calcul différentiel est (par construction) beaucoup plus proche de la vraie pratique en physique que ne l'était la définition usuelle avec passage à la limite.

Description de processus non différentiables par des équations différentielles

Ce résultat est une *clé* pour permettre la description de processus non différentiables à l'aide d'équations différentielles. Il mène en effet à *introduire des variables d'échelle de manière explicite dans l'expression des diverses quantités physiques* ainsi que dans les équations fondamentales de la physique. Du point de vue expérimental, ces variables d'échelle (appelées « résolutions » en un sens général) peuvent être le pixel d'une image, la résolution de l'appareil de mesure, l'incertitude finale d'une

mesure, etc. Du point de vue théorique, il s'agit tout simplement des éléments différentiels eux-mêmes.

Ceci signifie qu'une grandeur physique f , qui dépend ordinairement des variables spatio-temporelles x , i.e., $f = f(x)$, doit maintenant être décrite comme dépendant aussi de manière explicite de la résolution ε , $f = f(x, \varepsilon)$. Un tel point de vue est particulièrement bien adapté aux applications en physique (et plus généralement dans toute science s'appuyant sur des mesures) : en effet, toute mesure effective est toujours effectuée à une résolution finie.

Le problème de la description physique de tous les processus où intervient une telle fonction f est maintenant posé autrement. Dans la physique différentiable standard, il s'agit de trouver les équations différentielles qui mettent en oeuvre les dérivées de f par rapport aux coordonnées spatio-temporelles x , c'est-à-dire $\partial f / \partial x$, $\partial^2 f / \partial x^2$, etc., dérivées qui vont intervenir dans les lois du déplacement et du mouvement. La méthode intégro-différentielle consiste, comme on l'a vu (encadré 4.6), à effectuer une telle description locale des déplacements spatio-temporels élémentaires, puis de leurs effets sur les quantités physiques, puis enfin à intégrer pour obtenir les propriétés à grande échelle du système considéré. Une telle méthode a pu être taxée de réductionniste : elle est effectivement adaptée aux problèmes classiques dans lesquelles aucune information nouvelle n'apparaît quand on change d'échelle.

La situation est complètement différente en ce qui concerne les systèmes caractérisés par une géométrie fractale et/ou par la non-différentiabilité. Dans de tels cas, une information nouvelle apparaît quand on change d'échelle, et le projet consistant à vouloir réduire le comportement du système à une échelle donnée (en général grande) à partir de la description faite à une autre échelle (en général, la plus petite échelle possible, $dx \rightarrow 0$) semble perdre tout sens et devenir alors sans espoir. La proposition faite en relativité d'échelle consiste précisément à renoncer à cet espoir et à introduire un nouveau cadre de pensée dans lequel *toutes les échelles coexistent à l'intérieur d'un espace des échelles*, qui reste relatif, et sont *reliées entre elles à travers des équations différentielles d'échelle*.

Équations différentielles d'échelle

En effet, en physique non différentiable, la dérivée ordinaire d'une fonction dans sa définition standard, $\partial f(x) / \partial x = \partial f(x, 0) / \partial x$ (qui est la dérivée de la fonction fractale pour un intervalle de résolution nul, c'est-à-dire à résolution infinie) n'existe plus. Mais la physique d'un processus

donné sera complètement décrite si l'on parvient à connaître $f(x, \epsilon)$, qui reste différentiable (en x et en ϵ) pour toutes les valeurs finies de ϵ . Une telle fonction à deux variables (qui s'écrit plus précisément, pour être complet, $f(x(\epsilon), \epsilon)$ en prenant en compte le fait que la coordonnée elle-même peut devenir une fonction fractale) peut être solution d'équations différentielles impliquant $\partial f(x, \epsilon)/\partial x$ mais aussi $\partial f(x, \epsilon)/\partial \epsilon$.

On peut noter dès maintenant, de ce point de vue, que la variable d'échelle signifiante, dans ces équations différentielles, est le logarithme de la résolution, $\ln(\epsilon/\lambda)$. Ceci peut se justifier mathématiquement (voir encadré 4.7), mais peut également être compris de manière intuitive : par exemple, quand on zoome avec un caméscope, un grossissement continu correspond, non pas à des facteurs 2, 3, 4, 5, etc. (ce qui figerait l'image), mais à 2, 4, 8, 16, 32, etc. Il est d'ailleurs remarquable que, ϵ étant dimensionné, le passage au logarithme implique l'introduction d'une échelle de référence λ , ce qui manifeste une fois de plus la relativité fondamentale des échelles, qui n'ont de sens physique que dans leurs rapports. (Notons que dans la suite nous serons amenés, pour simplifier les notations, à écrire l'élément différentiel dans l'espace des échelles $d\ln \epsilon$ au lieu de l'expression plus correcte $d\ln(\epsilon/\lambda)$, en se fondant sur le fait que λ , étant une constante, n'intervient plus dans la dérivation).

Plus généralement, on sera amené à prendre en compte des lois non-linéaires, du point de vue du mouvement comme des changements d'échelle. Dans le cas des lois du mouvement, il s'agit du passage des simples lois du mouvement inertiel à la dynamique Newtonienne. Dans le cas des lois d'échelle, par analogie, une « dynamique d'échelle » peut être proposée comme généralisation aux lois fractales auto-similaires à dimension fractale constante (qui sont aux échelles ce que l'inertie est au mouvement.)

Dans une telle généralisation, les équations de la physique vont prendre la forme d'équations aux dérivées partielles du deuxième ordre, qui contiendront donc, en plus des dérivées premières, des opérateurs tels que $\partial^2/\partial x^2$ (lois du mouvement), $\partial^2/\partial (\ln \epsilon)^2$ (lois d'échelle), mais aussi $\partial^2/\partial x \partial \ln \epsilon$, qui décriront le couplage entre échelle et mouvement. Ce point sera brièvement évoqué dans la suite : il mène à une nouvelle possibilité de compréhension des champs de jauge en termes géométriques.

Quelle est la signification physique de la différentielle $\partial f(x, \epsilon)/\partial \ln \epsilon$? Ce n'est rien d'autre que la variation de la grandeur physique f sous une transformation d'échelle infinitésimale $\ln \epsilon \rightarrow \ln \epsilon + d\ln \epsilon$, c'est-à-dire sous une dilatation ou contraction infinitésimale de résolution (voir encadré 4.7).

Encadré 4.7 : Dilatation infinitésimale

Considérons la longueur d'une courbe non différentiable $\mathcal{L}(\epsilon)$, qui peut représenter par exemple une coordonnée curviligne fractale $\mathcal{L}(x, \epsilon)$. Une telle coordonnée généralise, à un espace-temps fractal et non différentiable, le concept de coordonnée curviligne introduite en relativité générale d'Einstein pour les espace-temps courbes riemanniens.

Appliquons une dilatation infinitésimale $\epsilon \rightarrow \epsilon' = \epsilon (1 + d\phi)$ à la résolution. On omet la dépendance en x pour simplifier les notations, sachant que nous nous intéressons pour le moment à de pures transformations d'échelle. On obtient : $\mathcal{L}(\epsilon') = \mathcal{L}(\epsilon + \epsilon d\phi) = \mathcal{L}(\epsilon) + [\partial \mathcal{L}(\epsilon) / \partial \epsilon] \epsilon d\phi = (1 + D_{\mathcal{L}} d\phi) \mathcal{L}(\epsilon)$

(1)

où $D_{\mathcal{L}}$ est par définition l'opérateur de dilatation.

La comparaison des deux derniers membres de cette équation donne la forme de cet opérateur de dilatation : $D_{\mathcal{L}} = \epsilon \partial / \partial \epsilon = \partial / \partial \ln \epsilon$.

(2)

Cette forme bien connue de l'opérateur infinitésimal de dilatation, obtenue ici par l'application de la méthode dite de Gell-Mann-Levy, démontre définitivement que la variable « naturelle » en ce qui concerne les changements de résolution est $\ln(\epsilon/\lambda)$.

Aussi les équations différentielles d'échelle à construire vont bien impliquer des expressions telles que $\partial \mathcal{L}(x, \epsilon) / \partial \ln \epsilon$. Quelle forme vont prendre ces équations ?

Dans sa forme la plus simple, on peut obtenir une telle équation différentielle d'échelle en exprimant que la variation de $\mathcal{L}$ sous une transformation d'échelle infinitésimale $d \ln \epsilon$ ne dépend que de $\mathcal{L}$ lui-même. Autrement dit, $\mathcal{L}$ détermine son propre comportement physique, en particulier sous les transformations d'échelle. Ceci s'écrit :

$$\partial \mathcal{L}(x, \epsilon) / \partial \ln \epsilon = \beta(\mathcal{L}).$$

Une telle équation (et ses généralisations), dont nous allons analyser plus à fond le comportement dans ce qui suit, n'est rien d'autre que l'équivalent différentiel de ce que sont les *générateurs* dans le cas des objets fractals construits par itérations, comme par exemple la courbe de von Koch (Mandelbrot, 1975, 1982).

Mais au lieu de passer d'une étape à la suivante de la construction à l'aide de dilatations finies discrètes (des facteurs 3 successifs dans le cas de la courbe de von Koch), on passe de $\ln(\epsilon/\lambda)$ à $\ln(\epsilon/\lambda) + d \ln(\epsilon/\lambda)$. En d'autres termes, le calcul différentiel effectué dans l'espace des échelles permet de décrire un comportement non différentiable (à la limite) par des équations différentielles.

Relativité et covariance d'échelle

Il s'agit ainsi de compléter notre description actuelle, qui est faite en terme d'espace (de positions), d'espace-temps ou d'espace des phases (positions et moments ou positions et vitesses), par un espace des échelles.

De même que les vitesses caractérisent l'état de mouvement du système de coordonnées, on considérera que les résolutions caractérisent son état d'échelle. La nature relative des intervalles de résolution temporels et spatial s'impose d'elle-même : seul un rapport d'intervalles de longueur ou de temps peut être défini, jamais leur valeur absolue, comme en témoigne la nécessité d'avoir toujours recours à des unités.

Cette relativité des échelles permet de postuler, comme nous l'avons vu, un principe de relativité d'échelle, selon lequel les lois fondamentales de la nature doivent être valides quel que soit l'état d'échelle du système de référence.

Dans ce cadre, on appelle *covariance d'échelle* l'invariance de forme des équations de la physique sous les transformations des résolutions spatio-temporelles¹. Celle-ci va prendre une forme multiple, car il faut combiner la covariance du mouvement, la nouvelle covariance d'échelle, ainsi que les couplages entre les deux. On est ainsi amené à définir plusieurs types différents de dérivation covariante qu'il s'agit de bien distinguer :

- * une covariance définie dans l'espace des échelles ;
- * un opérateur de dérivation totale « covariant-quantique » qui décrit les effets induits sur la dynamique par les structures internes en échelle, qui *transforme la mécanique classique en une mécanique de type quantique* ;
- * enfin une dérivée *covariante de jauge* qui s'identifie à celle déjà introduite formellement en théories de jauge, tout en en donnant le sens, ici géométrique, et qui décrit les effets non linéaires de couplage échelle-mouvement.

1. Noter que cette expression a été introduite par d'autres auteurs en un sens légèrement différent, comme généralisation de l'invariance d'échelle.

Lois de transformation d'échelle

Nous pouvons maintenant passer à l'étape suivante, et construire des équations différentielles d'échelle ayant une signification physique, puis chercher leurs solutions. Pour ce faire nous serons guidés par l'analogie avec les lois du mouvement et par la contrainte que de telles équations doivent satisfaire au principe de relativité d'échelle.

Nous retrouverons dans un premier temps le comportement fractal auto-similaire à dimension constante. Dans une transformation d'échelle, une telle loi possède la structure mathématique du groupe de Galilée, et satisfait donc, de manière simple, au principe de relativité.

L'analogie avec le mouvement peut être poussée plus loin. On sait, d'une part, que le groupe de Galilée n'est qu'une approximation du groupe de Lorentz (correspondant à la limite où l'invariant $c \rightarrow \infty$) et d'autre part que tous deux restent une description d'un *comportement inertiel* (c'est-à-dire du mouvement libre soumis à aucune force), alors que c'est avec la *dynamique* (qui prend en compte l'existence de forces) que la physique du mouvement trouve toute sa complexité.

Il en est de même du point de vue des lois d'échelle. Les fractals de dimension constante sont l'équivalent pour les échelles de ce qu'est l'inertie galiléenne pour le mouvement. On peut alors proposer de généraliser les lois de dilatation et de contraction usuelles de deux manières.

1. L'une consiste à introduire un groupe de Lorentz de transformation d'échelle (Nottale, 1992, 1993). Il y apparaît une échelle de résolution finie, minimale ou maximale, invariante sous les dilata-tions, qui remplace le zéro ou l'infini tout en gardant les propriétés physiques de ceux-ci. Nous avons proposé d'identifier ces échelles respectivement à la longueur de Planck (Nottale, 1992) et à l'échelle de la constante cosmologique (Nottale, 1993, 2003). Cette situation correspond cependant toujours à une transformation d'échelle linéaire sur les résolutions.
2. L'autre consiste à prendre en compte des transformations d'échelle non-linéaires, c'est-à-dire à passer à une « dynamique d'échelle » (Nottale 1997a) et, si possible, à une relativité généralisée d'échelle. Ce sont des exemples de telles lois généralisées, que nous allons considérer dans ce qui suit, après avoir retrouvé le comportement fractal standard invariant d'échelle (et la brisure de cette symétrie) comme solution des équations différentielles d'échelles les plus simples possibles (du premier ordre).

Dimension fractale constante : relativité d'échelle « galiléenne »

Les lois de puissance rencontrées dans les comportements fractals auto-similaires peuvent être identifiées comme les plus simples des lois recherchées. Considérons en effet la plus simple des équations d'échelle possibles, qui s'écrit comme une équation aux valeurs propres de l'opérateur de dilatation :

$$D_d \mathcal{L} = b \mathcal{L}. \quad (1)$$

Sa solution est une loi fractale divergente standard :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 (\lambda_0/\varepsilon)^\tau, \quad (2)$$

où $\tau = -b = D_F - D_T$, expression dans laquelle D_F est la dimension fractale, supposée constante et D_T la dimension topologique. La variable $\mathcal{L}$ désigne la longueur mesurée sur une courbe fractale, qui décrira en particulier une coordonnée dans un système de référence fractal. Une telle loi correspond en ce qui concerne les échelles à ce qu'est l'inertie du point de vue du mouvement. On peut s'en assurer facilement en lui appliquant une transformation de résolution. Sous une telle transformation $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$, on obtient :

$$\ln(\mathcal{L}'/\lambda) = \ln(\mathcal{L}/\lambda) + \tau \ln(\varepsilon/\varepsilon'), \quad \tau' = \tau, \quad (3)$$

où l'on reconnaît la structure mathématique du groupe de transformation de Galilée entre systèmes inertiels. La correspondance (mouvement $\rightarrow$ échelle) se traduit par les correspondances $x \rightarrow \ln(\mathcal{L}/\lambda)$, $t \rightarrow \tau$, $v \rightarrow \ln(\varepsilon/\varepsilon')$. La manifestation de la relativité des résolutions du point de vue mathématique est ici remarquable : elles n'interviennent que par leurs rapports et l'échelle de référence λ_0 a disparu dans la relation (3). En accord avec l'analyse précédente du statut des résolutions en physique, la dimension d'échelle joue pour les échelles le rôle joué par le temps en ce qui concerne le mouvement, et le logarithme du rapport des résolutions celui de la vitesse. La loi de composition des dilatations écrite sous forme logarithmique confirme cette identification avec le groupe de Galilée :

$$\ln(\varepsilon''/\varepsilon) = \ln(\varepsilon''/\varepsilon') + \ln(\varepsilon'/\varepsilon), \quad (4)$$

formellement identique à la composition galiléenne des vitesses, $w = u+v$.

Brisure de l'invariance d'échelle : échelles de transition

L'expression (2) est invariante d'échelle. Cette invariance est spontanément brisée par l'existence du déplacement et du mouvement, qui se surajoute aux transformations d'échelle pures. Changeons en effet l'origine du système de coordonnées. Nous obtenons

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_1 + \mathcal{L}_0 (\lambda_0/\varepsilon)^\tau = \mathcal{L}_1 [1 + (\lambda_1/\varepsilon)^\tau], \quad (5)$$

où $\lambda_1 = \lambda_0 (\mathcal{L}_0/\mathcal{L}_1)^{1/\tau}$. Alors que l'échelle λ_0 restait arbitraire, l'échelle λ_1 (qui reste relative du point de vue de l'espace-temps) prend le sens d'une échelle de brisure de symétrie d'échelle (autrement dit, de transition fractal-non fractal dans l'espace des échelles). En effet, il est aisé de constater que pour $\varepsilon \gg \lambda_1$, $\mathcal{L}$ devient de l'ordre de $\mathcal{L}_1$ et ne dépend plus de la résolution, tandis que pour $\varepsilon \ll \lambda_1$, on récupère la dépendance en échelle donnée par l'Eq. (2), asymptotiquement invariante d'échelle. Or ce comportement (Eq. 5), qui satisfait donc au double principe de relativité de la position (plus généralement, du mouvement) et d'échelle, est précisément obtenu comme solution de la plus simple des équations différentielles en échelle qu'on puisse écrire (équation du premier ordre, ne dépendant que de $\mathcal{L}$ lui-même). Maintenant, cette dépendance de $\mathcal{L}$ en fonction de l'échelle est développable en série de Taylor :

$$d\mathcal{L}/d\ln\varepsilon = \beta(\mathcal{L}) = a + b\mathcal{L} + \dots \quad (6)$$

où le cas précédent (Eq. 2) correspond à la simplification $a = 0$. La solution de l'Eq. (6), représentée fig. 4.16, est effectivement donnée par l'expression (5), avec $\tau = -b$, $\mathcal{L}_1 = -a/b$, sachant que λ_1 est une constante d'intégration. Noter que si l'on pousse plus loin le développement limité, on obtient des solutions montrant plusieurs échelles de transition, en accord avec le comportement observé de nombreux objets fractals naturels (Mandelbrot, 1975, 1982). En particulier, en allant jusqu'au deuxième ordre, on trouve des structures fractales avec un cut-off inférieur et un cut-off supérieur. On peut également obtenir des comportements dépendant d'échelle vers les petites et les grandes échelles, mais qui en sont indépendants aux échelles intermédiaires.

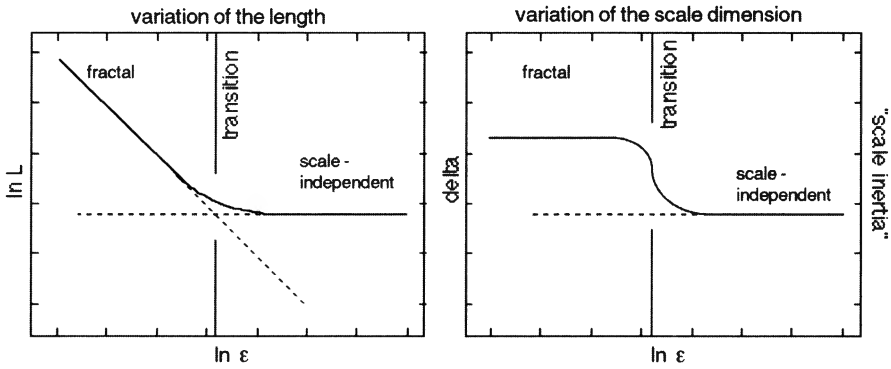


Figure 4.16. Loi d'échelle linéaire : comportement fractal auto-similaire de dimension fractale constante (avec transition vers une indépendance d'échelle macroscopique).

La figure gauche donne la variation de la longueur en fonction de l'échelle, en coordonnées logarithmiques. La figure droite donne la dimension fractale effective en fonction de l'échelle, définie comme la pente de la courbe précédente. Cette dimension effective subit une transition d'une valeur constante supérieure à la dimension topologique vers la dimension topologique (ce qui correspond à une perte de la dépendance d'échelle et de la fractalité).

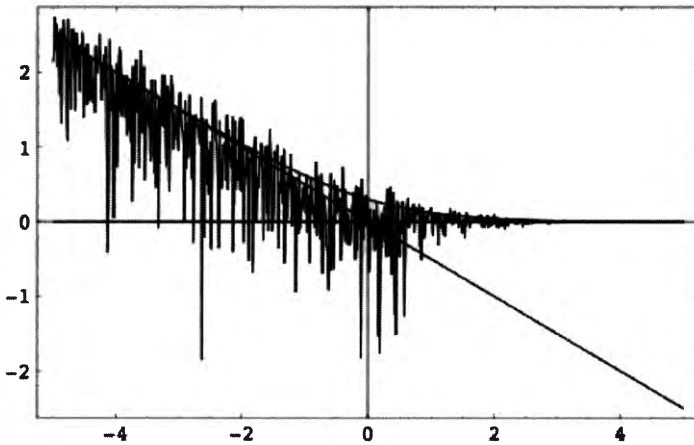


Figure 4.17. Transition entre régime indépendant d'échelle (non-fractal) vers les grandes échelles et régime dépendant d'échelle (fractal) incluant une fluctuation stochastique.

La figure donne la variation du logarithme de la longueur sur une courbe fractale en fonction du logarithme de l'échelle.

**Lois d'échelle non linéaires :
équations du deuxième ordre, invariance
d'échelle discrète, lois log-périodiques**

Parmi les corrections à l'invariance d'échelle (caractérisée par des lois de puissance), l'une d'entre elles s'est révélée jouer un rôle important dans de nombreux domaines qui ne se réduisent pas à la seule physique. Il s'agit des lois log-périodiques, qui peuvent être définies par l'apparition d'exposants d'échelle ou de dimensions fractales complexes (voir Sornette, 1998 et références incluses).

On peut obtenir une telle correction log-périodique à une loi de puissance (Nottale, 1997) à partir de l'exigence de covariance d'échelle, c'est-à-dire de conservation de la forme des équations dépendantes d'échelle. Considérons en effet une quantité explicitement dépendante de la résolution, $\Phi(\epsilon)$. Dans les applications à la chronologie évolutive de phénomènes de crise, la variable ϵ sera identifiée à l'intervalle de temps $T-T_c$, où T_c est la date critique. Supposons qu'en première approximation, Φ satisfasse à une équation différentielle du premier ordre :

$$d\Phi/d\ln\epsilon - D \Phi = 0, \quad (7)$$

où D est une constante, dont la solution est une loi de puissance, $\Phi(\epsilon) \propto \epsilon^D$. Dans la recherche de corrections d'ordre suivant à cette loi, on remarquera qu'introduire directement un exposant complexe n'est pas satisfaisant : cela conduirait à des fluctuations log-périodiques de grande ampleur plutôt qu'à une correction à la loi de puissance pouvant rester petite. Nous allons donc, dans une deuxième étape, faire l'hypothèse que l'annulation de la différence (Eq. 7) n'était qu'approximative, et que le deuxième membre de cette équation est en fait non nul :

$$d\Phi/d\ln\epsilon - D \Phi = \chi. \quad (8)$$

Nous exigerons alors que la nouvelle fonction χ soit elle-même solution d'une équation qui garde la même forme que l'équation initiale (ce qui est une exigence de covariance) :

$$d\chi/d\ln\epsilon - D' \chi = 0. \quad (9)$$

En posant $D' = D + \delta$, on trouve alors que Φ est solution d'une équation générale du deuxième ordre :

$$d^2\Phi/(d\ln\epsilon)^2 - B d\Phi/d\ln\epsilon + C \Phi = 0. \quad (10)$$

où $B = 2D + \delta$ et $C = D(D + \delta)$. Cette solution s'écrit $\Phi(\epsilon) = a \epsilon^D (1 + b \epsilon^\delta)$, où b peut maintenant être arbitrairement petit. Finalement, le choix d'un exposant imaginaire $\delta = i\omega$ mène à une solution dont la partie réelle inclut une correction log-périodique (fig. 4.18) :

$$\Phi(\epsilon) = a \epsilon^D [1 + b \cos(\omega \ln\epsilon)]. \quad (11)$$

Des fluctuations log-périodiques ont également été obtenues dans le cadre relativiste d'échelle à travers la ré-interprétation de l'invariance de jauge et de la nature de l'électromagnétisme qui peut y être proposée (voir plus loin et (Nottale, 1996)).

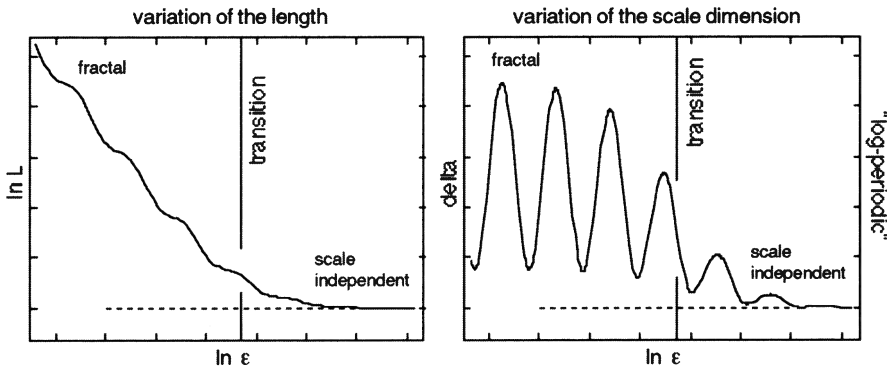


Figure 4.18. Loi d'échelle non-linéaire : corrections log-périodiques à l'auto-similarité.

La figure de gauche donne la variation de la longueur d'une courbe fractale (Eq. 11) en fonction de l'échelle, la figure de droite donne la variation de la dimension fractale effective. Une telle courbe n'est plus strictement auto-similaire, mais seulement de manière discrète (la fluctuation log-périodique apparaissant comme correction à la loi de puissance). On les obtient comme solutions d'une équation « d'onde d'échelle » du deuxième ordre (Eq. 10). De nombreux fractals construits de manière itérative montrent un tel comportement log-périodique.

Application à la chronologie évolutive de phénomènes de crise : la loi log-périodique comme généralisation naturelle des horloges périodiques

Cette loi log-périodique jouant un rôle important dans la description de nombreux systèmes naturels couvrant des sciences diverses¹ (voir d'autres exemples dans le présent ouvrage), elle mérite une analyse plus poussée, en particulier en ce qui concerne son application temporelle.

Comme nous l'avons vu, cette loi est obtenue comme solution générale d'une « équation d'onde d'échelle » qui peut elle-même se construire à partir d'une exigence de covariance d'échelle. Si l'on choisit comme variable d'échelle l'écart $T - T_c$ à une époque critique T_c , on obtient une périodicité en $\log |T - T_c|$, qui se traduit par une accélération ou une décélération du point de vue de la variable temporelle ordinaire T . Mais cette loi de chronologie contient comme solution particulière la périodicité ordinaire (c'est-à-dire les horloges habituelles qui battent régulièrement),

1. Voir Nottale, Chaline et Grou. 2000. *Les Arbres de l'évolution*. Op. cit.

qui est obtenue comme le cas particulier où l'époque critique T_c tend vers l'infini (vers le passé ou le futur) : elle n'est donc pas en contradiction avec celle-ci, mais en constitue une généralisation.

Inversement cela signifie qu'une accélération log-périodique du temps est obtenue dès lors que l'horizon du temps infini est renvoyé à « distance » (temporelle) finie. On peut alors renverser le point de vue, et considérer qu'il s'agit en fait d'une loi générale de battement d'une horloge « naturelle », dont les horloges ordinaires ne sont que le cas particulier qui présuppose la disponibilité d'un temps infini vers le futur ou le passé. Dans le cas contraire (big-bang, big-crunch, trou noir, évolution des espèces, évolution des sociétés, naissance, maladie, mort...), on obtient une horloge log-périodique : c'est une horloge qui contient dans sa loi de battement même l'existence de sa propre fin.

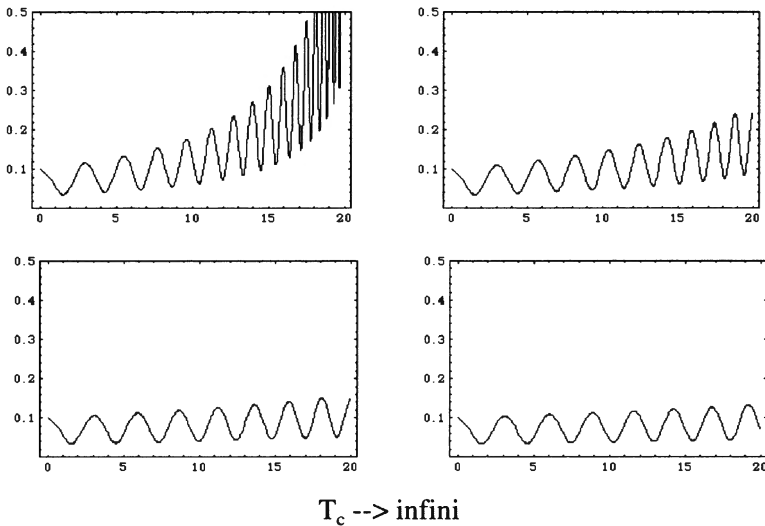


Figure 4.19. Transition du log-périodique au périodique.

Les quatre courbes montrent l'évolution de la fonction : $Y = e |T - T_c|^g (1 + a \cos[d + b T_c \log|T - T_c|])$, pour quatre valeurs croissantes de T_c entre 20 et 80. Cette fonction est une loi de puissance avec correction log-périodique. On a choisi pour les coefficients les valeurs suivantes : $g = -1$; $a = 0.5$; $b = 2$; $y_0 = 0.1$; $p_0 = 0$; $d = p_0 - b T_c \log|T_c|$; $e = y_0 / (|T_c|^g (1 + a \cos[d + b T_c \log|T_c|]))$. Ce choix permet que l'amplitude et la phase initiale soit constante quel que soit T_c . On constate que quand T_c croît, l'horloge log-périodique se transforme en une horloge ordinaire périodique, qui est donc un cas particulier (supposant un temps infini) des horloges log-périodiques.

Cette vision des horloges naturelles comme naturellement log-périodique (dont les horloges périodiques ne sont que l'approximation de courte échelle de temps par rapport au temps critique) est éprouvable

expérimentalement : on s'attend ainsi à ce qu'une horloge naturelle, désynchronisée des autres horloges, montre une dérive logarithmique. C'est la synchronisation des horloges entre elles qui permet de définir un battement périodique, mais une horloge laissée libre et qui ne serait plus synchronisée aux autres se mettrait automatiquement à dériver. Il s'agit là d'une manifestation profonde du principe de relativité suivant lequel seule la comparaison entre deux horloges a un sens, si bien que la régularité ou la non-régularité d'une horloge prise en elle-même sans référence ne peut en aucun cas être établie (Nottale et Timar, 2008). Inversement, une horloge log-périodique qui serait comparée à une autre horloge log-périodique de même temps critique apparaîtrait comme périodique (fig. 4.19)...

Dimension fractale variable : équations d'Euler-Lagrange en échelle

Considérons maintenant le cas de la « dynamique d'échelle ». Comme nous l'indiquions dans ce qui précède, le comportement strictement invariant d'échelle à dimension fractale constante correspond à un comportement libre du point de vue de la physique d'échelle. Aussi, de même qu'il existe des forces qui impliquent un écart au mouvement inertiel, on s'attend également à voir les systèmes fractals naturels présenter des distorsions par rapport au comportement auto-similaire. Par analogie, de telles distorsions peuvent, dans une première étape, être attribuées à l'effet d'une « force d'échelle » ou encore d'un « champ d'échelle ». Mais, de manière plus profonde, un tel champ peut d'emblée, être considéré comme une manifestation de la géométrie fractale (de même que le champ de gravitation est une manifestation de la géométrie courbe en relativité généralisée du mouvement d'Einstein).

Avant d'introduire ce concept, rappelons le renversement de signification qui doit être effectué en ce qui concerne les variables d'échelle, en comparaison avec la description usuelle des objets fractals. Ce renversement est parallèle, en ce qui concerne les échelles, à celui qui fut opéré pour les lois du mouvement dans le passage de lois « aristotéliennes » aux lois galiléennes.

Du point de vue aristotélien, le temps est la mesure du mouvement : il se définit donc à partir de l'espace et de la vitesse. De même, la dimension fractale est définie en général à partir de la mesure de l'objet fractal (par exemple la longueur d'une courbe, l'aire d'une surface, etc.) et de la résolution :

$$\ll t = x/v \gg \leftrightarrow \tau = D_F - D_T = d \ln \mathcal{L} / d \ln(\lambda/\epsilon). \quad (12)$$

Avec Galilée, le temps devient une variable primaire et la vitesse se déduit de l'espace et du temps, qui se retrouvent sur un même plan, sous forme d'un espace-temps (qui reste cependant dégénéré car la vitesse limite c y est implicitement infinie). Ceci implique le caractère vectoriel de la vitesse et son aspect local (finalement mis en oeuvre par sa définition comme dérivée de la position par rapport au temps). Le même renversement peut s'appliquer aux échelles. L'exposant τ devient lui-même variable primaire, traitée sur le même plan que l'espace et le temps, et les résolutions sont alors définies comme dérivées à partir de la coordonnée fractale et de τ (c'est-à-dire comme « vitesses d'échelle ») :

$$\mathbb{V} = \ln(\lambda/\varepsilon) = d\ln\mathcal{L} / d\tau. \quad (13)$$

Ce sens nouveau et fondamental donné à la dimension fractale $D_F = \tau + D_T$ (qui diffère de τ par une constante), traitée maintenant comme une variable, rend nécessaire de lui attribuer un nouveau nom. Nous avons proposé d'appeler « *djinn*¹ » cette dimension fractale maintenant variable. Cette définition permet de travailler dans un espace-temps-djinn à cinq dimensions, dans lequel la dimension (fractale) de l'espace-temps n'est plus fixée, mais est définie par les valeurs variables d'une nouvelle coordonnée qui se combine maintenant avec celles d'espace et de temps. Le caractère vectoriel des zooms est alors apparent, car les quatre résolutions spatio-temporelles peuvent maintenant se définir à partir des quatre coordonnées d'espace-temps et du djinn :

$$\mathbb{V}^i = dx^i/dt \leftrightarrow \ln(\lambda^\mu/\varepsilon^\mu) = d\ln\mathcal{L}^\mu/d\tau. \quad (14)$$

On pourrait objecter que du point de vue des mesures, c'est à $\mathcal{L}$ (la longueur d'une courbe fractale d'un point de cette courbe à un autre, ou encore une coordonnée fractale), et ε (l'intervalle de résolution, où échelle d'observation) que l'on a accès et que le djinn τ s'en déduit. Mais on remarquera qu'il en est de même de la variable temporelle, qui reste toujours mesurée de manière indirecte. Un dernier avantage de ce renversement apparaîtra dans la suite, dans les tentatives de construction d'une relativité d'échelle généralisée. Il permet en effet la définition d'un concept nouveau, celui de l'accélération d'échelle, $\Gamma^\mu = d^2\ln\mathcal{L}^\mu/d\tau^2$, nécessaire au passage à des lois d'échelle non linéaires et à une « dynamique » d'échelle. L'introduction de ce concept permet de renforcer encore l'identification des fractals à dimension constante à une « inertie d'échelle ». En effet, l'équation « du vide » dépourvu de toute force (d'échelle) doit s'écrire (à une dimension pour simplifier l'écriture) :

$$\Gamma = d^2\ln\mathcal{L} / d\tau^2 = 0. \quad (15)$$

Elle s'intègre comme

1. D'après le tibétain « *don, qualité* ».

$$d\ln\mathcal{L}/d\tau = \ln(\lambda/\varepsilon) = \text{constante.} \quad (16)$$

La constance de la résolution signifie ici son indépendance en fonction du djinn τ . La solution prend finalement la forme attendue, $\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 (\lambda/\varepsilon)^\tau$. Plus généralement, on peut alors faire l'hypothèse que, les lois d'échelle peuvent être construites à partir d'un principe de moindre action. On introduit une fonction de Lagrange d'échelle, $L(\ln\mathcal{L}, \mathbb{V}, \tau)$, où $\mathbb{V} = \ln(\lambda/\varepsilon)$, puis une action d'échelle :

$$S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} L(\ln\mathcal{L}, \mathbb{V}, \tau) d\tau. \quad (17)$$

Le principe d'action stationnaire conduit alors à l'obtention d'une forme générale des équations différentielles d'échelle cherchées, en termes d'équations d'Euler-Lagrange d'échelle :

$$d(\partial L/\partial \mathbb{V}) / d\tau = \partial L/\partial \ln\mathcal{L}. \quad (18)$$

Remarquons néanmoins qu'une telle forme des équations n'est valable que pour les processus mettant en œuvre une variation monotone du djinn τ , (ou sur des intervalles d'échelle où cette variation est monotone), ce qui ne s'applique pas dans tous les cas (voir par exemple les fluctuations log-périodiques) contrairement aux lois du mouvement classiques où le temps s'écoule de façon monotone. On sera donc amené à généraliser les lois d'échelle sous cette forme de « dynamique d'échelle », mais aussi à considérer également, en parallèle, les équations différentielles d'échelle écrites en terme de $\ln(\lambda/\varepsilon)$ au lieu de τ .

Dynamique d'échelle et force d'échelle

La forme la plus simple de ces équations est celle où le deuxième membre s'annule (absence de force d'échelle) et où la fonction de Lagrange prend la forme newtonienne où L est proportionnel à $\mathbb{V}^2$. On retrouve là, par cette autre voie, le comportement d'« inertie d'échelle » en loi de puissance. En effet, l'équation de Lagrange s'écrit dans ce cas :

$$d\mathbb{V} / d\tau = 0 \Rightarrow \mathbb{V} = \text{cst.} \quad (19)$$

Cette constance de la « vitesse d'échelle » $\ln(\lambda/\varepsilon)$ signifie ici, comme nous l'avons déjà remarqué, qu'elle est indépendante de τ . L'équation d'Euler-Lagrange d'échelle s'intègre alors dans ce cas suivant la forme usuelle du comportement fractal $\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 (\lambda/\varepsilon)^\tau$. Mais l'avantage principal de cette représentation est qu'elle permet de passer à l'ordre suivant, c'est-à-dire à des comportements non-linéaires de dynamique d'échelle. On considère que la résolution ε peut maintenant devenir une fonction du djinn τ . Le fait d'avoir identifié la résolution à une « vitesse d'échelle »,

$V = \ln(\lambda/\epsilon)$, conduit alors naturellement à définir une « accélération d'échelle » en dérivant une nouvelle fois :

$$\Gamma = d^2 \ln \mathcal{L} / d\tau^2 = d \ln(\lambda/\epsilon) / d\tau. \quad (20)$$

L'introduction d'une force d'échelle permet ensuite d'écrire une version appliquée aux lois d'échelle de l'équation de la dynamique de Newton (qui n'est rien d'autre qu'un cas particulier de l'équation de Lagrange précédente) :

$$F = \mu \Gamma = \mu (d^2 \ln \mathcal{L} / d\tau^2), \quad (21)$$

où μ est une « masse d'échelle », qui mesure comment le système résiste à la « force d'échelle » (laquelle décrit, de manière plus profonde, un effet géométrique de distorsion du système par rapport à un comportement auto-similaire).

Force d'échelle constante

Considérons tout d'abord le cas d'une force constante. Celle-ci dérive d'un « potentiel d'échelle » $\phi = F \ln \mathcal{L}$. On peut écrire l'équation (21) sous la forme :

$$d^2 \ln \mathcal{L} / d\tau^2 = G, \quad (22)$$

où $G = F/\mu = \text{cste}$. Il s'agit là de l'équivalent pour les échelles de ce qu'est la chute des corps dans un champ de gravité constant. Sa solution, comme pour le mouvement, décrit une variation parabolique (du logarithme de la position en fonction du djinn ou « temps d'échelle », en analogie avec la variation de la position en fonction du temps pour le mouvement de chute des corps) :

$$V = V_0 + G \tau, \quad \ln \mathcal{L} = \ln \mathcal{L}_0 + V_0 \tau + (1/2) G \tau^2. \quad (23)$$

Sous cette forme, la signification physique de ce résultat n'apparaît pas clairement. En effet, du point de vue expérimental, c'est en fonction de la résolution que s'observent les variations de $\ln \mathcal{L}$ et éventuellement de τ . Mais ces deux équations peuvent s'inverser sous une forme qui généralise l'expression habituelle d'un comportement fractal. Après redéfinition des constantes d'intégration, cette solution se ré-exprime sous la forme :

$$\tau = (1/G) \ln(\lambda_0/\epsilon), \quad \ln(\mathcal{L}/\mathcal{L}_0) = (1/2G) \ln^2(\lambda_0/\epsilon) \quad (24)$$

Ainsi la dimension fractale, qui est constante pour les fractals auto-similaires, est devenue une fonction linéaire de la log-résolution, tandis que le logarithme de la longueur varie maintenant, non plus linéairement, mais de manière parabolique (fig. 4.20).

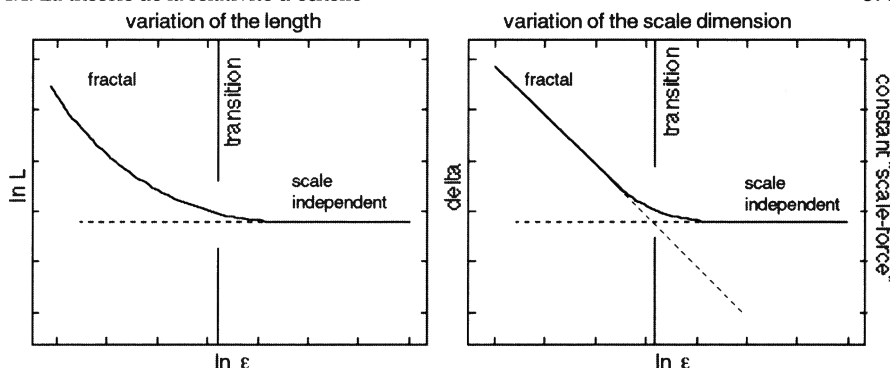


Figure 4.20. Loi d'échelle non-linéaire : dynamique d'échelle avec force constante.

La variation de la longueur est maintenant parabolique, tandis que la dimension fractale effective varie de manière linéaire en fonction du logarithme de l'échelle. On a rajouté une transition vers un régime non-fractal (indépendant d'échelle) aux grandes échelles.

Ce résultat est potentiellement applicable à de nombreuses situations, dans tous les domaines où prévaut l'analyse fractale (physique, chimie, biologie, médecine, géographie...). En effet il est fréquent qu'après analyse soignée de la dépendance d'échelle d'une grandeur, le modèle en loi de puissance soit rejeté pour cause de variation de la pente dans le plan $(\log L, \log \epsilon)$. Dans de tels cas, la conclusion que le phénomène considéré n'est pas fractal pourrait s'avérer prématurée. Il pourrait au contraire s'agir d'un comportement fractal non-linéaire relevant d'une dynamique d'échelle, auquel cas l'identification et l'étude de la force d'échelle responsable de la distorsion se révélerait potentiellement du plus haut intérêt.

Oscillateur harmonique d'échelle

Un autre cas intéressant de potentiel d'échelle est celui de l'*oscillateur harmonique*. Dans le cas où il est « attractif », l'équation d'échelle s'écrit :

$$\ln L'' + \alpha^2 \ln L = 0. \quad (25)$$

Où $''$ désigne la dérivée seconde par rapport à la dimension fractale variable représentée par τ (rappelons que $D_F = \tau + D_T$, ce qui signifie que $D_F = \tau$ pour un ensemble de points, $D_F = \tau + 1$ pour une courbe, etc.). En posant $\alpha = \ln(\lambda/\Lambda)$, on trouve après quelques calculs que la solution de cette équation s'écrit :

$$\ln(L/L_0) = [1 - \ln^2(\lambda/\epsilon) / \ln^2(\lambda/\Lambda)]^{1/2}. \quad (26)$$

Il apparaît ainsi une échelle minimale ou maximale Λ pour le système considéré, tandis que la pente $d \ln L / d \ln \epsilon$ (à ne plus confondre avec le

« djinn » τ dans cette situation non linéaire) varie entre zéro et l'infini dans le domaine de résolutions permis entre λ et Λ .

Plus intéressant encore, est le cas « répulsif », correspondant à un potentiel qu'on peut écrire sous la forme $\phi = -(\ln \mathcal{L} / \tau_0)^2 / 2$. La solution s'écrit :

$$\ln(\mathcal{L}/\mathcal{L}_0) = \tau_0 [\ln^2(\lambda/\epsilon) - \ln^2(\lambda/\Lambda)]^{1/2} \quad (27)$$

L'intérêt de cette solution est qu'elle redonne comme comportement asymptotique des très grandes ou très petites échelles ($\epsilon \ll \lambda$ ou $\epsilon \gg \lambda$) la solution usuelle $\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 (\lambda/\epsilon)^{\tau_0}$, de dimension fractale constante $D_F = 1 + \tau_0$. Par contre, ce comportement rencontre des distorsions croissantes quand la résolution se rapproche d'une échelle maximale Λ , pour laquelle la pente (qu'on peut identifier à une dimension fractale effective à une constante près) devient infinie (fig. 4.21). En physique des particules, nous avons suggéré qu'un tel comportement pourrait apporter un éclairage nouveau sur le confinement des quarks : en effet, dans le cadre de la réinterprétation des symétries de jauge comme symétries sur les résolutions spatio-temporelles internes aux géodésiques d'un espace-temps fractal (géodésiques identifiées aux « particules » dans ce contexte), le groupe de jauge de la chromodynamique quantique est SU(3), qui est précisément le groupe de symétrie dynamique de l'oscillateur harmonique.

Des solutions de ce type pourraient également présenter de l'intérêt dans le domaine biologique, car on peut interpréter l'existence d'une échelle maximale où la dimension fractale effective devient infinie comme celle d'une paroi, ce qui pourrait fournir des modèles par exemple de membranes cellulaires.

À des échelles inférieures à cette échelle maximale (pour les petits constituants qui évoluent à l'intérieur du système considéré), on tend soit vers l'indépendance d'échelle (pente nulle) dans le premier cas, soit vers le comportement fractal « libre » à pente constante dans le deuxième, ce qui est là encore en accord avec cette interprétation.

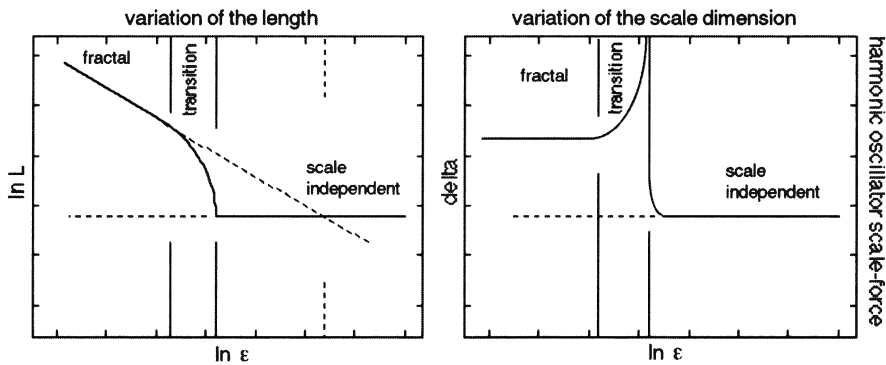


Figure 4.21. Loi d'échelle non-linéaire : dynamique d'échelle avec potentiel d'oscillateur harmonique dans l'espace des échelles.

On obtient un comportement à trois niveaux : auto-similaire aux petites échelles, indépendant d'échelle aux grandes échelles, avec fort écart à l'invariance d'échelle dans une gamme d'échelle intermédiaire. Appliquée dans l'espace des échelles, une telle solution décrit un système compressé qui « protège » ses petites échelles de la distorsion interne due à sa contraction globale. Appliquée à une variable définie à partir d'un centre, elle décrit un système à trois niveaux, intérieur, extérieur et intermédiaire, la dimension fractale prenant de très grandes valeurs dans la zone intermédiaire (ce qui correspond à un « épaissement » des trajectoires). On peut interpréter cette zone intermédiaire comme l'existence d'une « peau » ou « membrane » séparant les domaines intérieur et extérieur, ce qui est une des propriétés essentielles des systèmes complexes (en particulier vivants).

Relativité restreinte d'échelle : lois de dilatation log-lorentziennes, échelle limite invariante sous les dilatations

C'est avec la relativité restreinte d'échelle que le concept d'« *espace-temps-djinn* » prend tout son sens. Cependant, celle-ci n'a été développée, jusqu'à maintenant, qu'à deux dimensions, une dimension d'espace-temps et le djinn. Un traitement complet à cinq dimensions reste à faire.

La remarque précédente, suivant laquelle les lois fractales standard (à dimension fractale constante) ont la structure du groupe de Galilée implique aussitôt une possibilité de généralisation de ces lois. En effet, on sait depuis les travaux de Poincaré (1905) et Einstein (1905) que, en ce qui concerne le mouvement, ce groupe n'est qu'un cas très particulier et dégénéré du groupe de Lorentz. Or, on peut montrer (Nottale, 1992), qu'à deux dimensions, sur les seules hypothèses que la loi de transformation recherchée soit linéaire, interne et invariante par réflexion (hypothèse déductibles du seul principe de relativité restreinte), on trouve comme unique solution physiquement admissible le groupe de Lorentz : celui-ci correspond à une métrique minkowskienne. L'autre solution possible est la métrique euclidienne, exclue pour cause de contradictions physi-

ques : dans le cas du mouvement, parce qu'elle permettrait une rotation complète dans l'espace-temps, donc des retours arrière temporels qui poseraient des problèmes fondamentaux de causalité ; dans le cas des échelles, parce que le produit de deux contractions pourrait être une dilatation, ce qu'on peut également exclure.

Désignons par $\mathcal{L}$ dans ce qui suit la partie asymptotique de la coordonnée fractale, qui correspond à une différence du type $\mathcal{L} - \mathcal{L}_0$ dans ce qui précède (remplacer ensuite $\mathcal{L}$ par $\mathcal{L} - \mathcal{L}_0$ permet de prendre en compte automatiquement la transition fractal-non fractal λ). La nouvelle transformation d'échelle log-lorentzienne s'écrit, en fonction du rapport de dilatation ρ entre échelles de résolutions $\varepsilon \rightarrow \varepsilon'$ (fig. 4.22) :

$$\ln(\mathcal{L}/\mathcal{L}_0) = [\ln(\mathcal{L}/\mathcal{L}_0) + \tau \ln \rho] / [1 - \ln^2 \rho / \ln^2(\lambda/\Lambda)]^{1/2} \quad (28)$$

$$\tau' = [\tau + \ln \rho \ln(\mathcal{L}/\mathcal{L}_0) / \ln^2(\lambda/\Lambda)] / [1 - \ln^2 \rho / \ln^2(\lambda/\Lambda)]^{1/2} \quad (29)$$

La loi de composition des dilatations prend la forme :

$$\ln(\varepsilon'/\lambda) = [\ln(\varepsilon/\lambda) + \ln \rho] / [1 + \ln \rho \ln(\varepsilon/\lambda) / \ln^2(\lambda/\Lambda)] \quad (30)$$

Précisons que ces lois ne sont valables qu'en deçà de l'échelle de transition λ (resp. au-delà de cette échelle de transition dans l'application de cette loi vers les très grandes échelles), ce qui apparaît clairement en remplaçant $\mathcal{L}$ par $\mathcal{L} - \mathcal{L}_0$ comme spécifié plus haut pour inclure la transition).

Comme on peut le constater sur ces formules, l'échelle Λ est une échelle de résolution qui montre des propriétés étonnantes. Quelle que soit l'échelle de référence λ choisie, si l'on part de l'échelle $\varepsilon = \Lambda$ et qu'on lui applique une dilatation ou une contraction quelconque, on retrouve après cette transformation d'échelle — aussi grande soit-elle... la même échelle Λ . Autrement dit, la nouvelle transformation introduit naturellement (comme constante d'intégration) une échelle invariante sous les dilatations, inatteignable (il faudrait une dilatation infinie à partir de toute échelle finie pour l'atteindre) et indépassable. Une telle échelle invariante joue donc, pour les lois d'échelles un rôle semblable à celui joué par la vitesse de la lumière c pour les lois du mouvement : celle-ci (ou plus précisément la vitesse de n'importe quelle particule de masse nulle dans le vide) est effectivement définie comme vitesse invariante sous les changements de vitesse.

Les lois obtenues pouvant s'inverser, deux échelles invariantes et indépassables (comme des horizons non comme des murs ou des cut-offs) apparaissent donc, l'une vers les petites échelles et l'autre vers les grandes. Nous avons proposé d'identifier cette échelle invariante sous les dilatations, vers les très petites échelles, à l'échelle d'espace et de temps de Planck (Nottale, 1992),

$$l_{\mathbb{P}} = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,61605(10) \times 10^{-35} \text{ m et } t_{\mathbb{P}} = l_{\mathbb{P}}/c,$$

qui posséderait alors les propriétés physiques du point zéro tout en restant finie. Dans le cas macroscopique, on l'identifie à l'échelle de longueur cosmique donnée par l'inverse de la racine de la constante cosmologique (Nottale, 1993, 1996a, 2003).

En quoi cette nouvelle loi de dilatation change-t-elle notre vision de l'espace-temps ? À un certain niveau, elle implique une complication, en raison de la nécessité d'introduire une cinquième dimension. Ainsi la métrique d'échelle s'écrit à deux variables :

$$d\sigma^2 = d\tau^2 - (d\ln L)^2 / \mathbb{C}_0^2, \text{ avec } \mathbb{C}_0 = \ln(\lambda_0/\Lambda). \quad (31)$$

L'invariant $d\sigma$ définit un « djinn propre », ce qui signifie que, bien que la dimension fractale effective soit devenue variable, la dimension fractale dans le repère propre (« entraîné » avec le système considéré du point de vue de l'état d'échelle) est restée constante.

Mais on peut également remarquer que la dimension fractale tend maintenant vers l'infini quand l'intervalle de résolution tend vers l'échelle de Planck. En allant à des échelles de plus en plus petites, la dimension fractale passera donc successivement par les valeurs 2, 3, 4, ce qui permettrait de couvrir une surface, puis l'espace, puis l'espace-temps à l'aide d'une unique coordonnée. Il est donc possible de définir un *espace-temps-djinn minkowskien* nécessitant, dans des repères fractals adéquats, seulement deux dimensions topologiques aux très petites échelles. Inversement, en allant vers les grandes échelles relatives à partir de l'échelle de Planck, l'espace-temps-djinn voit sa cinquième dimension varier de moins en moins vite pour devenir presque constante aux échelles actuellement accessible par les accélérateurs, et finalement s'évanouir au-delà de l'échelle de Compton du système considéré, qui s'identifie à la transition fractal-non fractal dans le référentiel de repos.

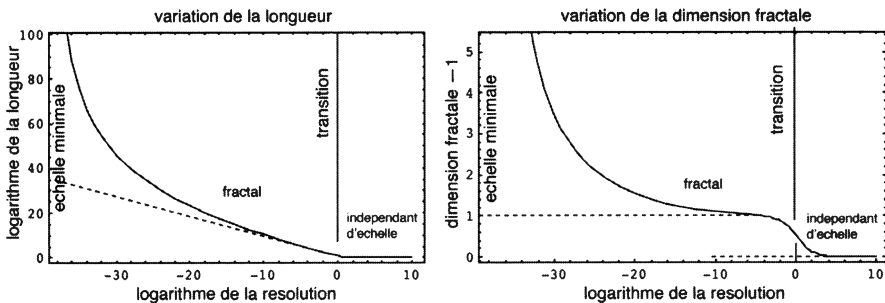


Figure 4.22. Variation de la longueur fractale (figure de gauche) et de la dimension fractale effective (figure de droite) dans le cas d'une loi d'échelle log-lorentzienne (relativité d'échelle restreinte)

On a rajouté une transition fractal/non-fractal vers les grandes échelles. La longueur et la dimension fractale deviennent divergentes en se rapprochant d'une échelle finie invariante sous les dilatations et contractions, identifiée à l'échelle de Planck

vers les petites échelles. Une solution inversée divergente vers les grandes échelles est aussi possible, qui mène à l'introduction d'une échelle finie maximale (ayant la nature d'un horizon) identifiée à l'échelle de la constante cosmologique.

Relativité d'échelle généralisée et couplage échelle-mouvement : champs de jauge

Il s'agit là d'un vaste champ d'étude dont nous signalons ici simplement l'existence mais qui ne sera pas développé, car sortant du cadre du présent ouvrage (voir les références originales pour plus de détails, en particulier (Nottale, 1996a ; Nottale, *et al.*, 2006). Nous avons vu, comment l'on pouvait introduire des transformations d'échelle non-linéaires et une dynamique d'échelle. Cette approche n'est cependant qu'un premier pas vers un niveau plus profond « tout géométrique », dans lequel les forces d'échelle ne sont plus elles-mêmes que des manifestations de la géométrie fractale et non différentiable (de l'espace-temps ou du milieu).

Ce niveau implique aussi la prise en compte de résolutions spatio-temporelles qui peuvent elles-mêmes varier en fonction de la position et du temps, générant ainsi des champs d'origine purement géométrique. Autrement dit, de même que le champ de gravitation s'identifie en relativité générale d'Einstein aux manifestations de la courbure, de même la fractalité va se manifester par l'apparition d'un ou de plusieurs champs. Cette généralisation de la relativité d'échelle conduit à une nouvelle interprétation de l'invariance de jauge, et donc des champs de jauge eux-mêmes (interactions électromagnétiques, faibles et fortes) ainsi que des charges qui leur sont associées. Celle-ci mène à la démonstration de l'existence de relations générales entre échelles de masse et constantes de couplage (charges généralisées) en physique des particules (Nottale, 1996a). Elle implique également la possibilité d'apparition de champs effectifs nouveaux (il s'agit d'énergie potentielle stockée dans la structure géométrique fractale elle-même) générés par les transformations d'échelle de matériaux structurés en échelle (fig. 4.23), *i.e.* fractals, donc en particulier les systèmes vivants. De nombreuses applications, en particulier dans le domaine des sciences de la vie, sont envisageables.

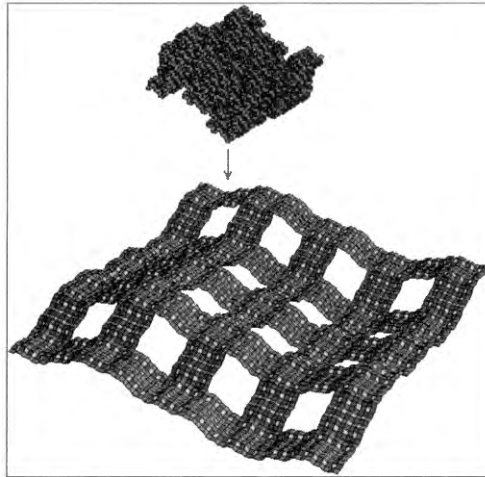


Figure 4.23. Dépliage d'une surface fractale (deuxième niveau d'itération).

Mécanique quantique

Comme nous l'avons vu, on est conduit, en relativité d'échelle, à généraliser une nouvelle fois le concept d'espace-temps et à travailler dans le cadre d'un espace-temps fractal. On prend alors en compte des systèmes de coordonnées (et des chemins, en particulier les géodésiques) eux-mêmes fractals, c'est-à-dire possédant une structure interne. Nous nous sommes concentrés, dans les paragraphes précédents, sur les descriptions possibles d'une telle structure, qui porte sur l'espace des échelles. Nous allons maintenant considérer ses effets induits sur les déplacements dans l'espace ordinaire. La combinaison de ces effets conduit à l'introduction d'un outil de description du type de celui de la mécanique quantique. On y abandonne la description classique en termes de conditions initiales et de trajectoires individuelles déterministes, au bénéfice d'une description statistique en termes d'amplitudes de probabilité.

Rappelons l'essence de la méthode utilisée dans le cadre de la relativité d'échelle pour passer d'une dynamique classique à une dynamique de type quantique (Nottale, 1993 ; Célérier et Nottale, 2004, 2006 ; Nottale et Célérier, 2007).

Les trois conditions minimales qui permettent de transformer l'équation fondamentale de la dynamique en une équation de Schrödinger sont les suivantes :

1. Il existe un très grand nombre (à la limite, une infinité) de chemins potentiels ; cette condition est une conséquence naturelle de la non-différentiabilité et de la fractalité de l'espace, dans le cas où

les chemins peuvent être définis précisément comme géodésiques de cet espace.

2. Chacun de ces chemins est une courbe fractale. La dimension $D_F = 2$, qui correspond à une perte complète d'information sur les déplacements élémentaires et à l'absence de corrélation ou d'anti-corrélation, joue ici un rôle particulier : c'est pour cette dimension qu'on retrouve la mécanique quantique standard, mais il est possible d'obtenir des généralisations pour d'autres valeurs de la dimension fractale (Nottale, 1996a). Dans le cas d'un espace et de ses géodésiques, le caractère fractal de l'espace implique directement celui de ses géodésiques.

3. Il y a irréversibilité au niveau infinitésimal, c'est-à-dire non-invariance dans la réflexion sur l'élément différentiel de temps $dt \rightarrow -dt$. Là encore, cette condition est une conséquence immédiate de l'abandon de l'hypothèse de différentiabilité. En effet, rappelons que l'un des outils fondamentaux qui nous permettent de gérer la non-différentiabilité consiste en la réinterprétation des éléments différentiels comme variables. Ainsi la coordonnée dans l'espace devient une fonction fractale $X(t, dt)$, et sa vitesse, bien que n'existant plus à la limite $dt \rightarrow 0$, se définit maintenant aussi comme fonction fractale (explicitement dépendante de dt). Mais la nouveauté est qu'il y a deux définitions au lieu d'une (qui se transforment l'une dans l'autre par la réflexion $dt \leftrightarrow -dt$), et donc que le concept de vitesse se dédouble :

$$V_+(t, dt) = \left\{ [X(t+dt, dt) - X(t, dt)]/dt \right\}_{dt \rightarrow 0} \quad (32)$$

$$V_-(t, dt) = \left\{ [X(t, dt) - X(t-dt, dt)]/dt \right\}_{dt \rightarrow 0} \quad (33)$$

La première condition (1) conduit à adopter une description de type « fluide », où l'on ne considérera plus seulement la vitesse sur un chemin individuel, mais le champ de vitesse moyen $v[x(t), t]$ de tous les chemins potentiels.

La deuxième condition (2) ramène aux travaux précédents concernant les lois d'échelle satisfaisant au principe de relativité. Nous avons vu que, dans le cas le plus simple « galiléen d'échelle », la coordonnée (solution d'une équation différentielle d'échelle) se décomposait sous forme d'un terme classique indépendant d'échelle et d'un terme asymptotique fractal. C'est ce même résultat qui va être utilisé ici, après avoir différentié la coordonnée. Ceci mène à décomposer les déplacements élémentaires $dX = dx + d\xi$ sous forme d'une moyenne indépendante d'échelle, $dx = v dt$, et d'une fluctuation $d\xi$, caractérisée par une loi de comportement fractale, $d\xi \propto dt^{1/D_F}$. Le champ de vitesse complet devient alors fractal, c'est-à-dire explicitement fonction de l'élément différentiel dt , c'est-à-dire $V = V[X(t, dt), t, dt]$.

La troisième condition (3) a pour conséquence, comme nous l'avons vu, un dédoublement des vitesses, donc ici du champ de vitesse fractal. Celui-ci, définie par $V = dX/dt = v + d\xi/dt$, se décompose donc, aussi bien en ce qui concerne V_+ que V_- , en une « partie différentiable » $v_{\pm}[x(t), t]$ non fractale (donc dérivable au sens ordinaire) et une « partie fractale » non différentiable divergente $d\xi_{\pm}/dt = W_{\pm}[X(t,dt), t, dt]$, nulle en moyenne. Sachant que la source de ce dédoublement se trouve au niveau de l'espace, et non seulement des chemins, il s'applique également au niveau des champs de vitesse moyens. On est ainsi amené à introduire un double processus tridimensionnel, (on rétablit les indices $i = 1 \text{ à } 3$ pour les trois coordonnées spatiales x, y et z)

$$dX_{\pm}^i = dx_{\pm}^i + d\xi_{\pm}^i, \quad (34)$$

dans lequel la partie différentiable $dx_{\pm}^i = v_{\pm}^i dt$, la moyenne de la partie fractale fluctuante est de moyenne nulle (par construction), $\langle d\xi_{\pm}^i \rangle = 0$ et $\langle d\xi_{\pm}^i d\xi_{\pm}^j \rangle = \pm 2 \mathcal{D} \delta^{ij} dt^{2-2/D_F}$. (35)

Les relations (34, 35) sont simplement une ré-expression différentielle tridimensionnelle de la loi d'échelle obtenue comme solution de la plus simple des équations différentielles d'échelle du premier ordre (Eq. 5). Ici δ^{ij} représente le symbole de Kronecker qui vaut 1 quand les indices sont égaux et 0 autrement. D_F est la dimension fractale des chemins considérés et $\mathcal{D}$ est un paramètre d'échelle fondamental qui caractérise leur comportement fractal, en l'occurrence, l'amplitude des fluctuations. Ce paramètre détermine également la transition essentielle qui apparaît dans un tel processus entre le comportement fractal à petite échelle (où les fluctuations dominent) et non fractal à grande échelle (où le mouvement classique moyen redevient dominant). Dans le cas particulier où la dimension fractale est $D_F = 2$ (qui joue dans cette approche le rôle critique d'une valeur pour laquelle la dépendance d'échelle n'est plus explicite dans les équations obtenues finalement), la relation précédente devient :

$$\langle d\xi_{\pm}^i d\xi_{\pm}^j \rangle = \pm 2 \mathcal{D} \delta^{ij} dt. \quad (36)$$

Nous nous concentrerons dans la suite sur ce cas, qui correspond à l'absence de corrélation et d'anti-corrélation entre événements (processus markovien). La non-différentiabilité est ici apparente, la vitesse quadratique de ces fluctuations étant $\langle W^2 \rangle = 2 \mathcal{D}/dt$, qui tend vers l'infini formellement quand dt tend vers zéro.

Une représentation naturelle du dédoublement de variables dû à l'irréversibilité de niveau infinitésimal consiste en l'utilisation de nombres complexes (on peut démontrer que ce choix est « covariant », au sens où il préserve la forme des équations).

On définit un opérateur complexe de dérivation par rapport au temps (qui porte sur les quantités macroscopiques indépendantes d'échelle, donc dérivables au sens ordinaire),

$$d/dt = (d_+ + d_-)/2dt - i(d_+ - d_-)/2dt, \quad (37)$$

puis une vitesse moyenne complexe qui résulte de l'action de cet opérateur sur la variable de position :

$$v^i = dx^i/dt = V^i - iU^i = (v_+^i + v_-^i)/2 - i(v_+^i - v_-^i)/2. \quad (38)$$

Ainsi, à la limite classique où $v_+^i = v_-^i$, la partie réelle de cette vitesse complexe s'identifie à la vitesse classique tandis que la partie imaginaire disparaît.

Après avoir défini les lois des déplacements élémentaires dans un tel processus fractal et localement irréversible, les effets de ces déplacements sur d'autres grandeurs physiques doivent être analysés. Considérons une fonction $f(X(t), t)$. Sa dérivée totale par rapport au temps s'écrit :

$$df/dt = \partial f/\partial t + \nabla f \cdot dX/dt + (1/2)(\partial^2 f/\partial X_i \partial X_j) dX_i dX_j/dt \quad (39)$$

On peut alors calculer les dérivées « avant » et « arrière » de f . Dans ce calcul, la valeur moyenne de dX/dt devient $d_\pm x/dt = v_\pm$, tandis que $\langle dX_i dX_j \rangle$ se réduit à $\langle d\xi_i d\xi_j \rangle$, si bien que le dernier terme de l'Eq. (39) se transforme en un Laplacien du fait de l'Eq. (36). On obtient alors :

$$d_\pm f/dt = (\partial/\partial t + v_\pm \cdot \nabla \pm \mathcal{D} \Delta) f. \quad (40)$$

En combinant enfin ces deux dérivées, on obtient l'expression de l'opérateur complexe de dérivation par rapport au temps :

$$d/dt = \partial/\partial t + v \cdot \nabla - i \mathcal{D} \Delta. \quad (41)$$

Il contient deux termes imaginaires supplémentaires, $-i U \cdot \nabla$ et $-i \mathcal{D} \Delta$, en plus de l'opérateur de dérivation totale ordinaire, $d/dt = \partial/\partial t + V \cdot \nabla$.

L'équation fondamentale de la dynamique peut alors être réécrite en utilisant cet opérateur de dérivation comme une « dérivée covariante » (au sens où elle préserve la forme de cette équation dans la nouvelle situation de fractalité et de non-différentiabilité) : les nouveaux effets considérés seront automatiquement pris en compte. On obtient l'équation tridimensionnelle

$$m \, dv/dt = -\nabla \phi. \quad (42)$$

où ϕ est un terme de potentiel extérieur. Dans le cas où il n'y a pas de potentiel extérieur (et plus généralement où ce potentiel peut lui-même être décrit de façon géométrique à l'aide d'une dérivée covariante, comme pour la gravitation en relativité générale et les champs de jauge en relativité d'échelle), cette équation, via le principe de covariance forte, se ramène à une équation des géodésiques, ayant la même forme que l'équation du mouvement inertiel dans le vide, dépourvu de toute force, $m \, dv/dt = 0$.

Plus généralement, on peut reprendre le déroulement de la construction de la mécanique lagrangienne avec ce nouvel outil : on obtient des équations d'Euler-Lagrange complexes dont l'équation (42) est un cas particulier. Par ailleurs, le caractère complexe de la vitesse v implique celui de la fonction de Lagrange, donc de l'action S .

Une fonction d'onde ψ s'introduit alors très simplement comme une ré-expression de cette action complexe :

$$\psi = e^{iS/2m\mathcal{D}}. \quad (43)$$

Elle est donc reliée à la vitesse complexe, comme suit :

$$v = -2i \mathcal{D} \nabla \ln \psi. \quad (44)$$

Nous pouvons maintenant changer d'outil de description et écrire l'équation de Newton ci-dessus (Eq. 42) en fonction de cette fonction d'onde :

$$2im \mathcal{D} d(\nabla \ln \psi)/dt = \nabla \varphi. \quad (45)$$

Après quelques calculs, cette équation s'intègre sous forme d'une équation de Schrödinger (Nottale, 1993) :

$$\mathcal{D}^2 \Delta \psi + i \mathcal{D} \partial \psi / \partial t - (\varphi/2m) \psi = 0. \quad (46)$$

On retrouve l'équation de la mécanique quantique standard pour le cas particulier $\mathcal{D} = \hbar/2m$. En posant $P = |\psi|^2$, on trouve que la partie imaginaire de cette équation est une équation de continuité pour le champ de vitesse V , (identifié précédemment comme vitesse classique à la limite classique),

$$\partial P / \partial t + \text{div}(P V) = 0, \quad (47)$$

et que sa partie réelle est une équation d'Euler,

$$(\partial / \partial t + V \cdot \nabla) V = -\nabla (\varphi + Q) \quad (48)$$

ce qui justifie l'interprétation de P comme une densité (ici, de probabilité, postulat de Born). Dans cette dernière équation, il apparaît, comme manifestation de la géométrie fractale, un terme de potentiel « quantique » supplémentaire, qui dépend uniquement de la densité de probabilité :

$$Q = -2m \mathcal{D}^2 (\Delta \sqrt{P}/\sqrt{P}). \quad (48)$$

Les divers postulats de la mécanique quantique standard, en plus de l'obtention, présentée ici de manière succincte, de la fonction d'onde et de son caractère complexe, du postulat de Born et de l'équation de Schrödinger, peuvent également être dérivés dans ce cadre (Nottale et Célérier, 2007), ainsi que les équations de Klein-Gordon, Pauli et Dirac (Célérier et Nottale, 2004, 2006).

Application à la mécanique quantique standard

Dans l'application du formalisme à la mécanique quantique en microphysique (physique moléculaire, atomique, nucléaire et des particules), on considère que la non-différentiabilité de l'espace-temps est effective de manière exacte vers les petites échelles : en effet, toute existence d'un niveau subquantique où la différentiabilité réapparaîtrait impliquerait l'existence de paramètres cachés, ce qui est exclu par l'invalidation des inégalités de Bell dans les expériences de type Einstein-Podolski-Rosen (EPR, voir ci-dessous).

De plus, on y identifie l'« onde-particule » avec les géodésiques elles-mêmes (qui sont toujours en nombre infini) sans qu'il soit nécessaire d'introduire une « particule » qui posséderait de manière intrinsèque une masse, une charge ou un spin, et suivrait une « trajectoire », car ces diverses quantités physiques peuvent se construire à partir de la géométrie même des géodésiques. Une mesure se ramène alors, dans un grand nombre de cas, à une sélection de certaines des géodésiques parmi un ensemble plus vaste (celle dont les propriétés géométriques correspondent aux grandeurs mesurées) : le *postulat de von Neumann*, suivant lequel juste après une mesure les système se trouve dans l'état donné par la mesure, s'en déduit simplement. Des phénomènes typiquement quantiques, tels que l'indiscernabilité de particules identiques se comprennent également aisément dans un tel cadre de description : comme il s'agit d'un ensemble de pures lignes géométriques, rien ne peut venir les distinguer. Il existe donc un ensemble de géodésiques représentant, par exemple, deux électrons, sans qu'on puisse attribuer une géodésique fractale donnée à l'un ou l'autre électron.

Le formalisme relativiste d'échelle rend compte également de l'intrication quantique, dans laquelle un système peut être décrit par un mélange de propriétés sans qu'aucune des propriétés individuelles ne soient définies. En effet, seules des propriétés géométriques communes à l'ensemble des géodésiques permettent d'attribuer à la « particule » une masse, un spin ou d'autres caractères bien définis, alors que dans la plupart des cas, on peut envisager des ensembles de géodésiques aux propriétés géométriques extrêmement complexes pour lesquelles seules existent des probabilités des valeurs de ces propriétés. Par exemple, dans une expérience EPR typique, on émet simultanément deux électrons dont les spins sont tels que $s_1 + s_2 = 0$, sans que ni s_1 ni s_2 n'aient de valeur déterminée. Le spin total est une quantité conservative (un moment angulaire propre) qui caractérise, dans la représentation géométrique de la relativité d'échelle, l'ensemble des géodésiques décrivant les deux

électrons. Une telle quantité fondamentalement non locale (comme l'est le réseau de géodésiques lui-même) caractérise bien le système dans son ensemble, sans être localisée ni pouvoir être attribuée à l'un ou l'autre électron séparément. À la suite d'une mesure du spin d'un des électrons (par un aimant de Stern et Gerlach), il y a sélection d'un sous-ensemble des géodésiques caractérisé par une valeur précise du spin, par exemple $s_1 = 1/2$ (qui ne préexistait donc pas à la mesure). Sachant que toutes les géodésiques sont telles que $s_1 + s_2 = 0$, le sous-ensemble résiduel trié par la mesure possède bien cette propriété et le deuxième électron a donc automatiquement et immédiatement un spin $s_2 = -1/2$. Aucun transport d'information éventuellement plus rapide que la lumière n'est nécessaire pour cela : la fonction d'onde est, dans ce cadre, une représentation du champ de vitesse des géodésiques virtuelles (Eq. 44), et la « réduction du paquet d'onde » est une simple réduction de leur ensemble, soit par l'effet d'une mesure effective qui en sélectionne un sous-ensemble, soit de manière encore plus simple par une connaissance acquise sur le système (Nottale, 2009a, b).

Application à une nouvelle mécanique macroscopique de type quantique

Mais une autre application du formalisme peut être faite aux échelles macroscopiques, avec une autre interprétation. En effet, les trois conditions principales issues de la non-différentiabilité qui transforment l'équation des géodésiques en une équation de forme Schrödinger (pour une fonction ψ telle que $P = |\psi|^2$) peuvent aussi être réalisées, au moins comme approximations, dans d'autres contextes (chaos, turbulence, mouvement dans un milieu fractal, application au système de potentiels quantiques naturels ou artificiels, etc.). Dès lors qu'il existe un très grand nombre de trajectoires potentielles de dimension fractale 2, sur une gamme d'échelles suffisante pour que cette dimension soit bien définie (au moins 10^4 ou 10^5), une irréversibilité « microscopique » (pour les éléments temporels petits devant l'échelle temporelle du système), et une dynamique newtonienne (ou l'action d'une force produit une accélération), l'équation de la dynamique peut s'intégrer sous forme d'une équation de Schrödinger. La non-différentiabilité n'est alors qu'une approximation valable sur une certaine gamme d'échelles (elle se traduit par une dépendance d'échelle explicite pour ces échelles). De plus, cette situation est à nouveau celle de particules ou de corps suivant des trajectoires, si bien que les aspects les plus profonds de la mécanique quantique standard (indiscernabilité, intrication, paradoxe EPR, principe

d'exclusion de Fermi, etc.) ne sont bien sûr pas réalisés dans ce cas. Par contre, le point essentiel est que l'ensemble de la structure mathématique reliant l'équation de la dynamique à l'équation de Schrödinger et son interprétation (postulat de Born) ne dépend en aucun cas de la forme prise par la constante $\mathcal{D}$. La mécanique quantique standard correspond à la valeur particulière microscopique $\mathcal{D} = \hbar/2m$, (il s'agit en fait, à des constantes près, de l'échelle de Compton de la particule), mais l'ensemble des développements restent valables pour une constante macroscopique, qui peut dépendre du système considéré...

Exemples de solutions spatiales de l'équation de Schrödinger

Concluons ce résumé du formalisme par quelques exemples de morphologies dans l'espace obtenues comme solutions de l'équation des géodésiques de la relativité d'échelle, qui peut prendre, après intégration, la forme d'une équation de Schrödinger. Celle-ci donne en fait un continuum de morphologies possibles, parmi lesquelles il est possible de spécifier les plus probables.

Processus de croissance à partir d'un centre

L'équation du mouvement d'expansion libre à partir d'un centre sous des conditions de fractalité et de non-différentiabilité se transforme en une équation de Schrödinger libre qui peut s'appliquer (avec des différences liées à la spécificité de chaque domaine) à un grand nombre de phénomènes divers à des échelles différentes : collision de particules sur un noyau (« diffusion », onde sphérique sortante) en physique des particules, croissance végétale en biologie (fig. 4.24), nébuleuses « planétaires » (éjections de leurs couches extérieures par certaines étoiles) en astrophysique (fig. 4.25).

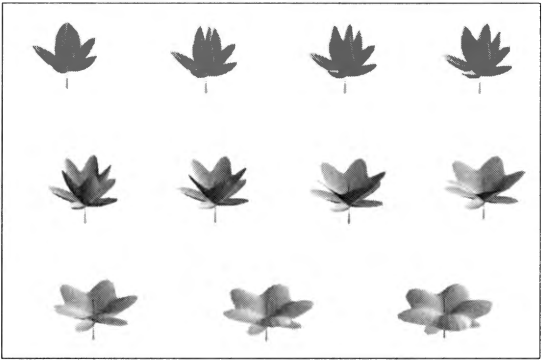


Figure 4.24. Animation de l'ouverture d'une forme florale.
Solution d'une équation de Schrödinger décrivant un processus de croissance à partir d'un centre avec brisure de symétrie haut-bas et force constante vers le bas. Les « pétales », « sépales » et « étamines » émergent tous de la même solution, et sont tracés suivant les angles de probabilité maximale. On passe d'une étape à la suivante en faisant varier la force de tension dans le potentiel extérieur (qui contient un terme de gravité).

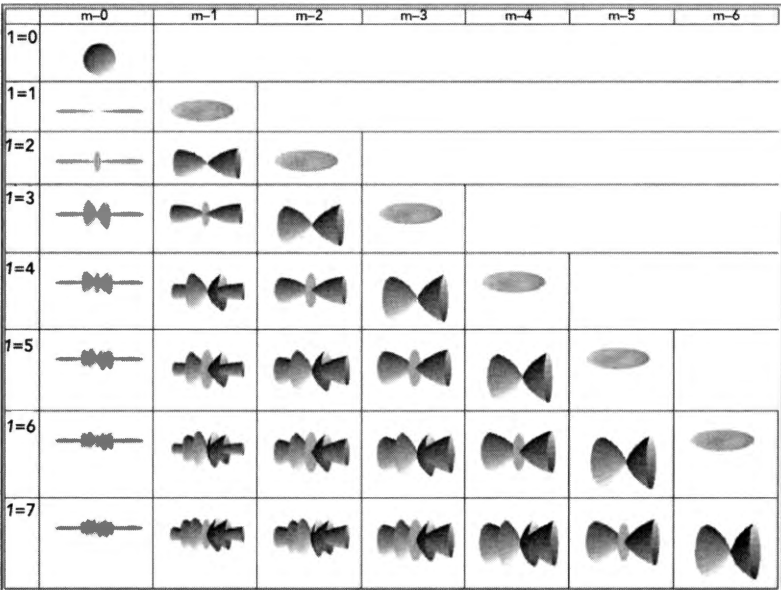


Figure 4.25. Exemple de morphologies quantifiées obtenues comme solution d'une équation de Schrödinger (mouvement libre, onde sphérique sortante à partir d'un centre).
Les différentes formes obtenues dépendent des valeurs quantifiées du carré du moment angulaire, caractérisée par le nombre quantique l , et de sa projection sur un axe, donnée par le nombre quantique m (d'après da Rocha et Nottale, 2003). Les angles des différentes nappes (qui correspondent ici aux pics de probabilité) sont eux-mêmes quantifiés en fonction de ces nombres quantiques.

Équation dépendante du temps : duplication

Une autre application possible est la construction de modèles de duplication. La quantification des morphologies probables a pour conséquence qu'une augmentation d'énergie ne conduira pas à une augmentation de taille du système, mais à un changement de sa structure. Dans le cas illustré fig. 4.26 (solutions d'une équation de Schrödinger dans un potentiel d'oscillateur harmonique tridimensionnel isotrope), étant donné que l'énergie est elle-même quantifiée, son augmentation ne permettra pas l'apparition d'une nouvelle structure avant qu'elle n'ait atteint son niveau de quantification suivant. Pour cette énergie c'est alors un système double qui apparaît.

Si l'on suit les trajectoires fractales depuis le système simple initial jusqu'au système double final, on trouve que tous les points du système initial se retrouvent dans chacun des deux sous-systèmes finaux.

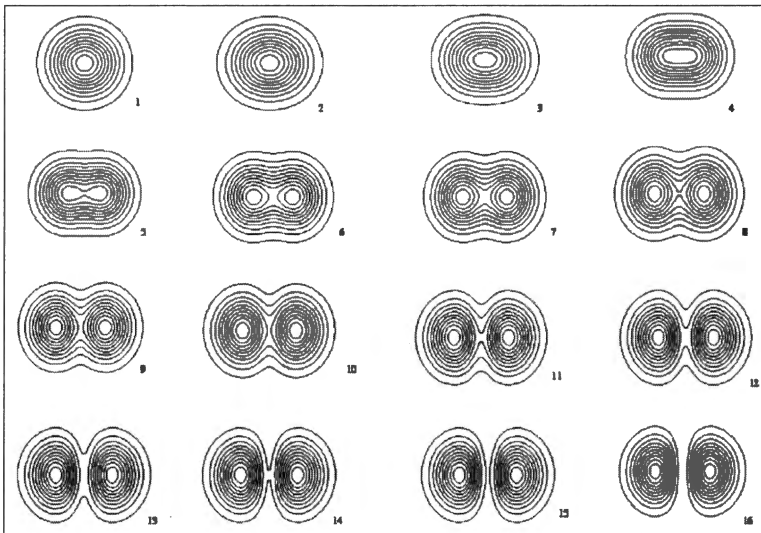


Figure 4.26. Solution d'une équation de Schrödinger dépendante du temps ($t = 1$ à 16), pour un saut d'énergie depuis l'état fondamental (un objet simple) jusqu'à un état dédoublé (premier niveau excité).

Les niveaux initial ($t = 1$) et final ($t = 16$) sont stables (solutions de l'équation indépendante du temps), mais il n'y a pas de solution stationnaire entre ces deux niveaux, si bien que le système est forcé de passer spontanément du premier au second lorsque l'énergie augmente.

Conclusion

Le « *principe de la relativité d'échelle* » postule que *les lois fondamentales de la nature doivent être valides, quel que soit « l'état d'échelle » du système de référence*. Il reprend et complète ainsi le « *principe de relativité* » de Galilée, Poincaré et Einstein qui s'appliquait seulement aux états de position, d'orientation et de mouvement.

En conséquence, la géométrie de l'espace-temps, qui devient « *courbe* » en relativité générale d'Einstein (cette courbure se manifestant comme ce qu'on appelle la gravitation) peut également devenir « *fractale* » sur certaines gammes d'échelles, en particulier aux petites échelles (relative) de la physique des particules et aux grandes échelles cosmologiques. Cette fractalité et cette nondifférentiabilité de l'espace-temps, se manifestent elles-mêmes sous forme de lois de type *quantique*, (fonctions d'onde, solutions d'équations de Schrödinger généralisées).

Mais dans le cas de la relativité d'échelle, *petit* et *grand* sont tout à fait relatifs. Rappelons en effet que le domaine classique peut s'étendre à grande énergie, vers des échelles microscopiques. Inversement, il existe des systèmes quantiques macroscopiques, comme les superconducteurs.

Il n'y a donc pas un domaine intermédiaire universel qui serait forcément classique ou quantique en soi. Chaque système, en fonction de ses conditions (vitesse, énergie, température, masse...), peut se retrouver, pour un même point de l'espace et à la même échelle, classique ou quantique.

La plus petite dimension théoriquement possible n'est pas le zéro comme on le pense généralement, mais, dans le cadre de la relativité d'échelle, une très petite dimension qui correspond à ce que l'on appelle « *l'échelle de longueur de Planck* » dont la valeur est de 10^{-33} cm soit : 0. 000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 cm.

À l'autre bout des échelles de l'univers, toujours dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle, s'introduit également une échelle maximale, indépassable (sous forme d'un horizon), identifiée à l'« *échelle de la constante cosmologique* » qui correspond à une dimension de l'ordre de 10^{28} cm, soit : 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 cm.

Dans ce large espace, la vie se rencontre dans la zone médiane de ces échelles, entre l'atome qui constitue la base de la matière vivante (rayon de Bohr à 0,5 Angström), les plus petits éléments vivants, les virus, de taille inférieure au micron, les bactéries aux environs de 40 microns

et l'animal actuel le plus grand de la planète, la baleine bleue qui peut dépasser 30 m.

À ces échelles, l'espace-temps au sens d'Einstein (fondamental) n'est pas fractal, mais par contre le milieu biologique montre un grand nombre de structures fractales sur une large gamme d'échelles. Un tel milieu peut jouer, en ce qui concerne les objets biologiques (organites dans la cellule, cellule dans le tissu, etc.) qui y sont plongés, le rôle effectif d'un champ ou d'un espace fractal, ce qui pourrait mener à l'apparition de certaines propriétés de type quasi-quantique pour la dynamique de ces objets. Dans ce cadre, l'interaction entre l'objet et l'espace ou le milieu qui le contient devient essentielle. C'est tout un nouveau domaine d'investigation en biologie qui est ouvert par cette perspective.

En ce qui concerne la construction théorique, il existe au niveau microscopique (de la théorie) une fractalité fondamentale stochastique inhérente à l'espace-temps qui manifeste simplement les lois les plus générales possibles, sous la contrainte des principes premiers. Ainsi le hasard et l'indétermination sont sous-jacents à cette description, sous la forme de lois du hasard du type fractales (lois de puissance et leurs généralisations). Sur la base de ces lois statistiques microscopiques, des équations sont dérivées, dont les solutions montrent des propriétés d'auto-organisation et de structuration.

Cette construction des équations de la relativité d'échelle passe par l'introduction d'un « *espace des échelles* » qui est l'espace des résolutions et de leurs transformations, c'est-à-dire des zooms et des (dilatations et contractions) qui font passer d'une échelle à une autre. La méthode choisie pour la description de ces changements d'échelle est celle des équations différentielles. Autrement dit, il s'agit de décrire les changements des structures de l'espace des échelles dans des transformations infinitésimales (c'est-à-dire sous l'action d'un zoom infinitésimal). L'espace des échelles est donc un cadre de description des structures internes de ce qui était considéré comme des points dans l'espace-temps standard et n'était donc pas structuré dans les théories précédentes de la relativité restreinte et générale.

On peut alors construire des lois d'échelle de complexité croissante par la prise en compte, dans l'espace des échelles, d'équations différentielles du premier ordre (linéaires), puis du deuxième ordre (non-linéaires). Cette évolution est similaire à celle des lois du mouvement, qui sont passées d'une simple description du mouvement inertiel galiléen à toute la complexité des lois de la dynamique. A un niveau de complexité encore plus profond, de même qu'on a pu passer de lois du mouvement classiques à des lois quantiques, il est possible d'introduire une description des lois

d'échelle de type quantique, permettant, entre autres, de rendre compte de manière probabiliste d'une organisation hiérarchique.

Une fois cette structuration interne prise en compte, la suite de la construction consiste à décrire les déplacements de ces « points structurés » dans l'espace-temps standard. Cette nouvelle approche très générale a montré que la dynamique classique se transformait en une dynamique nouvelle ayant un caractère quasi-quantique, naturellement et spontanément capable de morphogenèse. C'est ainsi que l'on s'attend dans ce cadre à voir apparaître des morphologies comme matérialisation de zones de plus hautes probabilités. C'est-à-dire que l'on aborde ici une *théorie très générale de l'auto-organisation* en particulier au niveau de la morphogenèse et de l'évolution morphologique.

Cette théorie, qui repose sur des lois universelles, a des applications multiples et certaines de ses prédictions ont été testées avec succès en *astrophysique*, en ce qui concerne de nombreuses structures planétaires, stellaires, galactiques et extragalactiques. Par exemple, cette approche a permis de prédire, avant la découverte d'exoplanètes, l'existence de structures communes dans les systèmes planétaires extrasolaires, ou même de préciser l'espace des morphologies possibles des enveloppes éjectées par certaines étoiles, dont plusieurs ont été vérifiées par les données récentes du télescope Hubble.

Elle a aussi été testée favorablement en *géosciences* (tremblements de terre), en paléontologie et en économie (répartition des événements évolutifs des clades et des crises selon des lois de probabilité).

En ce qui concerne les *sciences de la vie*, l'approche relativiste d'échelle permet de proposer de nouvelles voies de recherche. La fractalité et l'irréversibilité sous-jacente à de nombreux processus biologiques permet d'envisager, que sous certaines conditions, un régime de comportement décrit par des équations de type Schrödinger généralisée puisse exister. Dans ce cadre, des énoncés nouveaux peuvent être proposés, telle la suggestion d'un lien profond entre sauts d'énergie quantifiés et duplications ou branchement. Les propriétés auto-organisatrices des diverses solutions de l'équation généralisée de Schrödinger, agissant aussi bien dans l'espace ordinaire que dans l'espace des échelles (qui décrivent un nombre croissant de niveaux d'organisation imbriqués de manière log-périodique) pourraient également apporter une contribution à une compréhension future de l'« origine » de la vie et de son évolution. En effet, cette équation possède des solutions stationnaires (indépendantes du temps) qui peuvent décrire l'*émergence spontanée de structures quantifiées* indépendamment des conditions initiales (contrairement aux approches classiques déterministes, dont les solutions à ce problème

s'expriment en termes de causalité et d'origine). De plus, ces structures auto-organisées se construisent sur les conditions aux limites et de champ extérieur, ce qui se traduit par des conditions d'environnement dans une telle application en biologie.

Enfin, en ce qui concerne les applications en *sciences humaines*, le résultat principal est l'ouverture d'un horizon de compréhension de l'évolution à venir des sociétés au XXI^e siècle, qui se caractérise par un temps critique prévu dans les années 2050-2080, estimation confirmée par de nombreuses études indépendantes. La situation des sociétés humaines peut actuellement se définir comme une construction multi-échelle, développée par exemple de l'échelle régionale à l'échelle mondiale, en passant par les niveaux intermédiaires nationaux et continentaux. Dans ce cadre, un autre résultat obtenu, suite à l'analyse en terme de complémentarité « individuel/collectif », est la conclusion de l'absence d'un authentique niveau « collectif » mondial, l'échelle mondiale n'étant actuellement occupée que par des instances de type « individuel » (firmes et banques multinationales).

Notons pour finir que cette théorie fait apparaître une caractéristique extrêmement importante *de la notion d'échelle*. Qu'il s'agisse de la taille des objets, de celle des fenêtres d'observation ou d'expérience, de la résolution de l'appareil de mesure, ou même des échelles de transition entre régimes d'échelle différents, *aucune d'entre elles n'a d'existence absolue, toutes sont définies de manière relative, dans des rapports deux à deux*.

Érigé en principe premier, ce fait d'expérience universel, devient, au-delà du simple constat, la pierre angulaire de la fondation, de la construction et du développement d'une nouvelle théorie de la relativité, appliquée aux changements d'échelle.

En introduisant la résolution dans le principe de relativité, la théorie de la relativité d'échelle fait ainsi le lien entre la physique classique et la mécanique quantique, qui ne s'opposent plus, mais émergent toutes deux d'une loi unique plus générale.

Références

- Agnese, A.G. & Festa, R. 1997. *Clues to the Discretization on the Cosmic Scale*. *Phys. Lett. A*. 227 : 165-171.
- Allègre, C., Le Mouél, J.L. & Provost, A. 1982. *Scaling Rules in Rock Fracture and Possible Implications for Earthquake Prediction*. *Nature*. 297 : 47-49.
- Alunni, C. & Nottale, L. sous presse. *Pour une diagrammatique catégoriale. Mélanges pour Gilles Châtelet*. Colloque en l'honneur de Gilles Châtelet. *Revue de synthèse*. Springer.
- Arasu, P., Wightman, B. & Ruvkun, G. 1991. *Temporal Regulation of Lin-14 by the Antagonistic Action of two other Heterochronic Genes*. *Genes & Dev*. lin-4 and lin-28. 5 : 1825-1833.
- Arnéodo, A. & Sornette, D. 1984. *Monte Carlo Random Walk Experiments as a Test of Chaotic Orbits of Maps of the Interval*. In : *Phys. Rev. Lett.* 52 : 1857-1860.
- Arnéodo, A., Nacry, E., Graves, P.B.V. & Muzy, J.F. 1995. *Characterizing Long-Range Correlations in DNA Sequences from Wavelet Analysis*. *Phys. Rev. Lett.* 74 : 3293-3296.
- Aspect, A. & Dalibard, R. 1982. *Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers*. *Physical Review Letters*. 49 (25) : 1804.
- Avnir, D., Biham, O., Lidar, D. & Malcai, O. 1998. *Is the Geometry of Nature Fractal ?*. *Science*. 279 : 39-40.
- Bak, P. 1996. *How Nature Works : The Science of Self-Organized Criticality*. New York. Copernicus.
- Barabasi, A.L., Buldyrev, S.V., Stanley, H.E. & Suki, B. 1996. *Avalanches in the Lung : a Statistical Mechanical Model*. *Phys. Rev. Lett.* 76 : 2192-2195.
- Barnsley, M. 1988. *Fractals Everywhere*. Boston. Academic Press.
- Barnsley, M., Davaney, R.L., Mandelbrot, B.B., Peitgen, H.-O., Saupe, D. & Voss, R.F. 1988. *The Science of Fractal Images* (Peitgen H.-O. & Saupe, D. eds.). Springer Verlag. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo. 312 p.
- Benton, M.J. 1985. *Mass Extinction among Non-Marine Tetrapods*. *Nature*, 316 : 811-814.
- 1985. *The Red Queen put to the test*. *Nature*, 313 : 734-735.
- 1993. *The Fossil Record 2*. London. Chapman & Hall.
- 1997. *Models for the Diversification of Life*. *Trends Ecol. Evol.* 12(12) : 490-495.

- Bernal, J.D. 1951. *The Physical Basis of Life*. Routledge and Kegan Paul. Londres.
- Bohr, N. 1935. *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ?*. *Physical Review*. 48 : 696.
- Brack, A. & Raulin, F. 1991. *L'Évolution chimique et l'origine de la vie*. Masson. Paris.
- Brasier, D., Green, O.R., Jephcoat, A.P., Kleppe, A.K., Van Kranendonk, M.J., Lindsay, J.F., Steele, A. & Grassineau, N.V. 2002. *Questioning the Evidence for Earth's Oldest Fossils*. *Nature*. 416 : 76-81.
- Brasier, M.D., Green, O.R., Lindsay, J.F. & Steele, A. 2003. *Earth's Oldest (3.5 Ga) and the « Early Eden Hypothesis » : Questioning the Evidence. Origins of Life and Evolution of the Biosphere*.
- Brissaud, I. & Baron, E. 2007. *La Course des accélérateurs de particules vers les hautes énergies et la log-périodicité*. Cybergeog, *Revue européenne de géographie*.
- Brissaud, I. (sous presse). *Évolution des ordres religieux et log-périodicité. Mathématiques et sciences humaines*, EHESS.
- Brissaud, I. 2007. *Évolution Log-Périodique du Jazz. Mathématiques et sciences sociales*. 178 : 41-50.
- Buldyrev, S.V., A.L. Goldberger, S. Havlin, Peng C-K. & Stanley H.E. 1994. *Fractals in Biology and Medicine : From DNA to the Heartbeat*. In : *Fractals in Biology and Medicine* (Armin, B. & Halvin, S., Eds.). Springer Verlag. 3. P. 49-87.
- Bunde, A. & Havlin, S. (Eds). 1994. *Fractals in Science*. Springer Verlag.
- Burlando, B. 1990. *The Fractal Dimension of Taxonomic Systems*. *J. Theor. Biol.*, 146 : 99-114.
- 1993. *The Fractal Geometry of Evolution*. *J. Theor. Biol.* 163 : 161-172.
- Cahn, J.W. 1995. *On the Discovery of Quasicrystals as a Kuhnian Scientific Revolution : Epilogue*. In : *Proceedings of the 5th International Conference on Quasicrystals*. (Janot, C & Mosseri, R., Eds.). World Scientific. P. 807-810.
- Cairns-Smith, G. 1982. *Genetic takeover and the mineral origin of life*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Cash, R., Chaline, J., Nottale, L. & Grou, P. 2002, *Développement humain et loi log-périodique*. *C.R. Biologies*. 325. 585-590.
- Célérier, M.-N. & Nottale, L. 2004. *Quantum-Classical Transition in Scale Relativity*. *J. Phys. A*, 37 : 931-955.
- 2006. *The Pauli equation in scale relativity*.

- Chaline, J. & Brunet-Lecomte, P. 1990. *Modélisation des modalités de l'évolution*. C. R. Ac. Sc. Paris, 311, II : 1031-1036.
- Chaline, J., David, B., Magniez-Jannin, F., Dambricourt-Malasse, A., Marchand, D., Courant, F. & Millet, J.-J. 1998. *Quantification de l'évolution morphologique du crâne des Hominidés et hétérochronies*. C. R. AC. Sc. série IIa. 326(4) : 291-298.
- Chaline, J. & Brunet-Lecomte, P. 1992. *Anatomie de la radiation européenne des Arvicolidae (Rodentia) : un test quantifié du modèle des Équilibres/Déséquilibres ponctuels*. C. R. Ac. Sc. Paris. 314(II) : 251-256.
- Chaline, J., Nottale, L. & Grou, P. 1999. *L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ? Le Point sur...* C. R. Ac. Sc. Paris. 328. (IIa) : 717-726.
- Chaline, J. 1987. *Arvicolid Data and Evolutionary Concepts*. *Evolutionary Biology*. 21 : 237-310.
- 1998. Vers une approche globale de l'évolution des Hominidés. *Le Point sur...*, C. R. Ac. Sc. Paris. 326 (3II). 307-318. 005.
- 2000. *Un million de générations. Aux sources de l'humanité*. Seuil, Paris.
- 2003. *Continu versus discontinu, linéaire versus non linéaire dans l'évolution des espèces*. C. R. Palevol. 2. (6/7) : 413-421.
- 2006. *Quoi de neuf depuis Darwin ? La théorie de l'évolution dans tous ses états*. Ellipses. Paris.
- 2007. *Le Défi démographique*. In : *Les grands défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle*. (Bourgeois, P. & Grou, P., Éd.). Ellipses. Paris Chap. 14 : 191-198.
- Cooper, G.M. 1999. *La cellule : Une approche moléculaire*. De Broeck Université.
- Cornec, J.-P. & Gilles, A. 2006. *Urbilateria, un être évolué ? Médecine/Sciences*. 22 : 493-501.
- Cournot A. 1843, *Exposition de la théorie des chances et des probabilités*. Paris. Vrin (réédition 1984).
- 1851. *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*. Hachette. Paris.
- 1861. *Traité sur l'enchaînement des idées fondamentales dans les Sciences et dans l'Histoire*. Hachette. Paris.
- Crick, F. 1982. *La Vie vient de l'espace*. Hachette. Paris.
- Da Rocha, D. & Nottale, L. 2003a. *Gravitational Structure Formation in Scale Relativity. Chaos, Solitons and Fractals*. 16 : 565-595.
- 2003b. *On the Morphogenesis of Stellar Flows. Application to Planetary Nebulae*. *arXiv : astro-ph/0310031*.

- Da Rocha, D. 2004, *Structuration gravitationnelle en relativité d'échelle*. Thèse de doctorat (Observatoire de Paris, école doctorale d'astronomie et d'astrophysique d'Île de France).
- Dambricourt Malassé, A. 1988. *Hominisation et foetalisation*. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Paris. 307(2) : 199-204.
- 1993. *Continuity and Discontinuity during Hominization*. *Quaternary International*. 29 : 86-98.
- Danchin, A. 1990. *Une aurore de pierres. Aux origines de la vie*. Le Seuil. Paris.
- Dauvillier, A. & Desguins, E. 1942. *La genèse de la vie*. Hermann. Paris.
- David, B. & Mooi, R. 1999. *Comprendre les échinodermes : la contribution du modèle extraxial-axial*. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 170 (1) : 91-101.
- De Duve, C. 1990. *Construire une cellule*. Dunod, Interéditions U, Paris.
- 2002. *À l'écoute du vivant*. O. Jacob. Paris.
- 2005. *Singularités. Jalons sur les chemins de la vie*. O. Jacob. Paris.
- Delattre, A. & Fenart, R. 1954. *Rotation occipitale positive et négative*. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Paris. 239 : 676-678.
- 1956. *L'hominisation du crâne est-elle terminée ?* *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*. Paris. 243 : 429-431.
- 1960. *L'Hominisation du crâne*. CNRS. Paris.
- Delsemme, A. 1994. *Les Origines cosmiques de la vie*. Flammarion. Paris.
- Devienne, F.M., Barnabé, C. & Ourisson, G. 2002. *Synthesis of Further Biological Compounds in Interstellar-Like Conditions*. *C. R. Chimie*. 5 : 651-653.
- Devillers, C. & Chaline, J. 1989. *La Théorie de l'évolution. État de la question à la lumière des connaissances scientifiques actuelles*. Dunod. Paris.
- Ditengou, F.A., Teale, W.D., Kochersperger, P., Flittner, K.A., Kneuper, I., Graaff, E. van der, Pinosa, F., Li, X., Nitschke, R., Laux, T. & K. 2008. *Mechanical Induction of Lateral Root Initiation. Arabidopsis thaliana*. *PNAS*. 105(48) : 18818-18823.
- Dolle, P., Izpisua-Belmonte, J.-C., Falkentsein, H., Renucci, A. & Duboule, D. 1989. *Coordinate Expression of the Murine Hox-5 Homeobox Containing Gene during Limb Pattern Formation*. *Nature*. 342 : 767-772.
- Douady, S. & Couder, Y. 1996. *Phyllotaxis as a Dynamical Self Organizing Process*. *J. Theor. Biol.* (Part I, II, III). 139 : 178-312.
- Dubois, J., Chaline, J. & Brunet-Lecomte, P. 1992. *Spéciation, extinction et attracteurs étranges*. *C. R. Ac. Sc. Paris*. 315(II) : 1827-1833.

- Dubois, J. & Chaline, J. 2006. *Le Monde des fractales. La géométrie cachée de la nature*. Ellipses. Paris.
- Dubois, J. 1995. *La Dynamique non linéaire en physique du globe*. Masson. Paris.
- Dyens, O. 2008. *La Condition-inhumaine. Essai sur l'effroi technologique*. Flammarion. Paris. P. 15, 36, 49-50, 177, 180.
- Einstein, A. 1905. *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*. *Annalen der Physik*. 17 : 891-921.
- 1916. *Fondation de la théorie de la relativité générale*. *Annalen der Physik*. 49 : 769-882 (translated in : *The Principle of Relativity*. Dover. 1923, 1952. P. 111-164.
- 1917. *Sitzungsberichte der Preussischen Akad. d. Wissenschaften* traduit en anglais dans *The principle of relativity*. Dover. P. 177-188.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. 1935. *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete ?* *Physical Review*. (41) : 777 (15 May 1935).
- Eldredge, N. & Gould, S.J. 1972. *Punctuated equilibria : an alternative to phyletic gradualism. Model in Paleobiology*. (Schopf, T.J.M. Éd.). Freeman, Cooper. San Francisco. P. 82-115.
- Evans, N.W. & Tabachnik, S. 1999. *Possible Long-Lived Belts in the Inner Solar System*. In : *Nature*. 399 : 41-43.
- Feigenbaum, M. 1981. *Universal Behavior in Nonlinear Systems*. Los Alamos Science. 1 : 4-27.
- Ferone, G. 2008. 2030, *Le Krach écologique*. Grasset. Paris. P. 15.
- Fitch W M & Margoliash E. 1967. *Construction of Phylogenetic Trees*. *Science*. 155 : 279-84.
- Fleury, V. 2006. *De l'œuf à l'éternité*. Flammarion. Paris.
- 2009. *Clarifying Tetrapod Embryogenesis, a Physicist's Point of View*. In : *Eur. Phys. Appl. Phys.* 45 : 30101.
- Ford, H. 2008. *L'aventure de l'économie racontée par les grands écrivains*. *Capital*. Hors série Juin : 41.
- Forterre, P., Gribaldo, S. & Brochier, C. 2005. *Luca : à la recherche du plus proche ancêtre commun universel*. *Médecine/Sciences*. 21 : 860-5.
- Frenkel, R. 2003. *Biological Permanent Magnets. Hyperfine Interactions*. 151/152 : 145-153.
- Fuerst, J.A. 1995. *The Planctomycetes : Emerging Models for Microbial Ecology, Evolution and Cell Biology*. *Microbiol.* 141 : 1493-1506.
- Galopeau, P., Nottale, L., Ceccolini, D., Da Rocha, D., Schumacher, G. & Tran-Minh, N. 2004. *Distribution of Orbital Elements of Planets and*

- Exoplanets in Scale Relativity. Scientific Highlights 2004. Proceedings of the Journées de la SF2A.* (F. Combes, D. Barret, T. Contini, F. Meynadier & L. Pagani Eds.). EDP Sciences. P. 75-76.
- Gayon, J. 1994. *Le hasard dans la théorie évolutionniste moderne : une analyse philosophique.* *Bulletin de la société d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie.* 1 : 4-16.
- Glass, L. & Mackey, M. 1988. *From Clocks to Chaos : The Rythms of Life.* Princeton University Press.
- Gould, S.J. & Eldredge, N. 1993. *Punctuated Equilibrium Comes of Age.* *Nature.* 366 : 223-227.
- Gould, S.J. (Éd.) 1993. *The Book of Life.* Ebury Hutchinson. London.
- 1991. *La Vie est belle. Les surprises de l'évolution.* Seuil. Paris.
- 1997. *L'Éventail du vivant.* Le Seuil. Paris.
- Gouyet, J.F. 1992. *Physique et structures fractales.* Masson. Paris.
- Gozdziewski, K., Konacki, M. & Wolszczan, A. 2005. *Long-term Stability and Dynamical Environment of the PSR 1257+12 Planetary System.* *Astrophysical Journal.* 619 : 1084-1097.
- Green, D.M. 1991. *Chaos, Fractals and Nonlinear Dynamics in Evolution and Phylogeny.* *Trends in Ecology and Evolution.* 6(10) : 333-337.
- Green, P.B. 1999. *Expression of Pattern in Plants : Combining Molecular and Calculus-Based Biophysical Paradigms.* *Am. J. Bot.* 86 : 1059-1076.
- Green, P.B., Steele, C.S. & Rennich S.C. 1996. *Phyllotactic Patterns : a Biophysical Mechanism for their Origin.* *Annals of Botany.* 77 : 515-527.
- Grou, P. 1977. *Monnaie, crise économique.* PUG-Maspero. Paris.
- 1982. *La Structure financière du capitalisme multinational.* Presses de la Fondation nationale des sciences politiques.
- 1987. *L'Aventure économique.* L'Harmattan. Paris.
- 1988. *L'Émergence des géants du Tiers-Monde.* Publisud. Paris.
- 2005. *Impératif technologique ou déclin économique ?* L'Harmattan. Coll. « Questions contemporaines ». Paris.
- (à paraître). *L'Obscurantisme du XXI^e siècle. La toute-puissance de l'argent.*
- Grou, P., Cicchini, J., Hard, G. & Mertens-Santamaria, D. 2007. *Pour un redécoupage des régions françaises. Mondialisation économique et taille des régions.* L'Harmattan. Paris.
- Grou, P., Guillon, R., Mertens-Santamaria, D. & Messamah, K. 2008. *Vers une très grande Europe.* L'Harmattan. Paris.

- Grou, P., Nottale, L. & Chaline, J. 2004. *Log-periodic Laws Applied to Geosciences*. *Zona Arqueologica, Miscelanea en homenaje a Emiliano Aguirre*. IV Arqueologia : 230-237. Museo Arqueologico Regional. Madrid.
- Guevara, M.R., Glass, L. & Shrier, A. 1981. *Phase-Locking, Period-Doubling Bifurcations and Irregular Dynamics in Periodically Stimulated Cardiac Cells*. *Science*. 214 : 1350-1353.
- Guimberteau, J.-C., 2004. *Promenade sous la peau*. Elsevier. Paris.
- Guthrie, B.N.G. & Napier, W.M. 1991. *Early Field Galaxies For our Second Pilot Study*. *MNRAS*. 253 : 533.
- Guthrie, B.N.G. & Napier, W.M. 1996. *Globular Clusters systems as Distance Indicator*. *Astron. Astrophys.* 310 : 353-370.
- Hake, S., Smith, Holtan, H., Magnani, E., Mele, G. & Ramirez, J. 2004. *The Role of Knox Genes in Plant Development*. *Ann. Rev Cell Dev Biol*. 20 : 125-151.
- Hamant, O., Heisler, M.G., Jönsson, H., Pawel Krupinski, P., Uyttewaal, M., Bokov, P., Corson, F., Sahlin, P., Boudaoud, A., Meyerowitz, M.Y., Couder, Y. & Traas, J. 2008. *Developmental Patterning by Mechanical Signals*. *Arabidopsis. Science*. 322. (5908) : 1650-1655 .
- Hanski, I., Turchin, P., Korpimäki, E. & Henttonen, H. 1993. *Population Oscillations of Boreal Rodents : Regulation by Mustelid Predators Leads to Chaos*. *Nature*. 364 : 232-235.
- Hartenberger, J.L. 1998. *Description de la radiation des Rodentia (Mammalia) du Paléocène supérieur au Miocène ; incidences phylogénétiques*. *C. R. Ac. Sc. Paris*. 316 : 439-444.
- Heisenberg, W. 1932. *Les Principes physiques de la théorie des quanta*. Gauthier-Villars. Paris.
- Hermet, G. 2007. *L'Hiver de la démocratie*. Armand Colin. Paris.
- Hodapp, K.W., MacQueen, R.M. & Hall D. 1992. *Nature*. 335 : 707.
- Hopkins, W.G. & Evard, J.M. 2003. *Physiologie végétale*. De Broeck Université.
- Hoyle, F. & Wickramasinghe, C. 1980. *Le Nuage de la vie. Les origines de la vie dans l'univers*. Albin Michel.
- Johansen, A. & Sornette, D. 1999. *Critical crashes*. *Risk*. 12 (1) : 91-94.
 – 2001. *Finite-Time Singularity in the Dynamics of the World Population, Economic and Financial Indices*. *Physica A*. 204 : 485-502.
- Jona-Lasinio, G. 1975. *The Renormalisation Group : a Probabilistic View*. *Il Nuovo Cimento*. 26B : 99-119.
- Katz, A. & Duneau, M. 1985. *Quasiperiodic Patterns*. *Phys. Rev. Lett.* 54 : 2688-2691.

- Kauffman, S. 1993. *The Origins of Order : Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford. Oxford University Press.
- Khalturin, K., Anton-Erxleben, F., Sassmann, S., Wittlieb, J. & Hemmrich G. 2008. A Novel Gene Family Controls Species-Specific Morphological Traits. *Hydra*. PLoS Biol. 6(11) : e278.
- Kitaev, L. & Levitov, L.C. 1985. Al-0,86 Mn-0,14 : a Six-Dimensional Crystal. *JETP Lett.* 41 : 145.
- Komeili, A., Zhuo, Li & Newman, D.K. 2006. Magnetosomes Are Cell Membrane Invaginations Organized by the Actin-Like Protein MamK. *Science*. 311 : 242-245
- Konacki M. & Wolszczan A. 2003. Masses and Orbital Inclinations of Planets in the PSR B1257+12 System. *Astrophysical Journal*. 591 : L147-L150.
- Koutchmy, S. 1972. Diffuse External Reinforcements in the Solar Corona from the March 7, 1970 Solar Eclipse Plates. *Astron. Astrophys.* 16 : 103.
- Kuhn, T.S. 1972. *La Structure des révolutions scientifiques*. Flammarion. Paris.
- Lamy, Ph. 1974. *The Dynamics of Circum-solar Dust Grains*. *Astron. Astrophys.* 33 : 191.
- Lamy, Ph.L., Kuhn, J.R., Koutchmy, S. & Smartt, R.N. 1992. *Science*, 257 : 1377.
- Landau, L. & Lifchitz, E. 1970. *Théorie des champs*. Mir. Moscow.
- Lebeau, A. 2008. *L'Enfermement planétaire*. Gallimard. Paris.
- Lemaître, G. 1934. *Evolution of the Expanding Universe*. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 20 : 12.
- Lena, P., Viala, Y., Hall, D., Soufflot, A. 1974. *The Thermal Emission of the Dust Corona, during the Eclipse of June 30 1973*. *Astron. Astrophys.* 37 : 81-86.
- Lepetit, B. 1996. *Jeux d'échelles*. (Revel, J., Éd.). Gallimard-Seuil. P. 92.
- Levine, D. & Steinhardt, P.J. 1984. Quasicrystals : A New Class of Ordered Structures. *Phys. Rev. Lett.* 53 : 2477-2480.
- Li, T.Y. & Yorke, J.A. 1975. Period Three Implies Chaos. *American Mathematical Monthly*. 82 : 985.
- Lippman, Z.B, Cohen, O., Alvarez, J.P., Abu-Abied, M. & Pekker, I. 2008. The Making of a Compound Inflorescence in Tomato and Related Nightshades. PLoS Biol. 6(11) : e288.
- Lucanic, M. & Cheng, H. 2008. A RAC/CDC-42–Independent GIT/PIX/PAK Signaling Pathway Mediates Cell Migration. *Migration in C. elegans*. In : PLoS Genetics. 4(11) : e1000269.

- Ma, L., Li, J., Lijia Qu, L., Hager, Chen J.Z., Hongyu Zhao, H. & Deng, X.W. 2001. *Light Control of Arabidopsis Development Entails Coordinated Regulation of Genome Expression and Cellular Pathways*. *Plant Cell*. 13(12) : 2589-2608.
- Macqueen, R.M. 1968. *Infrared Observations of the Outer Solar Corona*. *Astrophys. J.* 154 : 1059-1076.
- Mandelbrot, B.B. 1967. *How Long is the Coast of Britain ? Statistical Self-Similarity and Fractionnal Dimension*. *Science*. 155 : 636-638.
 - 1975. *Les Objets fractals*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
 - 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco, Freeman.
 - 1997. *Fractales, hasard et finance*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
 - 1999. *A Multifractal Walk down Wall Street*. *Scientific American*. 280 : 70-73.
- Margulis, L. & Sagan, D. 1989. *L'Univers bactériel*. Albin Michel. Paris.
- Margulis, L. & Olendzenski, L. (Eds.). 1992. *Environmental Evolution : Effects of the Origin and Evolution of Life on Planet Earth*. MIT Press. Cambridge (Ma.). London.
- Martiel, J.-L. & Goldbeter, A. 1987. *A Model Based on Receptor Desensitization for Cyclic AMP Signaling in Dictyostelium*. *Cells Biophys. J.* 52 : 807-828.
- Martinez, A.D., Hayrapetyan, V., Moreno, A.P. & Beyer, E.C. 2002. *Connexin43 and Connexin45 Form Heteromeric Gap Junction Channels in Which Individual Components Determine Permeability and Regulation*. *Circulation Research*. 90 : 1100-1107.
- Martin-Garin, B., Lathuilière, B., Verrecchia, E.P. & Geister, J. 2007. *Use of Fractal Dimensions to Quantify Coral Shape*. *Coral Reefs*. 26 : 541-550.
- Marx, K. 1963. *Le Capital*. La Pléiade. Paris. T. 1.
- May, R.M. & Oster, G.F. 1976. *Bifurcations and Dynamic Complexity in Simple Ecological Models*. *American Naturalist*. 110 : 573-599.
- May, R.M. 1974. *Biological Populations with Non-Overlapping Generations : Stable Points, Stable Cycles, and Chaos*. *Science*. 186 : 645-647.
 - 1976. *Simple Mathematical Models with very Complicated Dynamics*. *Nature*. 261 : 459-469.
 - 1991. *Le chaos en biologie. La science du désordre. La Recherche*. 232 : 588-598.
- Maynard Smith, J. & Szathmary, E. 2000. *Les Origines de la vie. De la naissance de la vie à l'origine du langage*. Dunod. Paris.
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995. *Nature*. 378 : 355.
- Merleau-Ponty, M. 1964. *Le Visible et l'Invisible*. Gallimard. P. 280.

- Meyer, F. 1947. *L'Accélération évolutive. Essai sur le rythme évolutif et son interprétation quantique*. Librairie des Sciences et des Arts. Paris.
- 1954. *Problématique de l'évolution*. PUF. Paris.
- Minelli, A., Fusco, G. & Sartori, S. 1991. *Self-similarity in Biological Classifications*. *BioSystems*. 26 : 89-97.
- Mizutami, K., Maihara, T., Hiromoto, N. & Takami, H. 1984. *Nature*. 312 : 134.
- Monod, J. 1970. *Le Hasard et la Nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*. Seuil. Paris.
- Morin, F. 2005. *Le Mur de l'argent*. Seuil. Paris.
- Murray, J.D. 1988. *Les taches du léopard. Pour la Science*. P. 78.
- 1999. *Mathematical Biology*. Springer-Verlag.
- Nauenberg, M. 1975. *Scaling Representation for Critical Phenomena*. *J. Phys. A : Math. Gen.*, 8 : 925-928.
- Neige, P., Chaline, J., Choné, T., Courant, F., David, B., Dommergues, J.L., Laurin, B., Madon, C., Magniez, F., Marchand, D. & Thierry, J. 1997. *La notion d'espace morphologique, outil d'analyse de la morphodiversité des organismes*. *Géobios*. 20 : 415-422.
- Newman, M.E.J. 1996. *Self-Organized Criticality, Evolution and the Fossil Extinction Record*. *Proc. Royal. Society London*. B 263 : 1605-1610.
- 1997. *Evidence for Self-Organized Criticality in Evolution*. *Physica D*. 107 : 293-296.
- Noble, F., Fleury, V., Pries, A., Corvol, P., Eichmann, A. & Reneman, R.S. 2005. *Control of arterial branching morphogenesis in embryogenesis : go with the flow*. In : *Cardiovascular Research*. 65 : 619-628.
- Noble, D. 2007. *La musique de la vie. La biologie au-delà du génome*. Seuil. Paris.
- Nottale, L. 1989. *Fractals and the Quantum Theory of Space-Time*. *Int. J. Mod. Phys., A*. 4. 5047-5117.
- 1992. *The Theory of Scale Relativity*. *Int. J. Mod. Phys. A*. 7 : 4899-4936.
- 1993. *Fractal Space-Time and Microphysics : Towards a Theory of Scale Relativity*. World Scientific. Singapour.
- 1994. *New Formulation of Stochastic Mechanics. Application to Chaos. Chaos and Diffusion in Hamiltonian Systems*, (Benest, D. & Froeschle, C., Ed.). *Frontières*. P. 173-198.
- 1996. *Scale-Relativity and Quantization of Extrasolar Planetary Systems*. *Astron. Astrophys. Lett.* 315 : 9-12.

- 1996. *Scale Relativity and Fractal Space-time : Applications to Quantum Physics, Cosmology and Chaotic Systems*. *Chaos Solitons & Fractals*. 7 : 877-938.
- 1997a. *Scale Relativity and Quantization of the Universe, I. Theoretical Framework*. *Astron. Astrophys.* 327:867-889.
- 1997b. *Scale Relativity. Scale Invariance and Beyond. Proceedings of Les Houches Workshop, EDP Sciences*. (Dubrulle, B., Graner, F., Sornette, D., Eds.). Les Ullis. France and Springer. Berlin. Germany. P. 249-261.
- 1998a. *La Relativité dans tous ses états. Au-delà de l'espace-temps*. Hachette. Paris.
- 1998b. *Scale Relativity and Quantization of Planet Obliquities*. *Chaos, Solitons and Fractals*. 9 : 1035.
- 1998c. *Scale Relativity and Quantization of the Planetary System around the Pulsar PSR B1257+12*. *Chaos, Solitons and Fractals*. 9. 1043-1050.
- 2001. *Relativité d'échelle et morphogenèse*. *Revue de synthèse*. 4 (1), 93-116.
- 2001a. *Relativité d'échelle : structure de la théorie*. *Revue de synthèse*. 122 (4). N.1 : 11-25.
- 2001b. *Relativité d'échelle et morphogenèse*. *Revue de synthèse*. 122 : 93-116.
- 2001. *Scale Relativity and Non-Differentiable Fractal Space-Time*. In : *Frontiers of Fundamental Physics*. Proceedings of Birla Science Center Fourth International Symposium. 11-13 dec. 2000. Hyderabad, India. (Sidharth, B.G. and Altaisky, M.V. Eds.). (Kluwer Academic). P. 65.
- 2002. *Relativité d'échelle, non-différentiabilité et espace-temps fractal. Lois d'échelle, fractales et ondelettes*. In : *Traité IC2, Traitement du signal et de l'image*, (Abry, P., Gonçalves, P. & Levy-Vehel, J., Eds.). Hermès Lavoisier. 2002. Vol. 2. Chap. 7. p. 233-265.
- 2003. *Scale-Relativistic Cosmology*. *Chaos, Solitons and Fractals*, 16 : 539-564.
- 2004. *The Theory of Scale Relativity : Non-Differentiable Geometry and Fractal Space-Time*. In : *Computing Anticipatory Systems*. CASY'S03 – Sixth International Conference (Liège, Belgique, 11-16 août 2003), Daniel M. Dubois, Ed., *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 718 : 68-95.
- 2006. *Astrophysical Applications of the Theory of Scale Relativity. Invited Conference*. In : *Frontiers of Fundamental Physics 6*, Udine, Italy, 26-29 September 2004. (Sidharth, B.G., Honsell, F. & de Angelis, A., Eds.) Springer Verlag. P. 107-114.
- 2006. *Structure du système planétaire autour de PSR1257+12*. *Workshop Pulsars, Théories et Observations*, 16 et 17 Janvier 2006, Institut d'Astrophysique de Paris.

- 2007. *Un nouveau paradigme pour la physique ? Nouvelles perspectives.* In : *Les grands défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle.* (Bourgeois, P., & Grou, P., Eds.). Ellipses. Chap. 9. P. 121.
- 2008a. *Scale Relativity and Fractal Space-time : Theory and Applications.* In : *Proceedings of First International Conference on the Evolution and Development of the Universe.* 8-9 octobre 2008. ENS. Paris. Foundation of Science (sous presse).
- 2008b. *Formation et évolution du système planétaire de PSR B1257+12.* In : *Workshop Pulsars, Théories et Observations.* 24-26 novembre 2008. Observatoire de Paris.
- 2009a. *Fractals in the Quantum Theory of Spacetime.* In : *Encyclopedia of Complexity and Systems.* Science. (Meyers, R.A., Ed.) Springer. P. 3858-3878.
- 2009b. *The Theory of Scale Relativity : Fractal Space-Time, Nondifferentiable Geometry and Quantum Mechanics* (en préparation), 528 p.
- Nottale, L. & Schneider, J. 1984. *Fractals and Non-Standard Analysis.* *J. Math. Phys.* 25 : 1296-1300.
- Nottale, L., Célérier, M.N. & Lehner, T. 2006. *Non-Abelian Gauge Field Theories in Scale Relativity.* *J. Math. Phys.* 47. 032303 : 1-19.
- Nottale, L. & Célérier, M.N. 2007. *Derivation of the Postulates of Quantum Mechanics from the First Principles of Scale Relativity.* *J. Phys. A : Math. Theor.* 40 : 14471-14498.
- Nottale, L., Chaline, J. & Grou, P. 2000. *Les Arbres de l'évolution.* Hachette Littératures. Paris.
- 2002. *On the Fractal Structure of Evolutionary Trees.* In : *Fractals 2000 in Biology and Medicine, Proceedings of Third International Symposium.* Ascona, Switzerland. (Losa, G., Merlini, D., Nonnenmacher, T.F. & Weibel, E.R., Eds.). Birkhäuser Verlag. 3. P. 247-258.
- Nottale, L., Schumacher, G. & Gay, J. 1997. *Scale Relativity and Quantization of the Solar System.* *Astron. Astrophys.* 322 : 1018-1025.
- Nottale, L. & Schumacher, G. 1998. *Scale Relativity, Fractal Space-Time and Gravitational Structures. Fractals and Beyond : Complexities in the Sciences* (Novak, M.M. Ed.). World Scientific. P. 149.
- Nottale, L., Schumacher, G. & Lefèvre, E.T. 2000. *Scale Relativity and Quantization of Exoplanet Orbital Semi-Major Axes.* *Astron. Astrophys.* 361 : 379-387.
- Nottale, L. & Timar, P. 2008. *Relativity of Scales : Application to an Endo-Perspective of Temporal Structure. Simultaneity : Temporal Structures and Observer Perspectives,* (Vrobel, S., Rössler, O.E., Tarlow, T.M., Eds.). World Scientific, Singapore. Chap. 14. P. 229-242.

- Nottale, L. & Auffray, C. 2008. *Scale Relativity Theory and Integrative Systems Biology. 1. Founding Principles and Scale Laws. Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 97 : 79-114.
- 2008. *Scale Relativity Theory and Integrative Systems Biology. 2. Macroscopic Quantum-Type Mechanics. Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 97 : 115-157.
- Ord, G.N. 1983. *Fractal SpaceTime – a Geometric Analog of Relativistic Quantum-Mechanics*. *J. Phys. A : Math. Gen.* 16 : 1869-1884.
- Patterson, R.T. & Fowler, A.D. 1996. *Evidence of Self Organization in Planktic Foraminiferal Evolution : Implications for Interconnectedness of Paleoecosystems*. *Geology*. 24(3) : 215-218.
- Pauling, L. & Zuckerkandl, E. 1963. *Chemical Paleogenetics : Molecular "Restoration Studies" of Extinct Forms of Life*. *Acts Chem. Scand.* 17 : 9-16.
- Peitgen, H.O. & Richter, H. 1986. *The Beauty of Fractals*, Springer, Heidelberg.
- Peitgen, H.O. & Saupe, D. 1998. *The Science of Fractal Images*. Springer Verlag, Tokyo. Springer. New York.
- Persic, M. & Salucci, P. 1995. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 99 : 501.
- Peterson, A. W. 1967. *Experimental Detection of Thermal Radiation from Interplanetary Dust*. *Astrophys. J.* 148 : L 37-L39.
- Plotnick, R.E. 1986. *A Fractal Model for the Distribution of Stratigraphic Hiatuses*. *Journal of Geology*. 94 : 885-890.
- Plotnick, R.E. & McKinney, M. 1993. *Evidence of Self-Organization in Planktic Foraminiferal Evolution : Implications for Interconnectedness of Palaeosystems*. *Palaaios*. 8 : 202-212.
- Plotnick, R.E. & Prestgaard, K.L. 1995. *Fractal and Multifractal Models and Methods in Stratigraphy. Fractals in Petroleum Geology and Earth Processes*. (Barton, C.C. & La Pointe, P.R., Eds). New York. Plenum Press. P. 73-95.
- Plotnick, R.E. & Sepkovski, J.J. 2001. *A Multiplicative Multifractal Model for Originations and Extinctions*. *Palaeobiology*. 27 (1) : 126-139.
- Poincaré, H. 1905. *Sur la dynamique de l'électron*. *C. R. Ac. Sc. Paris*. 140 : 1504-1508.
- 1909. *Science et méthode*. 1^{re} éd. Flammarion, Paris.
- Prigogine, I. 1994. *Les Lois du chaos*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
- Queiros-Condé, D. 1997. *Geometrical Extended Self-Similarity and Intermittency in Diffusion-Limited Aggregates*. *Phys. Rev. Lett.*, 78(23) : 4426-4429.

- 2000. *Principe de conservation du flux d'entropie pour l'évolution des espèces*. C. R. Ac. Sc. Paris. 330 : 445-449.
- Raup, D.M. & Sepkoski, J.J., Jr. 1984. *Periodicity of Extinctions in the Geologic Past. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 81 : 801-805.
- 1986. *Periodic Extinctions of Families and Genera*. Science. 231 : 833-836.
- Reich, R. 1993. *L'Économie mondialisée*. Dunod. Paris.
- Revel, J. (Éd.) 1996. *Jeux d'échelles*. Gallimard-Seuil. Paris. P. 13.
- Ruelle, D. 1991. *Hasard et Chaos*. O. Jacob. Paris.
- Sapoval, B. 1997. *Universalités et Fractales*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
- Saupe, J. & D. 1992. *Chaos and Fractals : New Frontiers of Science*. Springer-Verlag.
- Scheffel, A & Schüler, D. 2007. *The Acidic Repetitive Domain of the Magnetospirillum gryphiswaldense MamJ Protein Displays Hypervariability but Is Not Required for Magnetosome Chain Assembly*. Journal of Bacteriology. 189 : 6437-6446.
- Scheffel, A., Gruska, M., Faivre, D., Linaroudis, A., Plitzko J.M. & Schüler, D. 2006. *An Acidic Protein Aligns Magnetosomes along a Filamentous Structure in Magnetotactic Bacteria*. Nature. 440 : 110-114.
- Schlesinger, M.F. & West, B.J. 1991. *Complex Fractal Dimension of the Bronchial Tree*. Phys. Rev. Lett. 67 : 2106-2108.
- Schneider, S.E. & Salpeter, E.E. 1993. *Astrophys. J.*, 385 : 32.
- Schopf, J.W., Kudryavtsev, A.B., Agresti, D.G., Wdowiak, T.J. & Czaja, A.D. 2002. *Laser-Raman Imagery of Earth's Earliest Fossils*. Nature. 416 : 73-76.
- Schrödinger, E. 1986. *Qu'est-ce que la vie ? De la physique à la biologie*. Christian Bourgeois. Paris.
- Schumacher G. et Gay J. 2001. *An Attempt to Detect Vulcanoids with SOHO/LASCO Images I. Scale Relativity and Quantization of the Solar system*. Astron. Astrophys. 368. 1108-1114.
- Selker, J.M.L., Stichic, G.L. & Green, P.B. 1992. *Biophysical Mechanisms for Morphogenetic Progressions at the Shoot Apex*. Dev. Biol. 153 : 29-43.
- Sereno, P.C. 1999. *The Evolution of Dinosaurs*. Science. 284 : 2137-2147.
- Shea, B.T. 1988. *Heterochrony in Primates*. In : *Heterochrony in Evolution, A Multidisciplinary Approach*. (McKinney, M.L., Éd.). New York. Plenum press. 7. P. 237-266.

- 1992. *Developmental Perspective on Size Change and Allometry in Evolution*. *Evol. Anthropol.* 1 : 125-134.
- Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D. & Cahn, J.W. 1984. *Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry*. *Phys. Rev. Lett.* 53 : 1951-1953.
- Silk, J. 2001. *Europhysics News*. 32/6 : 210.
- Slack, F. & Ruvkun, G. 1997. *Temporal Pattern Formation by Heterochronic Genes*. *Annual Review of Genetics*. 31 : 611-634.
- Smith, R.S. 2008. *The Role of Auxin Transport in Plant Patterning Mechanisms*. *PLoS Biol.* 6(12) : e323.
- Smolin, L. 2007. *Rien ne va plus en physique ! : L'échec de la théorie des cordes*. Dunod. Paris.
- Sole, R.V., S.C. Manrubia, S.C., Benton, M. & Bak, P. 1997. *Self-Similarity of Extinction Statistics in the Fossil Record*. *Nature*. 388 : 764-767.
- Sornette, D., 1998. *Discrete-Scale Invariance and Complex Dimensions*. *Phys. Rep.* 297 : 239-270.
- 2002. *Why Stock Markets Crash ? Critical Events in Complex Financial Systems*. Princeton University Press.
- Sornette, D. & Arnéodo, A. 1984. *Chaos, Pseudo-Random Number Generators and the Random Walk Problem*. *J. Soc. Physique France*. 45 : 1843-1857.
- Sornette, D. & Sammis, C.G. 1995. *Complex Critical Exponents from Renormalization Group Theory of Earthquakes : Implications for Earthquake Predictions*. *J. Phys. I France*. 5 : 607-619.
- Sornette, D., Johansen, A. & J.P. Bouchaud, J.P. 1996. *Stock Market Crashes, Precursors and Replicas*. *J. Phys. I France*. 6 : 167-175.
- Thom, R. 1983. *Paraboles et catastrophes*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
- 1993. *Prédire n'est pas expliquer*. Flammarion. Coll. « Champs ». Paris.
- Tifft, W.G. 1976. *Discrete States of Redshift and Galaxy Dynamics. I. Internal Motions i Single Galaxies*. *Astrophys. J.* 206 : 38-56.
- 1977. *Discrete States of Redshift and Galaxy Dynamics II. Sustems of Galaxies*. *Astrophys. J.* 211 : 31-46.
- Turing, A. 1952. *The Chemical Basis of Morphogenesis*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B. 237 : 37-72. 1952.
- Van Valen, L. 1973. *A New Evolutionary Law*. *Evolutionary Theory*. 1 : 1-30.

- Verrecchia, E. 1996. *Morphometry of Microstromatolites in Calcrete Laminar Crusts and a Fractal Model of their Growth. Mathematical Geology.* 28 (1) : 87-109.
- Vinci, L. de. 1942. *Les Carnets de Léonard de Vinci, 1. Botanique.* Gallimard. Paris. I. 323 p.
- Wächtershäuser, G. 1988. *Before Enzymes and Templates : Theory of Surface Metabolism. Microbiological Reviews* 52 : 452-480.
- Weinberg, S., 1972. *Gravitation and Cosmology.* John Wiley & Sons. New York.
- Wilson, J.A. & Sereno, P.C. 1998. *Early Evolution and Higher-level Phylogeny of Sauropod Dinosaurs. Journal of Vertebrate Paleontology.* 2(18) : 1-68.
- Wilson, K. 1971. *Renormalization Group and Critical Phenomena. Phys. Rev., B4* : 3174-3184.
- Winfree, A.T. 1980. *The Geometry of Biological Time. Biomathematics.* Vol. 8, Springer-Verlag. New York. Heidelberg and Berlin.
- Witten, T.A. & Sander, L.M. 1981. *Diffusion-limited aggregation, a kinetical critical phenomena. Phys. Rev. Lett.* 47 : 1400-1403.
- Woese, C.R. 1987. *Bacterial Evolution. Microbiol Rev.* 51(2) : 221-71.
- 2002. *On the Evolution of Cells. Proc Natl Acad Sci USA.* 99(13) : 8742-8747.
- 2004. *A New Biology for a New Century. MMBR.* 68(2) : 173-86.
- Woese, C.R. & Fox, G.E. 1977. *Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain : The Primary Kingdoms. Proc Natl Acad Sci USA.* 74 : 5088-5090.
- Woese, C.R., Kandler, O. & Wheelis, M.L. 1990. *Towards a Natural System of Organisms : Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. Proc Natl Acad Sci U S A.* 87(12) : 4576-9.
- Wolszczan, A. & Frail, D. 1992. *A Planetary System around the Millisecond Pulsar PSR1257+12. Nature.* 355 : 145-147.
- Wolszczan, A. 1994. *Confirmation of Earth-mass Planets Orbiting the Millisecond Pulsar PSR B1257+12. Science.* 264 : 538-542.
- Wolszczan, A., Hoffman I., Konacki M., Anderson S., & Xilouris K., 2000. *A 25.3 Day Periodicity in the Timing of the Pulsar PSR B1257+12 : a Planet or a Heliospheric Propagation Effect ? Astrophysical Journal.* 540 : L41-L44. 2000.
- Zel'Dovich, Y.B. 1967. *Cosmological Constant and Elementary Particles. Pis'ma Zh. Eksp.Teor Fiz.* 6. 883-884 & JETP Letters. 6 : 316-317.

Zhou, W.X. & Sornette, D. 1995. *Renormalization Group Theory of Earthquakes : Implications for Earthquake Predictions*. *J. Phys. I, France*, 5 : 607-619.

Zuckermandl, E. & Pauling, L. 1965. *Molecules as Documents of Evolutionary History*. *J. Theoret. Biol.* 8 : 357-366.

Netographie

<http://www.luth.obspm.fr/~luthier/nottale/index.html>

<http://lpce.cnrsorleans.fr/%7Epulsar/PSRworkshop/workshop2008/Nottale.pdf>

<http://www.obspm.fr/actual/nouvelle/jul99.fr.shtml>

<http://www.astro.ubc.ca/people/hickson/hcg/index.html>

http://www.naoj.org/Science/press/_release/9901/HCG40.html.

<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>

<http://www.bacterio.cict.fr/bacdico/index.html>

<http://www.bacdico.net>

www.archbac.u-psud.fr/Meetings/LesTreilles/lestreilles.html -

[http://www.cybergeu.eu/index 14173.html](http://www.cybergeu.eu/index%2014173.html)

<http://www.ggcd.net/maddison/>

Table des matières

Avant-propos.....	3
<i>Préambules</i>	3
<i>Post-regard sur Les Arbres de l'Évolution :</i> <i>un livre pluridisciplinaire...</i>	3
<i>D'une approche théorique empirique</i> <i>à une théorie globale de la relativité d'échelle</i>	4
<i>Remerciements</i>	5

Première partie

La théorie de la relativité d'échelle et ses applications en sciences physiques.....	7
1.1 Présentation générale	9
<i>Introduction</i>	9
<i>Première étape de construction de la théorie :</i> <i>lois de transformation d'échelle</i>	12
<i>Deuxième étape : mécanique quantique</i>	14
<i>Troisième étape : mécanique</i> <i>quasi-quantique macroscopique</i>	17
<i>Quatrième étape : transformations et champs de jauge ...</i>	20
<i>Cinquième étape : mécanique</i> <i>quantique dans l'espace des échelles</i>	20
<i>Conclusion</i>	21
1.2 Applications en sciences physiques de la théorie de la relativité d'échelle.....	23
<i>Applications en astrophysique</i>	23
<i>Introduction</i>	23
<i>Prédictions de la théorie</i>	25
<i>Comparaison aux données d'observation</i>	32

Application en cosmologie : constante cosmologique	63
Application en physique : constante de couplage forte....	67
Applications en géosciences.....	69
Tremblements de terre	69
Fonte de la banquise arctique.....	71

Deuxième partie

La relativité d'échelle et le vivant	75
2.1 Introduction.....	77
Quels sont les problèmes où la relativité d'échelle peut apporter des éclairages ?	77
2.2 La vie et ses contraintes.....	79
La Terre est un astre a priori favorable à la vie	79
Les caractéristiques du vivant.....	80
Le métabolisme et les sources d'énergie.....	81
Une organisation hiérarchique	85
La compartimentation	88
La mémoire et son évolution par les mutations.....	88
La structure de l'ADN	89
La mécanique de traduction de la mémoire : l'ADN, le code génétique et la transcription	90
La mécanique saltatoire modulée par les hétérochronies du développement.....	101
La chiralité.....	105
Échelles du vivant, polarités, asymétries et symétries....	107
L'interaction avec l'histoire de la Terre : la contingence..	120
2.3 Historique des théories de l'origine de la vie	121
La génération spontanée actuelle, d'Aristote à Pasteur ...	121
Les anciennes théories de l'origine de la vie	122
De la panspermie à l'exobiologie : l'origine des briques du vivant	122

<i>Les premières hypothèses</i>	
<i>de l'origine chimique de la vie : l'abiogenèse.....</i>	<i>124</i>
<i>Les hypothèses d'Oparin-Haldane</i>	<i>125</i>
<i>Miller et la reconstitution des conditions</i>	
<i>de l'origine de la vie</i>	<i>127</i>
<i>L'expérience de Miller</i>	<i>127</i>
<i>Les faiblesses de l'expérience de Miller</i>	<i>128</i>
<i>L'autoréplication du monde des ARN</i>	<i>128</i>
<i>Les théories de l'origine métabolique</i>	
<i>minérale de la vie.....</i>	<i>130</i>
<i>Le scénario des transformations</i>	
<i>homéotopiques de Danchin</i>	<i>133</i>
2.4 L'apport de la théorie de la relativité d'échelle :	
une structuration physico-chimique spontanée	
de la vie sur Terre, comme conséquence	
des diverses contraintes de l'espace-temps ?	135
Première approche quantique sommaire... ..	135
L'application de la théorie de la relativité	
d'échelle au problème de l'origine	
de la vie et de son évolution	137
<i>Les effets de type quantique de la relativité</i>	
<i>d'échelle dans l'espace standard</i>	<i>137</i>
<i>Les effets quasi quantiques de la relativité</i>	
<i>d'échelle dans l'espace des échelles.....</i>	<i>139</i>
<i>Première étape du scénario relativiste</i>	
<i>d'échelle de l'apparition de la vie</i>	<i>140</i>
<i>Deuxième étape du scénario relativiste</i>	
<i>d'échelle de l'apparition de la vie</i>	<i>140</i>
2.5 Le rôle potentiel de la relativité d'échelle	
dans la morphogenèse du vivant	143
Les données paléontologiques : de LUCA,	
premier organisme théorique anaérobie	
ancestral aux trois principales formes de vie.....	143
<i>LUCA/DACU et les procaryotes</i>	<i>143</i>
<i>Les deux grandes étapes de la vie fossile,</i>	
<i>eucaryotes et multicellulaires.....</i>	<i>146</i>

Des expressions morphologiques précellulaires actuelles de la vie au vivant dans tous ses états.....	156
Les expressions précellulaires de la vie actuelle	156
Le monde des cellules.....	161
La cellule procaryote	161
La cellule eucaryote	165
La cellule eucaryote, le cytosquelette et la division cellulaire	172
Le niveau d'organisation des organes t des organismes pluricellulaires.....	183
Des lois de puissance dans les distributions statistiques du nombre des apparitions et des extinctions d'espèces.....	209
Confirmations de l'existence de la dynamique non linéaire en biologie-paléontologie.....	211
La relativité d'échelle aux grandes échelles du vivant : la macroévolution	213
2.6 Conclusion générale sur la relativité d'échelle et ses implications dans le vivant.....	235

Troisième partie

Relativité d'échelle et sociétés humaines.....	239
3.1 Systèmes économiques et sociaux en évolution : changements d'échelles et fractionnement.....	241
Les grandes caractéristiques des systèmes socio-économiques en évolution	241
Rappel des grandes caractéristiques de l'évolution économique	242
Nouvelles formulations de la loi de recherche de gains de productivité.....	244
D'une analyse en termes de systèmes à celle utilisant la théorie de la relativité d'échelle.....	249
Constat d'une utilisation implicite de la notion de système	249
Utilisation des notions d'organisation et d'échelle.....	250

Fonctionnements d'ensembles économiques organisés en échelles	250
Une évolution des formes d'organisations en termes de fractionnements.....	254
Limites de gains de productivité, cause de crise économique	254
Quelle explication permet de comprendre l'existence de limites ?	255
La suraccumulation chez Marx	255
Lien entre accroissement de productivité et complexité croissante d'un ensemble organisé en échelles.....	257
Complexité croissante et fractionnement croissant de la réalité.....	259
Caractère universel des rythmes d'évolution ?	260
Une analogie remarquable entre évolution des sociétés et évolution du vivant : trois étapes comparables ?.....	260
Apparition des sociétés humaines mise en perspective dans le cadre de la théorie de la relativité d'échelle	266
Relativité d'échelle et fractionnement du temps : accélération et analyse en termes de lois log-périodiques	266
3.2 Une dynamique multi-échelle observable dans l'évolution des sociétés humaines.....	287
Une dynamique organisatrice s'effectuant par démultiplication d'échelles.....	287
La dynamique organisatrice entraîne une démultiplication d'échelles dans l'évolution économique	288
Un accroissement de taille des espaces économiques ...	288
Tendance à l'élargissement des espaces et niveaux de technologie	289
Trois grandes périodes d'extension spatiales.....	290
Limites d'échelles spatiales	292
Échelles individuelles et échelles collectives	295
Combinaisons d'échelles « individuel/collectif »	295

Cas de plusieurs échelles spatiales engendrées par un accroissement de complexité.....	299
La tendance à la complexité croissante se manifeste aussi dans les cas d'ensembles économiques à plusieurs échelles.....	299
Nature du lieu dit « marché » ?.....	302
Réalité économique à une échelle donnée : des « marchés » ou une multiplicité de fractionnements économiques ?	304
Application du modèle architectural « individuel/collectif » à l'émergence de la mondialisation.....	304
Schémas identiques dans les domaines physique et biologique ?	313
Mondialisation et espace de temps critique.....	316
Formes de la domination américaine de 1920 au début de XXI ^e siècle	318
Dévoiement des différences de productivité par des groupes sociaux dominants, qui s'approprient la plus grosse part de la production mondiale.....	319
Effets des pratiques de la bourgeoisie mondialisée en début de XXI ^e siècle	320
Évolution et transformations	
de « l'espace des échelles » : gains d'énergie dans les crises économiques, accompagnés de déclin...	321
Crises économiques et déclin/diffusion	321
Déclin simple : simple diffusion	322
Universalité des processus de diffusion.....	322
Espace des échelles de l'être humain au XXI^e siècle : condition humaine ou inhumaine ou nouvelle condition humaine ?	324
Un mode de vie caractérisé par la « technoscience ».....	324
Une condition inhumaine ?	324
Une nouvelle condition humaine.....	325
Conclusion du second chapitre	325

3.3 Une nécessité scientifique de prédictibilité 326

Notion de prédictibilité à caractère indéterministe 326

En sciences sociales économiques, impossibilité évidente de la moindre prédictibilité dans le cadre de l'idéologie néo-classique..... 328

Les approches en termes d'évolution d'ensembles organisés permettent une prédictibilité à caractère indéterministe..... 329

Prédiction que l'inflation des années 1970 correspondait à une première forme de crise économique.....329

Prédiction de durée de la crise des années 1970-1980 ...330

Prédiction de l'éclatement des « Kereitsu » japonais et des « Jaebul » coréens 331

Prédiction fin des années 1980 d'une accélération économique332

Prédiction d'une singularité pour les sociétés humaines au XXI^e siècle 333

Prédiction d'un accroissement de chaos économique dû aux chocs financiers 333

Prédiction d'une inadaptation de la production automobile mondiale dès le début du XXI^e siècle, due à l'épuisement des ressources naturelles énergétiques des sociétés humaines..... 334

Conclusion de la troisième partie 334

Quatrième partie

La théorie de la relativité d'échelle : formalisme mathématique 335

4.1 Rappel : Relativité galiléenne du mouvement..... 337

4.2 Relativité restreinte du mouvement..... 338

4.3 Relativité généralisée (gravitation et mouvement accéléré) 345

4.4 La théorie de la relativité d'échelle.....	355
Introduction	356
Abandon de l'hypothèse de différentiabilité de l'espace-temps.....	357
Espace-temps fractal	357
Dépendance des coordonnées en fonction des résolutions	358
Description de processus non différentiables par des équations différentielles.....	359
Équations différentielles d'échelle	360
Relativité et covariance d'échelle	363
Lois de transformation d'échelle.....	364
Dimension fractale constante : relativité d'échelle « galiléenne »	365
Brisure de l'invariance d'échelle : échelles de transition.....	366
Lois d'échelle non linéaires : équations du deuxième ordre, invariance d'échelle discrète, lois log-périodiques	368
Application à la chronologie évolutive de phénomènes de crise : la loi log-périodique comme généralisation naturelle des horloges périodiques.....	369
Dimension fractale variable : équations d'Euler-Lagrange en échelle	371
Dynamique d'échelle et force d'échelle.....	373
Force d'échelle constante.....	374
Oscillateur harmonique d'échelle	375
Relativité restreinte d'échelle : lois de dilatation log-lorentziennes, échelle limite invariante sous les dilatations.....	377

<i>Relativité d'échelle généralisée et couplage échelle-mouvement : champs de jauge</i>	380
<i>Mécanique quantique.....</i>	<i>381</i>
<i>Application à la mécanique quantique standard</i>	<i>386</i>
<i>Application à une nouvelle mécanique macroscopique de type quantique</i>	<i>387</i>
<i>Exemples de solutions spatiales de l'équation de Schrödinger</i>	388
<i>Processus de croissance à partir d'un centre.....</i>	<i>388</i>
<i>Équation dépendante du temps : duplication.....</i>	<i>390</i>
Conclusion.....	391
Références.....	395
Netographie.....	411

Cet ouvrage a été achevé d'imprimer en novembre 2009
dans les ateliers de Normandie Roto Impression s.a.s.
61250 Lonrai (Orne)
N° d'impression : 093891
Dépôt légal : novembre 2009

Imprimé en France

Des fleurs pour **SCHRÖDINGER**

La **relativité d'échelle** et ses applications

Ce livre développe une nouvelle représentation du monde, la nouvelle théorie de la « relativité d'échelle », qui prend en compte par construction toutes les échelles de la nature. Le « principe de relativité d'échelle » postule que les lois fondamentales de la nature doivent être valides quel que soit « l'état d'échelle » du système de référence. Il complète ainsi le « principe de relativité » de Galilée, Poincaré et Einstein qui s'appliquait seulement aux états de position, d'orientation et de mouvement. Dans son cadre, la géométrie « courbe » de l'espace-temps de la relativité d'Einstein peut être généralisée à un espace-temps fractal. La loi fondamentale de la dynamique prend, dans une telle géométrie, une forme quantique, en particulier celle de l'équation de Schrödinger, qui peut être généralisée pour ne plus forcément dépendre de la constante microscopique de Planck, ce qui permet d'envisager l'existence d'effets quasi quantiques macroscopiques d'un type nouveau. Cette théorie a des applications potentielles multiples et certaines de ses prédictions ont été testées avec succès, en astrophysique (structures gravitationnelles, en particulier exoplanètes), en cosmologie (constante cosmologique), en physique (constante de couplage forte), en paléontologie (arbre de l'évolution) et en économie (chronologie évolutive des sociétés). En biologie enfin, elle permet une nouvelle approche de la question de l'auto-organisation et de la formation et l'évolution de structures.