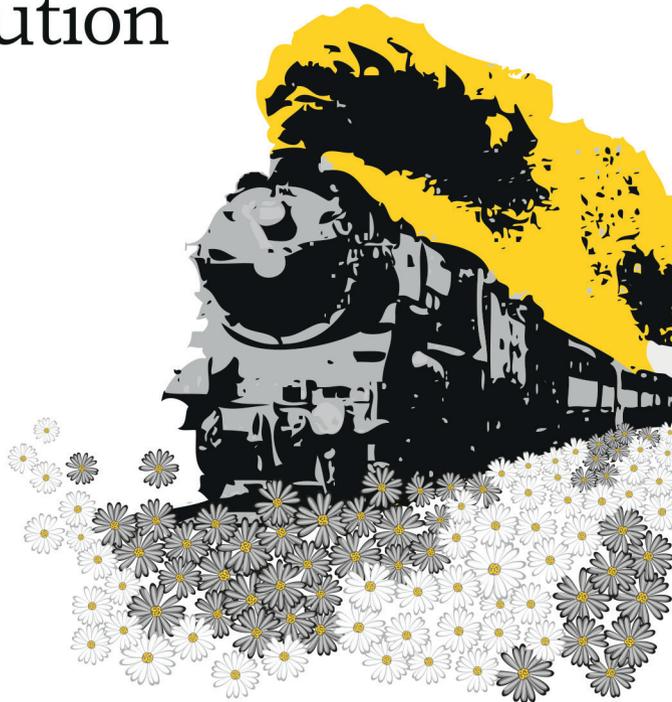


François Roddier

un essai de
thermo-bio-sociologie

Thermodynamique de l'évolution



curieux par nature
éditions
parole

Image de couverture : les pâquerettes noires et blanches sont celles imaginées par Lovelock. Elles symbolisent l'action des écosystèmes qui maintiennent sur Terre des conditions adaptées à la vie. La locomotive symbolise la révolution industrielle qui a perturbé l'équilibre des écosystèmes. Elle symbolise aussi les lois de la thermodynamique qui imposent à l'humanité des conditions pour sa survie.

François Roddier

Thermodynamique de l'évolution

Un essai de thermo-bio-sociologie

curieux par nature
éditions
parole

*À mes petits enfants,
et à tous les jeunes
qui bâtiront l'humanité future.*

Table matières

Remerciements	13
Préface	15
Introduction	19
Prologue	29
La notion d'évolution	29
I - Les lois de la thermodynamique	31
1. La thermodynamique du XIX^e siècle	33
1.1. L'énergie.....	33
1.2. La dissipation d'énergie.....	34
1.3. Les deux premières lois	35
1.4. L'entropie.....	37
1.5. Systèmes fermés ou ouverts.....	37
2. La thermodynamique du XX^e siècle	39
2.1. Les structures dissipatives	39
2.2. La troisième loi.....	40
2.3. La mécanique statistique.....	42
2.4. Entropie et information.....	43
2.5. L'apparition et la mémorisation de l'information.....	44
3. L'auto-organisation en physique	48
3.1. Les processus d'auto-organisation.....	48
3.2. Les transitions de phase continues.....	49
3.3. La notion de bifurcation.....	53
3.4. Le processus de criticalité auto-organisée	55
3.5. Quelques exemples en sciences humaines.....	58
4. L'auto-organisation de l'Univers	61
4.1. Le paradoxe thermodynamique	61
4.2. La dissipation d'énergie dans l'Univers.....	62
4.3. Le mécanisme d'auto-organisation.....	64
4.4. Un panorama de l'évolution.....	65
4.5. L'algorithme d'optimisation.....	68
4.6. La vie en dehors du système solaire.....	70
4.7. La vie de l'univers.....	72

II - L'évolution génétique	75
5. Le mécanisme de Darwin	77
5.1. L'épuisement des ressources.....	77
5.2. La sélection naturelle.....	78
5.3. Aspect thermodynamique.....	79
5.4. Les gènes.....	80
5.5. Le néodarwinisme.....	81
6. La criticalité auto-organisée en biologie	83
6.1. L'effet de la reine rouge.....	83
6.2. Les extinctions de masse.....	84
6.3. Les équilibres ponctuels.....	85
6.4. Les sélections r et K.....	85
6.5. L'évolution du métabolisme.....	86
7. La coopération en biologie	88
7.1. La sélection de parentèle.....	88
7.2. Exemple de l'amibe du terreau.....	89
7.3. Adaptation et adaptabilité.....	91
7.4. La symbiose en biologie.....	92
7.5. Le mécanisme général.....	94
8. Un panorama de l'évolution génétique	97
8.1. L'origine de la vie.....	97
8.2. L'évolution des procaryotes.....	100
8.3. Les colonies de bactéries.....	102
8.4. Des procaryotes aux eucaryotes.....	104
8.5. Les organismes multicellulaires.....	107
III - Des gènes à la culture	111
9. L'émergence de l'intelligence	113
9.1. L'intelligence d'une bactérie.....	113
9.2. L'intelligence collective des bactéries.....	114
9.3. Un modèle du cerveau.....	116
9.4. Les propriétés du modèle.....	119
9.5. L'intelligence collective des insectes.....	120
10. L'émergence de la culture	122
10.1. L'imitation chez les animaux.....	122
10.2. Les « mèmes » de Dawkins.....	124

10.3. L'altruisme chez les animaux évolués	125
10.4. L'effet Baldwin.....	128
11. Des primates à l'Homme.....	130
11.1. Des grands singes au genre Homo.....	130
11.2. L'apparition de l'Homo sapiens.....	132
11.3. La révolution néolithique.....	134
11.4. La formation d'espèces culturelles.....	136
IV - L'évolution culturelle.....	139
12. Les lois de l'évolution culturelle.....	141
12.1. Le dilemme du prisonnier.....	141
12.2. L'écriture et la monnaie.....	144
12.3. Les règles de transmission culturelle.....	147
12.4. L'auto-organisation des sociétés humaines.....	149
13. Thermodynamique et sciences sociales.....	155
13.1. Thermodynamique et économie.....	155
13.2. La monnaie.....	157
13.3. L'auto-organisation de l'économie.....	158
13.4. Les crises économiques et financières.....	159
13.5. Les inégalités de richesses.....	161
13.6. Thermodynamique et sociologie.....	162
13.7. La solidarité en sociologie.....	163
14. L'évolution culturelle en Occident.....	166
14.1. L'Antiquité méditerranéenne.....	166
14.2. Le monde romain.....	172
14.3. Naissance de la chrétienté.....	174
14.4. Les temps barbares.....	177
14.5. Du Moyen Âge à nos jours.....	180
15. Le siècle des menaces.....	184
15.1. Peut-on prédire l'avenir?.....	184
15.2. La fin de la croissance.....	187
15.3. Vers un effondrement.....	196
16. L'avenir de l'humanité.....	204
16.1. L'effondrement.....	204
16.2. La restructuration.....	210
16.3. L'humanité future.....	216

V - Compléments	223
17. Compléments sur l'entropie	225
17.1. Les cycles de Carnot.....	225
17.2. L'entropie de Clausius.....	226
17.3. L'entropie de Boltzmann.....	226
17.4. L'entropie de Gibbs.....	228
17.5. L'entropie de Shannon.....	228
17.6. Dissipation d'énergie et perte d'information.....	229
17.7. Le paradoxe de Gibbs.....	230
17.8. Le démon de Maxwell.....	231
17.9. L'entropie et la vie.....	231
17.10. L'entropie et la monnaie.....	233
18. Compléments sur la criticalité auto-organisée	234
18.1. Les puits de potentiel.....	234
18.2. Un analogue hydraulique.....	235
18.3. Propriétés des cascades ou avalanches.....	237
18.4. Les attracteurs étranges.....	238
19. Compléments sur l'énergie	240
19.1. Les unités d'énergie.....	240
19.2. Les sources d'énergie de l'industrie.....	241
19.3. Les sources d'énergie du vivant.....	242
19.4. Les sources possibles d'énergie du futur.....	243
19.5. Le dilemme de la biomasse.....	244
19.6. Les options du nucléaire.....	245
19.7. L'irremplaçable énergie solaire.....	246
20. Réponses à un philosophe	248
Liste alphabétique des auteurs cités	251
Glossaire des termes scientifiques et techniques	263
Liste des figures et tableaux	273
Bibliographie	275

Remerciements

Je remercie en tout premier lieu Roger Bonnet, directeur de l'ISSI. M'ayant offert de donner en mai 2008 une conférence à Berne sur ce sujet, il m'a vivement encouragé à écrire ce livre qu'il a ensuite accepté de préfacer.

Après avoir écrit en anglais une dizaine de chapitres destinés à des lecteurs de formation scientifique, l'importance de toucher un auditoire plus vaste m'apparut clairement, mais la tâche de vulgariser cette information me semblait insurmontable. Je dois à l'enthousiasme d'un jeune professeur d'Histoire, Denis Gorteau, le courage d'entreprendre ce travail. Il m'a proposé d'écrire un livre avec lui sous la forme d'un dialogue. Malheureusement, le caractère décousu du dialogue qui en est résulté rendait l'exposé difficile à suivre. J'ai donc repris ce travail seul. La partie traitant de l'évolution historique de l'humanité s'en est trouvée réduite à un seul chapitre. Afin de garder l'unité de style, j'ai rédigé cette partie moi-même, mais je l'ai fait sous son contrôle. Je remercie aussi tout particulièrement le Docteur Alain Coussement et Denis Rivière pour leurs longs échanges de correspondance, durant ce travail.

Ma reconnaissance va d'abord aux lecteurs auxquels j'ai confié la première version de ce manuscrit et qui m'ont fait part de leurs commentaires, en particulier Hervé Marc pour ses corrections de style et Jacques de Gerlache qui est venu tout spécialement de Bruxelles pour discuter avec moi. Outre Roger Bonnet, Alain Coussement et Denis Rivière, il me faut encore ajouter à la liste des premiers lecteurs Julien Fleury, dont une partie des commentaires est reproduite à la fin du livre, René Merle, Yves Dupont et Jean-Michel Svirine.

Ma reconnaissance va ensuite aux lecteurs qui ont accepté de lire la version révisée de mon manuscrit et de m'adresser leurs commentaires, Vincent Cheynet, Yves Cochet, Romain Ferrari, Jean-Marc Levy-Leblond et Gabriel Gachelin. Qu'ils soient tous ici remerciés pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, leurs commentaires et leurs encouragements.

François Roddier

Préface

Ce livre a été écrit par un physicien de grand talent, un expérimentateur formé au sein de l'équipe du Prix Nobel de Physique 1966, A. Kastler à l'École normale supérieure de Paris, et un astronome instrumentaliste dont la rigueur peut difficilement être mise en doute. Ce n'est sans doute pas un hasard si l'impulsion qui a amené François Roddier à écrire ce livre a aussi été celle de plusieurs de nos collègues communs : J.E. Blamont, directeur du service d'Aéronomie, A. Lebeau, ancien directeur au CNES, à l'ESA et à la Météorologie nationale, L. Woltjer, ancien directeur de l'ESO, et moi-même, pour ne citer que quelques-uns. Tous, sondeurs par nos talents différents des espaces infinis et, à des degrés divers, soucieux de l'évolution du seul monde habité connu à ce jour, nous nous sommes en fin de carrière préoccupés du futur de l'humanité. Il y a bien sûr des différences d'approches entre nous. Contrairement aux deux premiers, qui se préoccupent surtout du siècle ou des décennies à venir, dans notre livre (« *Surviving 1000 centuries. Can we do it?* », Springer, 2008), L. Woltjer et moi posons le problème de la survie de l'humanité à très long terme, sur une période de temps au moins aussi grande que celle qui a vu l'homme moderne sortir des savanes africaines et coloniser la planète entière. Rien de comparable certes aux échelles des temps astronomiques et aux quatre milliards et demi d'années qui mesurent l'âge de notre planète, mais une période suffisamment longue dans son évolution pour attribuer au livre de François Roddier et au nôtre leur caractère commun.

Mais il y a là encore des différences. L. Woltjer et moi avons adopté une approche descriptive de l'état des lieux et des ressources de la Terre. Nous avons tenté aussi de proposer les prémisses d'une gouvernance mondiale en vue d'assurer une perspective possible, certes teintée d'optimisme, s'agissant de la survie de l'humanité au-delà de l'« Introduction au siècle des menaces » de J. Blamont et évitant « L'enfermement planétaire » d'A. Lebeau, lesquels, respectivement, ne nous offrent pas beaucoup d'alternatives au suicide collectif. Au cours de la rédaction de « *Surviving 1000 Centuries* », j'avais souvent le sentiment qu'un fil unificateur manquait à notre approche

et sentais, mais sans trop savoir comment y parvenir, qu'il nous fallait la compléter par une vision et un raisonnement plus scientifiques. C'est justement ce qu'apporte le livre de François Roddier et, quand il m'a fait part de son intérêt nouveau pour la thermodynamique, je pris conscience que là se trouvait peut-être la solution au défaut qui me tracassait. Si l'approche thermodynamique n'offrait pas une perspective de survie à plus long terme que la nôtre, elle ne la contredisait pas. Les discussions fréquentes et passionnantes qui s'ensuivirent me poussèrent à conseiller vivement à François Roddier d'écrire ce livre, ce qui me vaut aujourd'hui l'honneur d'en présenter la préface.

La thermodynamique, tout comme la physique quantique, se complaît à confronter les esprits rationnels à des problèmes où la compréhension se heurte souvent au paradoxe et aux limites de la logique immédiate. Quand son second principe nous dit que l'entropie, qui mesure le désordre d'un système, ne peut que croître, ou la quantité d'information qu'il contient diminuer, on est confronté immédiatement aux paradoxes du monde qui nous entoure dans lequel nous voyons apparaître au cours du temps des structures de plus en plus complexes, de plus en plus organisées donc de plus en plus riches d'informations. François Roddier nous fait entrer de plain-pied dans ces apparentes bizarreries, mais sans nous perdre dans les ramifications et les équations de la thermodynamique moderne. La physique des phénomènes irréversibles hors équilibre et le rôle des *structures dissipatives* en sont pourtant riches, qui valurent à Ilya Prigogine d'obtenir le Prix Nobel de Chimie en 1977. Ses travaux sur les systèmes auto-organisés ouvrirent la voie à des réflexions de grande ampleur scientifique et philosophique, sur le développement de la complexité des structures naturelles, qu'elles soient physiques ou biologiques, et sur le rôle irréversible du facteur temps. L'application de cette réflexion à l'Univers tout entier est ce qui fait la force et l'attrait du livre de François Roddier.

Suivant l'illustre exemple de Prigogine, il nous fait naviguer dans un monde étrange où l'évolution, le darwinisme, le non-déterminisme disputent aux sciences humaines et à la sociologie l'intérêt du lecteur. Beaucoup pourraient se décourager et hésiter à pousser plus avant la lecture. Ce serait une erreur ! Ces pages sont passionnantes. Il faut les lire et les relire si on pense perdre le fil. Que chacun ou chacune soit rassuré(e),

qu'il ou qu'elle soit scientifique professionnel ou seulement esprit éclairé et curieux, elles réserveront à tous à la fois une occasion de réfléchir sur des problèmes apparemment déconnectés ou, plus simplement, d'apprendre et de comprendre l'évolution.

Quel lien *a priori* entre la machine à vapeur, « *Alice au pays des merveilles* », les tas de sable, les cyclones, la criticalité auto-organisée, l'effondrement des sociétés et l'évolution de l'Univers, dont Prigogine disait que « le plus nous savons de lui, le plus difficile il est de croire au déterminisme » ? La thermodynamique, répond Roddier ! Si sa démonstration débute par la description, simple, rigoureuse et facile à comprendre des principes de cette science (dont les non-spécialistes apprendront qu'il y en a trois et non pas deux), sans s'aider du biais d'équations complexes, se reposant sur de nombreux exemples familiers soudain reliés par des lois physiques, elle bifurque assez rapidement vers des considérations économiques et sociologiques étonnantes, lesquelles vaudront probablement à leur auteur des remarques incroyables ou même acerbes.

Les trois premières parties sont des enchantements. Beaucoup de questions « que tout le monde se pose » soudain s'éclairent. On s'y émerveille d'avoir (presque) tout compris. Par contraste, la quatrième sera sans doute celle qui posera le plus de problèmes à la majorité des lecteurs. Elle en a d'ailleurs posé à Roddier lui-même. Les biologistes purs n'accepteront sans doute pas ce qui n'a pas été inventé par eux, et pour cause ! Les historiens pourront grincer des dents sur certains raccourcis peut-être trop rapides ou trop simples de l'histoire de Rome ou par l'utilisation d'exemples trop spécifiques et non nécessairement généralisables. Les marxistes ne se priveront pas de protester devant cette approche trop « physique » des phénomènes économiques et de l'évolution des sociétés pas tout à fait en ligne avec l'idéologie anti-capitaliste et ne mettant pas suffisamment en cause l'exploitation de l'Homme par l'Homme. D'autres s'étonneront de la futurologie, voire de la fiction, qui caractérise les dernières pages, où l'effondrement précède naturellement la restructuration et ouvre la voie au futur d'une humanité assagiée et réfléchie. Enfin, se prend-on à penser, les lendemains vont « chanter » ! C'est justement par cette touche d'idéalisme que nos deux approches convergent parce que nous pensons – naïvement sûrement aux yeux des économistes libéraux – que l'histoire du monde ne s'arrêtera pas dans la

« corbeille », mais se prolongera grâce à ce capital unique, propre à l'espèce humaine, que constituent à la fois son cerveau et son intelligence et qui lui a permis de réagir et de prendre conscience de son destin fatal face aux crises historiques majeures dont l'histoire récente, en particulier celle de l'Europe au xx^e siècle, nous a offert des exemples traumatisants. Souhaitons que l'avenir nous donne raison.

Roger-Maurice Bonnet

Introduction

Il y a 50 ans, je débutais ma carrière scientifique sous la direction de Jacques-Émile Blamont. Celui-ci revenait des États-Unis où il avait assisté aux débuts de la recherche spatiale. Il allait lancer la France, et avec elle l'Europe, dans la même voie. En mars 1959, je participais avec lui à la première expérience spatiale européenne : un tir de fusées Véronique au Sahara. Les cinquante ans qui suivirent marquèrent un progrès spectaculaire de nos connaissances de l'univers. Des progrès analogues ont été enregistrés dans pratiquement tous les domaines de la connaissance.

De tels progrès sont sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Nous pensions qu'ils devaient améliorer le sort de l'homme. Ils l'ont fait en partie. La médecine, notamment la chirurgie, a progressé. La production agricole a considérablement augmenté. Mais une fraction seulement de l'humanité en profite. Après avoir temporairement régressé, la faim dans le monde augmente à nouveau. Pratiquement inexistant au début de ma carrière, le chômage en France est devenu persistant et les crises économiques endémiques. Nos ressources en pétrole diminuent. La couche protectrice d'ozone de notre atmosphère est en danger. Un réchauffement climatique grave est annoncé. Qu'avons-nous fait ?

La plupart des chercheurs de ma génération s'interrogent, notamment ceux en « sciences de l'Univers ». En 2004, Jacques Blamont publie un livre « *Introduction au siècle des menaces* »¹ dans lequel « il démonte pièce à pièce la machine infernale que, grâce au progrès scientifique auquel nous avons tant cru, nous sommes en train de léguer à nos enfants... »² En 2008, à l'occasion du 50^e anniversaire du laboratoire qu'il a créé, il me confie : « ce sera pire que tout ce que j'ai raconté ». Avec un théologien, Jacques Arnould, il publie « *Lève-toi et marche* »³.

1. Jacques Blamont. « *Introduction au siècle des menaces* ». Odile Jacob (2004).

2. Note de l'éditeur.

3. Jacques Arnould, Jacques Blamont. « *Lève-toi et marche. Propositions pour un futur de l'humanité* ». Odile Jacob (2009).

En 2005, un autre chercheur en sciences de l'Univers, André Lebeau, géophysicien ayant occupé de hautes fonctions au CNES et à l'ESA⁴, publie « *L'engrenage de la technique* »⁵ dans lequel il analyse l'évolution de l'Homme en termes d'évolution biologique. En 2008, il publie « *L'enfermement planétaire* »⁶, dans lequel il montre les limitations de nos ressources, un livre aux conclusions angoissantes.

En 2008 également, Roger-Maurice Bonnet, collègue et ami, élève comme moi de Blamont, directeur scientifique à l'ESA puis directeur de l'ISSI⁷, publie avec Lodewijk Woltjer, ancien directeur de l'ESO⁸, un livre intitulé « *Survivre mille siècles, le pouvons-nous ?* »⁹, dans lequel ils passent en revue les causes possibles d'extinction de l'espèce humaine.

Après avoir passé les seize dernières années de ma carrière aux États-Unis, j'ai pris ma retraite en janvier 2001 et je suis revenu en France. Je me suis alors intéressé à la biologie et je me suis naturellement posé les mêmes questions. J'ai commencé par mettre le fruit de mes réflexions sur un site web :

<http://www.francois-roddier.fr/>.

Ces réflexions m'ont rapidement conduit aux lois de la thermodynamique, science dont j'enseignais les éléments au tout début de ma carrière de professeur à l'université de Nice. Ayant repris contact avec Roger Bonnet, celui-ci me parla de son livre qui allait paraître. Je lui dis que je pensais avoir une réponse à la question que son titre posait. Il m'invita alors à exposer mes idées à Berne et me convainquit d'écrire moi aussi un livre.

Écrire un livre sur ce sujet est une entreprise particulièrement ardue pour diverses raisons. La première est que la thermodynamique, et plus particulièrement la thermodynamique hors-équilibre, est une science difficile, peu

4. CNES : Centre National d'Études Spatiales ; ESA : Agence Spatiale européenne.

5. André Lebeau. « *L'engrenage de la technique. Essai sur une menace planétaire* ». Gallimard (2005).

6. André Lebeau. « *L'enfermement planétaire* ». Gallimard (2008).

7. International Space Science Institute, dont le siège est à Berne (Suisse).

8. ESO : European Space Observatory, dont la direction est située à Garching près de Munich.

9. Roger-Maurice Bonnet, Lodewijk Woltjer. « *Surviving 1.000 centuries can we do it ?* ». Springer, Praxis (2008).

enseignée. La notion d'*entropie*¹⁰ est particulièrement délicate. Il a fallu un siècle pour la comprendre. De nos jours certains distinguent encore l'*entropie* thermodynamique de l'*entropie* informationnelle sans savoir qu'il s'agit d'un seul et même concept. L'*entropie* d'un système est une mesure de notre méconnaissance de ce système. Cela implique que l'*entropie* est autant une propriété de l'observateur que du système observé. Certains refusent encore de l'admettre.

La difficulté remonte à l'interprétation physique de la notion de probabilité. Pour certains une probabilité est une grandeur physique mesurable par des procédés statistiques. C'est l'interprétation « fréquentiste ». Elle conduit cependant à émettre des hypothèses de stationnarité et d'ergodicité physiquement invérifiables. Pour d'autres, une probabilité est une quantité « subjective » qui dépend de nos connaissances « *a priori* ». C'est l'interprétation dite bayésienne. Dans son livre « *The logic of science* », le physicien américain E. T. Jaynes montre que l'approche bayésienne permet d'unifier la théorie des probabilités et la statistique en une logique déductive unique permettant de prendre des décisions optimales en présence d'information incomplète. C'est ce qu'il appelle « la logique de la science ».

Les progrès récents sur lesquels repose ce livre sont fondés sur l'approche bayésienne. C'est l'approche suivie ici implicitement. Faisant partie de l'Univers que nous étudions, nos connaissances sont et resteront toujours incomplètes. L'Homme est une *structure dissipative* comme une autre. En important de l'information de son environnement, il améliore constamment ses connaissances. Ce faisant il diminue son *entropie* interne pour dissiper l'énergie toujours plus efficacement.

Il est clair que, si les lois de la physique sont générales, leur application à des domaines aussi complexes que la biologie ou les sciences humaines paraît encore hors de portée. La difficulté est double. Celle du nombre de variables mises en jeu et celle de la non-linéarité des phénomènes. Dans la deuxième moitié du XX^e siècle, des progrès considérables ont été réalisés dans ces deux domaines. Le problème du nombre de variables a été attaqué par une approche statistique.

10. Tous les termes que vous trouverez en *italique* sont des termes scientifiques et techniques expliqués dans un glossaire en fin de livre.

C'est le domaine de la *mécanique statistique*, prolongement de ce qu'on appelait autrefois la thermodynamique. Le problème de la non-linéarité a progressé grâce à l'expérimentation numérique. C'est le domaine de la dynamique non-linéaire ou théorie du chaos.

Malgré ces progrès, des difficultés subsistent. Le domaine exact de validité de certains résultats théoriques utilisés ici est encore discuté. Ces difficultés sont liées à la notion même de *structure dissipative*. Par définition, une telle structure est dans un état stationnaire, ce qui semble exclure a priori d'en étudier l'évolution. Un autre problème est lié à la définition exacte des frontières. Ces problèmes continuent à être discutés chaque année entre spécialistes.

L'ensemble des résultats obtenus jusqu'ici me paraît cependant avoir une portée immense. Si l'on m'avait dit il y a dix ans que les lois de la *mécanique statistique* pouvaient expliquer le comportement humain, j'aurais souri d'un air dubitatif. J'en suis maintenant totalement convaincu. Les lois fondamentales de la biochimie sont les lois de la thermodynamique, établies par Gibbs. Dans la mesure où les êtres vivants sont des ensembles de réactions biochimiques, ils ne peuvent qu'obéir à ces lois.

Mon but est de montrer que les résultats déjà obtenus ouvrent de larges perspectives, non seulement en biologie, mais aussi en sciences humaines. On me reprochera sans doute d'en avoir exagéré la portée. Ce livre ne fait que rapprocher les pièces d'un puzzle. Le résultat me paraît remarquablement cohérent. Je pense donc que cette portée est réelle. Je vois ce livre comme un programme scientifique pour le XXI^e siècle, un programme permettant d'unifier la science, de la cosmologie aux sciences humaines.

Malheureusement, de nos jours, la science est extrêmement cloisonnée. Peu de physiciens s'intéressent à la biologie, encore moins aux sciences humaines. Peu de biologistes s'intéressent à la physique, encore moins de chercheurs en sciences humaines. Chacun a sa propre discipline. De formation je suis physicien. Depuis dix ans, je m'intéresse à la biologie. Écrire un livre qui couvre toutes les disciplines depuis la cosmologie jusqu'à la sociologie n'est pas une entreprise aisée. Des erreurs ou des imprécisions sont inévitables. J'en demande d'avance pardon aux lecteurs. J'apprécierais beaucoup qu'on me les signale pour une édition ultérieure éventuelle.

Une des difficultés que j'ai rencontrées est liée au vocabulaire. Chaque discipline développe son propre jargon. Pour aider le lecteur, celui-ci trouvera à la fin du livre un glossaire des termes scientifiques et techniques utilisés. Les termes en italique dans le texte renvoient à ce glossaire. L'utilisation de mots courants, de la vie de tous les jours, conduit cependant à une autre difficulté. Richard Dawkins a intitulé son premier livre « *Le Gène égoïste* », comme si un *gène* pouvait avoir un comportement humain. Dawkins s'en excuse en disant qu'il s'agit d'une figure de style. Ce livre va beaucoup plus loin. Mon but est de montrer que, sous des aspects différents, on retrouve les mêmes processus aussi bien en physique, qu'en biologie ou en sociologie. On peut suivre ces processus de façon continue d'une discipline à l'autre et par conséquent les décrire avec le même vocabulaire.

Le vocabulaire courant est particulièrement adapté à décrire le comportement humain. On l'applique sans difficulté aux animaux. Peut-on l'appliquer aux choses ? On dit par exemple qu'un individu en imite un autre. On le dit aussi d'un singe ou d'un oiseau. Mais lorsqu'un aimant s'aligne sur son voisin peut-on dire qu'il l'imité ? Nous verrons pourtant que le processus est tout à fait semblable (section 3.1). Le problème du vocabulaire se pose de façon particulièrement aiguë lorsqu'il y a manifestation d'intention. On tue un lapin pour le manger. Un chat en fait sans doute autant d'une souris, quoique d'une façon plus instinctive. Nous verrons qu'une bactérie se dirige vers sa nourriture. Est-ce dans l'intention de se nourrir ou plus simplement parce que son comportement est dicté la loi de Le Chatelier (section 9.1) ? Pour moi ce n'est qu'une question de langage.

Inversement, on sait maintenant que l'atmosphère terrestre se maintient constamment dans un état dit « de production maximale d'entropie » qui maximise la dissipation de l'énergie. Il apparaît de plus en plus clairement que ce processus s'applique aux écosystèmes. On constate en effet qu'un écosystème s'auto-organise de façon à constamment maximiser son taux de dissipation d'énergie. On s'attend à ce que processus s'applique aussi aux sociétés humaines. Peut-on dire qu'une société humaine s'auto-organise pour maximiser la vitesse avec laquelle elle dissipe d'énergie ? Je n'hésite pas ici à le dire, même si la finalité de nos actions nous paraît différente.

Les physiciens sont en effet habitués à exprimer les lois de la physique sous

forme de principes variationnels. Un système mécanique évolue selon le principe de moindre action. La lumière se propage de façon à minimiser son chemin optique. Pour un physicien « tout se passe comme si » la lumière cherchait constamment le chemin le plus rapide pour aller d'un point à un autre. On arrive ainsi à l'idée que l'univers cherche constamment à maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe. Que ce principe s'applique à l'évolution de l'humanité ne nous étonne donc pas, même si les êtres humains peuvent exprimer des intentions différentes.

On sait que les lois de la chimie se déduisent entièrement des lois de la physique, bien que cette opération ne soit pas toujours aisée. Il en est de même pour la biochimie. Pourtant certains biologistes sont encore réticents à penser que les lois de la biologie découlent entièrement de celles de la chimie. Même si l'origine de la vie n'a pas encore été entièrement élucidée, il est clair que celle-ci résulte de réactions chimiques particulières, dites *autocatalytiques* (section 8.1). On peut donc passer continûment de la chimie à la biologie. La *sélection naturelle* apparaît maintenant comme une conséquence des lois de la thermodynamique (section 5.3).

L'application de la biologie à l'Homme soulève encore plus de réticences. L'extrapolation un peu trop hâtive de ses lois à l'Homme a, par le passé, conduit à des aberrations¹¹. L'idée que notre comportement peut suivre des lois heurte notre sentiment de libre arbitre. Réduire l'Homme aux lois de la physique semble être une approche terriblement matérialiste. Elle paraît occulter la spiritualité de l'Homme, qu'on ressent comme essentielle. Nous verrons que loin de l'occulter, elle nous en montre le rôle et l'importance.

L'idée centrale de ce livre est en effet que, de *génétique*, l'évolution est devenue progressivement *culturelle*. La *culture* est définie ici comme l'ensemble des informations mémorisées dans le cerveau. Il est clair qu'elle n'est pas le propre de l'Homme. Trois chapitres sont consacrés au passage des *gènes* à la *culture*. Le propre de l'Homme est que chez lui, la *culture* est devenue le facteur dominant de l'évolution. Autrement dit, on ne peut appliquer les lois de la biologie à l'Homme qu'en remplaçant les gènes par la *culture*. L'évolution

11. Citons le darwinisme social, la justification du racisme, et l'eugénisme.

de l'Homme est essentiellement *culturelle*. Thermodynamiquement, l'esprit humain réduit son *entropie* (s'auto-organise) afin que le corps puisse dissiper plus d'énergie.

Nous verrons que certains phénomènes physiques, comme un cyclone, mémorisent de l'information sur leur environnement. Leur mémoire est inertielle. Les plantes mémorisent de l'information dans leurs *gènes*. Les animaux évolués mémorisent aussi de l'information dans leur cerveau. On peut les dresser. On dit qu'ils sont capables d'apprentissage. Lorsqu'on parle de l'Homme, on dit qu'il prend conscience des faits. Dans le cas de l'humanité, on peut parler de prise de conscience collective.

Ce que la physique et la biologie nous apprennent – et l'histoire de l'humanité nous le confirme – c'est que les problèmes qui nous préoccupent se résolvent par des prises de conscience collectives. L'humanité prend actuellement conscience d'elle-même et s'inquiète de ses chances de survie à long terme. Ce livre est une contribution à cette prise de conscience. Elle demandera plusieurs générations. C'est pourquoi je dédie ce livre aux jeunes. Ce sont eux qui prendront enfin pleinement conscience des lois de l'évolution. Grâce à cette prise de conscience, ils bâtiront une humanité future, pleine d'espérance.

Il reste une dernière difficulté : les réflexions exposées ici confirment entièrement les craintes exprimées par beaucoup d'auteurs, notamment ceux cités au début. De plus en plus d'ouvrages paraissent chaque année sur les problèmes d'environnement, la fin du pétrole ou la façon dont les sociétés s'effondrent. Le risque, en écrivant ce livre, est pour moi de paraître comme un oiseau de mauvais augure de plus, et de ne pas être lu. C'est pourquoi j'ai traité rapidement les crises qui menacent notre société, laissant aux personnes plus qualifiées que moi le soin de le faire. Je me suis davantage étendu sur ce qui se passera après la crise, parce qu'un espoir y apparaît. Je suis convaincu que cet espoir est fondé. Il est conforme aux lois de la physique et à tout ce que nous apprend la biologie moderne.

Ce livre adresse enfin un message aux générations actuelles et futures. L'Histoire montre que chaque fois qu'une société est en crise, elle cherche des coupables et désigne des boucs émissaires. Les civilisations primitives offraient des personnes en sacrifice aux dieux. Les Romains ont torturé les chrétiens. Le Moyen Âge s'est

terminé par des guerres de religion. La monarchie française a décapité son roi et un bon nombre d'aristocrates. Plus récemment l'Allemagne nazie a brûlé des juifs. Aujourd'hui on accuse les immigrés ou les « Roms ». Ce livre désigne le vrai coupable : les lois de la mécanique statistique contre lesquelles nous sommes individuellement impuissants. Howard Bloom¹² parle d'un principe de Lucifer sans savoir qu'il s'agit des principes fondamentaux de la thermodynamique. Nos souffrances sont dues à l'*entropie* liée à notre méconnaissance des lois de l'univers. Lorsque ces lois seront universellement reconnues et comprises, cette *entropie* aura été évacuée. L'humanité sera enfin capable de prendre en charge son destin et d'atténuer ses souffrances.

12. Howard Bloom, « *Le principe de Lucifer* », tome 1 et 2, Le jardin des livres (1997 et 2003).

*« La vraie physique est celle qui parviendra,
quelque jour, à intégrer l'Homme total dans
une représentation cohérente du monde. »*

TEILHARD DE CHARDIN
Le phénomène humain

Prologue

La notion d'évolution

Le fait que le monde évolue est pour nous une évidence. Tous les jours mon ordinateur me rappelle de mettre à jour son logiciel. Chacun s'empresse de changer son téléphone portable pour bénéficier des derniers gadgets. On oublie qu'il y a quinze ans, avoir un téléphone portable ou l'internet chez soi était une nouveauté.

Depuis deux cents ans, l'Homme s'est habitué à un progrès scientifique et technique permanent. Ce progrès est de plus en plus rapide. Il ne cesse de s'accélérer. Cela nous paraît dans la nature des choses. La plupart d'entre nous pensent que cela va continuer indéfiniment. Peu d'entre nous réalisent que cela n'a pas toujours été. Nous verrons que cela ne sera pas toujours.

Au Moyen Âge les progrès étaient si lents qu'ils étaient imperceptibles. La notion d'évolution est absente de la littérature de cette époque. La perception était que l'humanité avait toujours été telle qu'on pouvait l'observer, c'est-à-dire dans l'état où Dieu l'avait créée. Les peintures montrent la Sainte Famille en habits du Moyen Âge.

Il semble que tout ait commencé vers la fin du xv^e siècle avec le développement de la typographie par Johannes Gutenberg. À cette époque on considérait que l'explication du monde était dans la Bible. On a donc imprimé la Bible. Pendant tout le xvi^e siècle, les gens apprennent à lire pour lire la Bible. Il y a une immense vague d'alphabétisation. En apprenant à lire la Bible, les gens apprennent à penser par eux-mêmes. Michel de Montaigne incite ses lecteurs à la réflexion philosophique. Les livres se multiplient.

Au xvii^e siècle, des savants comme René Descartes pensent et font savoir qu'il est possible de comprendre le monde indépendamment des croyances religieuses.

C'est la montée d'une pensée rationnelle appelée « cartésianisme ». Blaise Pascal hésite entre la religion et la raison. Il fait son fameux « pari ».

Au XVIII^e siècle, les livres deviennent si nombreux que le besoin se fait sentir de « comprimer » l'information et de rassembler toutes les connaissances de l'humanité en un seul livre. C'est l'« *Encyclopédie* » de Denis Diderot et de Jean le Rond d'Alembert ou l'« *Histoire naturelle* » de Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon. La réunion de toutes ces connaissances éclaire l'humanité. C'est le siècle des Lumières.

En lisant l'« *Histoire naturelle* » de Buffon, on y apprend qu'on trouve un peu partout des vestiges de coquillages en haut des montagnes. Ces coquillages ressemblent à ceux que l'on trouve dans l'océan. Certaines roches des montagnes auraient-elles été un jour sous la mer ? L'Écossais James Hutton identifie de la lave dans son jardin. Y aurait-il eu un jour des volcans en Écosse ? Peu à peu l'évidence se fait jour : la Terre évolue.

Moins d'un demi-siècle plus tard, Jean Baptiste de Lamarck étudie d'abord la botanique puis la zoologie. Il se passionne ensuite pour la *paléontologie*. Celle-ci nous enseigne que des organismes vivants ont existé qu'on ne trouve plus maintenant. De toute évidence les espèces végétales et animales évoluent. Bien plus, elles évoluent du plus simple vers le plus complexe. Dans sa « perfection », l'Homme serait l'aboutissement de l'évolution. Un nouveau demi-siècle plus tard, Charles Darwin publie son livre sur l'origine des espèces par la *sélection naturelle*. Le mécanisme de l'évolution se fait jour.

En 1916, Albert Einstein publie son équation reliant la forme de l'espace-temps à la distribution d'énergie. À son grand étonnement, l'Univers paraît variable dans le temps. L'idée d'un univers qui évolue semble impensable à Einstein. Il ajoute à son équation une constante, dite « cosmologique », afin de rendre l'Univers statique. En 1929, Edwin Hubble montre que l'Univers est en expansion. Einstein qualifiera l'ajout d'une constante cosmologique comme étant la plus grande bourde de sa vie.

Ainsi non seulement la vie et la Terre évoluent, mais l'Univers lui-même évolue. Si tout évolue, y a-t-il des lois qui régissent cette évolution ?

I

Les lois de la thermodynamique

1. La thermodynamique du XIX^e siècle

Bien que pouvant prendre des formes différentes (mécanique, électrique, chimique), une certaine quantité d'énergie reste toujours la même. On dit qu'elle se conserve. Elle tend cependant à se dissiper, c'est-à-dire à se transformer en chaleur. La chaleur diffère des autres formes d'énergie en ce qu'elle ne peut pas être intégralement convertie en une autre forme. Dans un système dit fermé, c'est-à-dire isolé du reste du monde, l'énergie se transforme irréversiblement en chaleur. Les différences s'estompent, les mouvements cessent. Le système atteint peu à peu un état dit d'équilibre thermodynamique.

1.1. L'énergie

Dans un univers où tout évolue, comment connaître les lois qui régissent son évolution ? Une mathématicienne, Emmy Noether, a montré que si l'évolution obéit à des lois fixes, alors il existe une grandeur mesurable qui se conserve au cours de l'évolution. Les physiciens appellent une telle grandeur, un invariant. Découvert au XIX^e siècle, cet invariant porte le nom d'énergie. C'est en quelque sorte le fil d'Ariane qui permet de suivre l'évolution.

L'approvisionnement en énergie des sociétés humaines est actuellement une telle préoccupation que cette notion abstraite, née des sciences physiques, est devenue aujourd'hui une notion courante. Chacun sait qu'un apport d'énergie est nécessaire pour mettre une masse en mouvement. Pour un physicien, une grandeur est définie si on sait la mesurer. Pour mesurer une quantité d'énergie, les physiciens font appel à la notion de travail mécanique. On produit du travail mécanique lorsque, par exemple, on élève un poids d'une certaine hauteur. L'énergie nécessaire, appelée dans ce cas travail mécanique, est le produit de la force appliquée (égale et opposée au poids) par la longueur du déplacement (ici une hauteur).

Chaque fois qu'on élève le même poids de la même hauteur, on fournit le même travail mécanique ou la même énergie. Il y a bien des façons d'élever un poids. On peut par exemple tirer sur une corde. On fournit alors de l'énergie musculaire que l'on peut ainsi mesurer. On peut aussi utiliser un moteur électrique. L'électricité est une autre forme d'énergie. Celle-ci peut être fournie par une batterie d'accumulateurs dans laquelle l'énergie est emmagasinée sous forme chimique.

Si l'énergie peut revêtir des formes très variées, son importance vient de ce qu'elle se conserve. Dans tous les cas, l'énergie peut être mesurée avec la même unité. L'unité internationale est le joule du nom du physicien anglais James Prescott Joule. L'énergie fournie par unité de temps porte le nom de « puissance ». On la mesure en joule par seconde, appelé aussi watt, du nom de l'ingénieur anglais James Watt qui a mis au point la première machine à vapeur utilisable industriellement (voir compléments).

Par exemple, l'énergie qui a servi à élever le poids n'est pas perdue. On peut la récupérer en faisant redescendre le poids. En redescendant, le poids peut faire tourner une dynamo qui va produire de l'électricité et recharger ainsi la batterie. Tout ceci suppose que les manipulations que nous avons exécutées sont parfaitement réversibles. Malheureusement, elles ne le sont en général qu'imparfaitement, parfois même pas du tout. Si la corde casse, le poids tombe. L'énergie est apparemment perdue.

1.2. La dissipation d'énergie

Les physiciens ont constaté que, dans ce cas, l'énergie n'est pas vraiment perdue. Elle s'est transformée en chaleur. La même quantité d'énergie produit toujours la même quantité de chaleur. Elle permet d'élever la même quantité d'eau de la même différence de température. Malheureusement la transformation d'énergie en chaleur est une opération irréversible. On peut utiliser une bouilloire électrique pour chauffer de l'eau, mais, en se refroidissant, l'eau de la bouilloire ne rendra pas l'électricité qui a été consommée.

Le problème est que, quelle que soit sa forme, l'énergie finit toujours par se transformer intégralement en chaleur. Prenons par exemple le balancier d'une

horloge ancienne. On l'écarte de sa position d'équilibre puis on le lâche. Il va osciller un certain temps, mais l'amplitude des oscillations va peu à peu diminuer jusqu'à l'arrêt complet du balancier. L'énergie mécanique des oscillations s'est transformée en chaleur par frottement mécanique. Pour entretenir le mouvement, il faut remonter les poids de l'horloge. En descendant, ceux-ci fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir le mouvement du balancier qui, à son tour, la convertit en chaleur. En physique, la conversion d'énergie en chaleur s'appelle « dissipation d'énergie ».

Il en va exactement de même pour nous. La nourriture que nous mangeons est notre source d'énergie. Elle permet de maintenir les battements de notre cœur, comme la descente des poids d'une horloge maintient les battements de son balancier. Elle fournit le travail mécanique nécessaire à nos mouvements. Comme pour l'horloge, cette énergie est constamment convertie en chaleur. Elle maintient notre corps à 37 °C. Il faut donc constamment manger pour vivre, comme on rajoute du pétrole ou du bois dans un appareil de chauffage pour maintenir sa température.

L'homme moderne ne se contente pas de manger. Il « consomme » aussi de l'énergie pour se chauffer ou pour se déplacer en voiture. Les physiciens n'aiment pas l'expression « consommer de l'énergie », car l'énergie ne disparaît pas : elle est transformée en chaleur. Les physiciens préfèrent l'expression « dissiper » l'énergie. Lorsqu'un conducteur freine, l'énergie dite « cinétique », associée au mouvement de la voiture, est transformée en chaleur dans les freins. Ceux-ci deviennent chauds. Ils se refroidissent ensuite grâce à la ventilation qui disperse cette chaleur dans l'atmosphère, d'où l'idée de « dissipation ». L'énergie dissipée est irrécupérable. On ne peut plus la convertir en travail mécanique. On dit que la transformation d'énergie *cinétique* en chaleur est irréversible.

1.3. Les deux premières lois

Cela ne veut pas dire qu'il est impossible de convertir de la chaleur en énergie mécanique. C'est ce que fait un moteur de voiture. Il convertit en mouvement de la chaleur produite par la combustion de l'essence. Le problème est que cette conversion ne peut être que partielle. Au début du XIX^e siècle, les ingénieurs

se demandaient pourquoi. Le français Nicolas Léonard Sadi Carnot a été le premier à apporter une réponse. Ce faisant, il fondait une nouvelle science, la thermodynamique.

Celle-ci repose sur deux lois principales appelées autrefois « principes ». La première loi est que la chaleur est une forme d'énergie. La deuxième loi est que l'on ne peut pas convertir de la chaleur en énergie mécanique sans différence de température. En effet, si de la vapeur ou de l'air chaud peut pousser un piston, il est nécessaire d'exercer une force pour ramener le piston à son état initial. Cette force est d'autant plus faible qu'on a condensé la vapeur ou refroidit l'air contenu dans le cylindre.

Une machine à vapeur effectue des cycles de transformations au bout desquels elle revient chaque fois à son état initial. Au cours de chacun de ces cycles, elle extrait de la chaleur de la chaudière où l'eau se vaporise pour en rendre une partie au condenseur où l'eau se condense. Seule la différence est convertible en énergie mécanique. La fraction maximale de chaleur convertible en énergie mécanique est appelée *rendement de Carnot*. Ce rendement est proportionnel à la différence de température et ne peut être obtenu que si toutes les opérations effectuées sont réversibles.

Cela confère à la chaleur un statut particulier. La plupart des formes d'énergie (électrique, chimique, etc.) sont intégralement convertibles en travail mécanique. On les qualifie du nom d'*énergie libre*. La chaleur ne l'est pas. C'est pourquoi on la considère comme une forme dégradée d'énergie. Toute dissipation d'énergie entraîne une perte d'*énergie libre*.

Les propriétés de la machine à vapeur décrites ci-dessus sont générales et s'appliquent à toutes les machines thermiques, quelle que soit la façon dont elles sont construites. Telle qu'elle a été énoncée par Carnot, la deuxième loi dit qu'on ne peut durablement produire de l'*énergie libre* qu'en effectuant des cycles fermés de transformations qui extraient de la chaleur à une source chaude et en cèdent une partie à une source froide. Le rendement de l'opération est maximal lorsque toutes les transformations effectuées sont réversibles. Nous verrons à la fin de ce livre (section 16.3) que cette loi s'applique à l'humanité tout entière et que celle-ci est en train de l'apprendre à ses dépens.

1.4. L'entropie

Un peu plus tard un physicien allemand, Rudolf Clausius, reprit le travail de Carnot et découvrit une quantité mystérieuse, aux propriétés intéressantes, qu'il baptisa *entropie*. Après un cycle de transformations, *l'entropie* reprend sa valeur initiale si toutes les transformations sont réversibles, sinon elle augmente. *L'entropie* est donc une mesure de la dégradation ou dissipation de l'énergie. Tant que *l'entropie* est constante, il n'y a pas de perte d'*énergie libre*. Dès que *l'entropie* augmente, il y a perte d'*énergie libre*. Une partie de cette énergie n'est plus convertible en énergie mécanique : elle a été dissipée. Lorsqu'en langage courant on parle de dissipation d'énergie, les physiciens parlent de production d'*entropie*. Les deux expressions sont équivalentes.

Si l'énergie est le fil d'Ariane qui permet de suivre l'évolution, *l'entropie* est la flèche qui oriente ce fil et indique le sens du temps. Si l'énergie se conserve, elle se dégrade. *L'entropie* est une mesure de sa dégradation. Le concept d'*entropie* est essentiel pour une bonne compréhension de ce livre. Je me contente ici d'en donner une idée générale. Le lecteur qui souhaiterait en savoir davantage pourra se reporter aux compléments sur *l'entropie* à la fin de ce livre (chapitre 17).

1.5. Systèmes fermés ou ouverts

Clausius a montré que si on isole une partie de l'Univers de façon à supprimer tous ses échanges de matière et d'énergie avec l'extérieur, alors son *entropie* ne peut qu'augmenter ou rester constante. Elle reste constante tant que toutes les transformations qu'elle subit sont réversibles. Elle augmente dès qu'elle subit une transformation irréversible. Prenons par exemple une bouteille isolante dite « Thermos » dans laquelle on mélange de l'eau chaude et de l'eau froide en proportions voisines. Au bout d'un certain temps, on obtient de l'eau tiède. La transformation est irréversible. *L'entropie* du mélange est plus grande que celle de ses composants. Remarquons qu'avec de l'eau chaude et de l'eau froide, on peut faire marcher un moteur thermique et obtenir du travail mécanique. Ce n'est plus possible une fois que toute l'eau est à la même température. Lorsque *l'entropie* augmente, la possibilité d'obtenir du travail mécanique diminue, il y a perte d'*énergie libre*. De l'énergie a été dissipée.

Pour désigner une partie isolée du reste de l'Univers, les physiciens utilisent l'expression « système fermé ». Les transformations réelles n'étant jamais parfaitement réversibles, l'entropie d'un système fermé augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale pour laquelle il n'est plus possible d'obtenir de travail mécanique. Toutes les différences s'estompent. Il n'y a plus de différence de température, de pression, voire de composition chimique. On dit qu'on a atteint l'équilibre thermodynamique. Tout système fermé évolue de façon à atteindre l'équilibre thermodynamique.

Aussi intéressantes qu'elles soient, ces lois ne permettent guère d'expliquer l'existence de la vie. Certes, elles ne lui sont pas contraires. Isolée dans une bouteille Thermos, une mouche finit par épuiser ses réserves d'oxygène et de nourriture et meurt. Tout mouvement cesse. La mort est un état proche de l'équilibre thermodynamique. Mais tout cela ne nous explique pas pourquoi la vie est apparue sur Terre et encore moins son évolution.

Clairement, la vie ne serait pas possible si la Terre était un système fermé. Elle ne l'est pas. Elle reçoit en permanence un flux d'énergie du Soleil sous la forme d'un rayonnement lumineux, pour la majeure partie visible, et remarquablement constant. Elle réémet cette énergie dans tout l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Autrement dit, elle est traversée par un flux permanent d'énergie. Éclairée d'un côté, principalement au niveau de l'équateur, sa température est loin d'être uniforme. Ces différences de température mettent en mouvement son atmosphère. Elles créent les dépressions et les anticyclones qu'étudie la météorologie. La Terre est un système ouvert.

2. La thermodynamique du xx^e siècle

Dans un système ouvert, traversé par un flux d'énergie, c'est-à-dire hors équilibre, des structures en mouvement apparaissent. En s'adaptant à l'environnement, elles s'auto-organisent de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse. Cela a pour effet de maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe. On dit que ce sont des *structures dissipatives*. Les cyclones ou les êtres vivants sont des *structures dissipatives*. Un ensemble de *structures dissipatives* en interaction, comme l'atmosphère terrestre, un écosystème ou une société humaine, est aussi une *structure dissipative*.

2.1. Les structures dissipatives

La plupart des systèmes ouverts, traversés par un flux permanent d'énergie, contiennent des structures en mouvement. Si l'on interrompt ce flux alors le système devient fermé. Son *entropie* interne augmente jusqu'à ce que l'équilibre thermodynamique soit atteint. Tous les mouvements s'arrêtent et les structures disparaissent. Si l'on rétablit le flux, son *entropie* interne peut diminuer, des mouvements spontanés apparaissent, de l'énergie mécanique se dissipe. Dans les années 60, le physicien Ilya Prigogine proposa le terme de *structure dissipative* pour désigner ces structures qui apparaissent. J'utiliserai ici ce terme au sens large de structure qui ne se maintient que grâce à un flux constant d'énergie¹³. Elles sont comme un château de sable que l'on reconstruit sans cesse grâce à un apport constant de nouveau sable.

Chacun d'entre nous peut aisément en observer un exemple en posant une casserole d'eau sur le feu. Un flux d'énergie va la traverser de bas en haut. L'eau s'échauffe au fond de la casserole, surtout au centre. L'eau chaude étant

13. Au sens strict, une structure dissipative est dans un état stationnaire.

moins dense que l'eau froide, un courant d'eau chaude s'élève au centre de la casserole. Arrivée à la surface, l'eau chaude s'étale, se refroidit et redescend principalement le long des parois latérales de la casserole, plus froides. Les physiciens appellent cela un phénomène de *convection*. L'eau de la casserole est une structure dissipative. Elle s'est spontanément mise en mouvement. À plus grande échelle, un cyclone se met en mouvement pour dissiper dans l'atmosphère la chaleur de l'océan. C'est aussi une *structure dissipative*. D'une manière générale, l'atmosphère terrestre est une *structure dissipative*. Elle « s'auto-organise » pour transporter la chaleur de l'équateur vers les pôles.

Prigogine avait tout de suite compris que la notion de *structure dissipative* s'appliquait à la vie. Si l'atmosphère terrestre s'auto-organise pour dissiper l'énergie solaire, la vie ce serait auto-organisée pour la même raison. L'un est un simple phénomène de physique des fluides, l'autre un phénomène beaucoup plus lent de nature physico-chimique. Clairement, une cellule vivante est une *structure dissipative*. Elle ne subsiste que grâce à un apport constant de matière et d'énergie. L'apport d'énergie est la base de son *métabolisme*. Un ensemble de *structures dissipatives* en interaction est en général aussi une *structure dissipative*. C'est le cas par exemple de cellules en interaction comme dans une *colonie* de bactéries ou dans un organisme multicellulaire. C'est le cas aussi des espèces animales ou végétales. Plantes, animaux, hommes ou sociétés humaines sont des *structures dissipatives*. Ils se maintiennent en se renouvelant sans cesse, grâce à un apport continu d'énergie. Pour la première fois, les physiciens disposaient d'un concept s'appliquant aussi bien à la matière inerte qu'à la matière vivante ou aux sociétés humaines. Comme les châteaux de sable, les sociétés humaines ne subsistent que si on les reconstruit sans cesse, les uns avec du sable nouveau, les autres avec des générations nouvelles d'individus.

2.2. La troisième loi

Revenons à notre casserole d'eau. Lorsqu'on la met sur le feu, une différence de température apparaît entre le haut et le bas de la casserole. La deuxième loi nous dit que, grâce à cette différence de température, une partie de la chaleur de l'eau peut être convertie en énergie mécanique. Des mouvements apparaissent effectivement. Il y a production d'*énergie libre*. Mais au fur et à mesure que ces mouvements s'amplifient, ils diminuent la différence de température

entre le haut et le bas de la casserole. Le rendement de la production d'énergie mécanique décroît. À un moment donné, ces mouvements vont cesser de croître. Le taux de production d'*énergie libre* a atteint sa valeur maximale. Le flux d'énergie à travers la casserole aussi. Autrement dit, des mouvements s'auto-organisent dans la casserole de façon à maximiser le flux d'énergie qui la traverse. La vitesse à laquelle l'énergie se dissipe, ou taux de production d'*entropie*, est aussi maximal.

Le même phénomène se produit dans l'atmosphère terrestre. Bas sur l'horizon aux pôles, le Soleil y apporte chaque seconde moins d'énergie par unité de surface qu'à l'équateur. La température au pôle est une trentaine de degrés moins élevée qu'à l'équateur. Grâce à cette différence de température, des courants peuvent s'auto-organiser dans l'atmosphère pour transporter la chaleur de l'équateur au pôle. Cela a pour effet de diminuer leur différence de température donc le rendement de la production d'énergie mécanique. À un moment donné, ces courants cessent de croître. Le flux d'énergie qu'ils transportent a alors atteint sa valeur maximale. C'est effectivement ce que les géophysiciens observent. Ils disent que l'atmosphère terrestre est dans un état de production d'*entropie* maximale. Le même phénomène a été constaté pour Mars et pour Titan.

Jusqu'ici, c'est une constatation expérimentale. Aucune loi connue de la thermodynamique n'en fait un phénomène général. Un nombre croissant de physiciens pensent cependant que c'est une loi générale : les *structures dissipatives* s'auto-organisent de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse. Elles le font en produisant de l'*énergie libre*. Elles maximisent leur production d'*énergie libre*, de façon à maximiser le flux d'énergie qui les traverse. Cela a pour conséquence de maximiser la vitesse à laquelle l'énergie se dissipe. On dit que les *structures dissipatives* maximisent le taux de production d'*entropie*. Les spécialistes désignent cette loi hypothétique sous le nom de « loi de production maximale d'*entropie* » ou sous le sigle de MEP ou MaxEP (en anglais : *Maximum Entropy Production*).

En janvier 2003, un chercheur d'origine écossaise, Roderick Dewar, employé à Bordeaux à l'INRA¹⁴, en a proposé une démonstration en termes de *mécanique statistique*, une branche de la physique dont je parlerai plus loin. La généralité de

14. Institut national de la recherche agronomique.

cette démonstration est toutefois encore discutée. De même que la deuxième loi de la thermodynamique a d'abord été admise comme un principe général avant d'être démontrée à partir de principes plus fondamentaux, nous ferons ici de même pour cette nouvelle loi que nous désignerons sous le nom de 3^e loi de la thermodynamique. Nous verrons qu'elle a une importance considérable en biologie, car elle permet d'expliquer en termes physiques le processus de *sélection naturelle*. Ce qui nous intéresse ici, c'est qu'elle s'applique aussi à l'Homme et aux sociétés humaines. C'est une constatation courante que les sociétés humaines dissipent sans cesse toujours plus d'énergie. La loi de production maximale d'*entropie* implique qu'elles s'auto-organisent de façon à maximiser leur taux de dissipation d'énergie. Elles le font bien sûr inconsciemment.

2.3. La mécanique statistique

Carnot et Clausius vivaient au XIX^e siècle. Ils ont établi les principes de la thermodynamique comme des principes généraux capables de rendre compte de tous les faits expérimentaux. Ils l'ont fait sans se soucier de la nature de la matière. Vers la fin du XIX^e siècle, notamment grâce aux progrès de la chimie, un nombre croissant de physiciens étaient persuadés que la matière était constituée d'atomes ou, plus précisément, d'assemblages d'atomes appelés molécules. Les plus brillants d'entre eux, comme l'anglais James Clerk Maxwell, théoricien de l'électromagnétisme, s'évertuaient à expliquer le comportement de la matière comme étant celui d'un ensemble de molécules. Admettant que les molécules interagissent entre elles suivant les lois connues de la mécanique classique, la pression ou la température d'un gaz devenaient pour eux des grandeurs statistiques, c'est-à-dire des moyennes calculées sur un grand nombre de molécules. Ainsi Maxwell établit que la température d'un gaz était une mesure de l'énergie *cinétique* moyenne de ses molécules. Une nouvelle branche de la physique prenait naissance, la *mécanique statistique*.

Le physicien anglais James Prescott Joule avait montré qu'en agitant de l'eau, on pouvait élever sa température et que l'élévation de température était toujours proportionnelle à l'énergie mécanique fournie. Il en avait conclu que l'énergie mécanique avait été convertie en chaleur, une forme particulière d'énergie. Nous avons vu que cette opération irréversible produit de l'*entropie*. Il vint à l'idée d'un physicien autrichien, Ludwig Boltzmann, que l'*entropie*

était une mesure du désordre moléculaire. En effet, en agitant l'eau, on communique aux molécules un mouvement mécanique initialement ordonné. Peu à peu, ce mouvement tend naturellement à devenir désordonné. Si la température est une mesure de l'énergie *cinétique* moyenne des molécules, alors celle-ci a bien été accrue. L'énergie mécanique associée à un mouvement ordonné des molécules a été convertie en chaleur, une forme d'énergie associée au mouvement désordonné des molécules.

L'*entropie* d'un système isolé augmente parce que le mouvement au hasard des molécules tend naturellement à devenir désordonné. Cette évolution est irréversible. Par contre, s'il y a apport d'énergie extérieure, alors le mouvement peut devenir ordonné. C'est le cas par exemple d'une différence de pression. Si un apport d'énergie extérieure maintient une différence de pression entre deux parties d'un fluide, alors un flux ordonné de molécules va s'organiser créant un courant destiné à égaliser les pressions. L'expérience de la casserole d'eau sur le feu montre qu'une différence de température peut elle aussi créer un flux ordonné de molécules. Le passage d'un état moléculaire désorganisé à un état moléculaire organisé correspond à une diminution d'*entropie*.

2.4. Entropie et information

Peu de temps après Boltzmann, le physicien américain Willard Gibbs généralisait sa théorie, y incluant notamment les réactions chimiques, essentielles pour expliquer la vie. Son travail resta longtemps mal compris. La notion d'ordre a une apparence subjective. Chacun range ses affaires comme il l'entend. Si un bureau couvert de documents peut paraître tout à fait en ordre à son utilisateur, il peut tout aussi bien paraître en complet désordre à la personne chargée d'en retirer la poussière. La notion d'ordre est en effet intimement liée à la notion d'information. L'ordre est un moyen de mémoriser et d'échanger de l'information. Dans un atelier, un ouvrier range ses outils non seulement pour les retrouver plus facilement, mais aussi pour que ses compagnons puissent les trouver facilement. Ce n'est pas par hasard si les Français ont baptisé « ordinateur » un appareil de traitement de l'information.

Il a fallu attendre la fin de la Deuxième Guerre mondiale pour qu'un physicien américain, Claude Shannon, spécialiste des télécommunications, se pose le

problème de mesurer une quantité d'information. En formalisant le problème, il tomba sur la formule mathématique que Gibbs avait donnée pour l'*entropie*. L'expression de Shannon montrait qu'une augmentation d'*entropie* peut être considérée comme une perte d'information. Cela donnait un nouveau sens au mot *entropie*. Lorsque le mouvement des molécules est parfaitement ordonné, l'état microscopique du système est complètement déterminé. La vitesse de chaque molécule est connue : c'est celle du fluide. Lorsque le mouvement devient désordonné, les vitesses des molécules prennent des valeurs différentes. On ne les connaît plus. L'état microscopique du système devient indéterminé. Clairement notre information sur le système a diminué. Inversement lorsque, grâce à un apport d'énergie extérieure, le mouvement des molécules devient ordonné, alors de l'information apparaît. L'*entropie* du système diminue. Avec Shannon, l'*entropie* d'un système devenait une mesure de notre méconnaissance de son état microscopique. Cela entraîne un certain nombre de conséquences qui ne sont pas toujours pleinement appréciées.

2.5. L'apparition et la mémorisation de l'information

Une première conséquence est qu'un système qui s'auto-organise a une évolution plus ou moins imprévisible. En effet, si l'on pouvait parfaitement prévoir son évolution, cette évolution ne nous apporterait aucune information. Notre connaissance du système resterait inchangée. Le fait que son *entropie* diminue montre que ce n'est pas le cas : notre connaissance du système augmente. Il y a apparition d'informations nouvelles, imprévues. Cela explique les difficultés des prévisions météorologiques. Cela explique aussi pourquoi le comportement des êtres vivants est largement imprévisible. L'évolution d'une société humaine l'est aussi. Au contraire l'évolution d'un système isolé est largement prévisible : un mélange d'eau chaude et d'eau froide donne toujours de l'eau tiède.

Une autre conséquence vient du fait que l'*entropie* d'un système isolé ne peut qu'augmenter. Cela entraîne que si l'*entropie* d'une partie du système diminue, l'*entropie* de l'autre partie augmente d'au moins autant. Lorsqu'une *structure dissipative* s'auto-organise, son *entropie* interne diminue. Cela veut dire qu'à l'extérieur du système l'*entropie* doit augmenter d'au moins autant. Curieusement, une *structure dissipative* diminue son *entropie* interne de façon

à augmenter l'*entropie* externe. On traduit cela en disant qu'une *structure dissipative* exporte son *entropie* vers l'extérieur. D'après ce que nous avons vu, une exportation d'*entropie* équivaut à une importation d'information. Cela veut dire que l'information nouvelle qui apparaît lorsqu'une structure dissipative s'auto-organise provient de son environnement. Cette information apparaît et est mémorisée dans sa structure. Une *structure dissipative* s'adapte à son environnement de façon à maximiser son taux de production d'*entropie*, c'est-à-dire de dissipation de l'énergie.

C'est ce que fait l'eau d'une casserole sur le feu. Le mouvement convectif de l'eau s'adapte à la différence de température entre le haut et le bas de la casserole. Elle mémorise cette différence de température. Si l'on éteint le feu, le mouvement ne s'arrête pas immédiatement, la mémoire s'efface progressivement¹⁵. Plus complexes, les êtres vivants ont une mémoire plus permanente et de bien plus grande capacité. Ils mémorisent leur environnement dans les *gènes*. L'évolution des *gènes* permet aux êtres vivants de s'adapter à l'évolution de leur environnement.

Un nouveau type de mémoire est alors apparu, facilitant l'adaptation : la mémoire du cerveau. La capacité de mémoire des *gènes* est limitée. Celle du cerveau a cru progressivement jusqu'à dépasser celle des *gènes*. Chez l'Homme, elle y est très supérieure. Nous verrons que, de *génétique* chez les animaux, l'évolution est devenue essentiellement *culturelle* chez l'Homme.

En inventant l'écriture, l'homme a créé une mémoire pour les sociétés humaines. L'imprimerie a permis de multiplier les échanges d'information entre les hommes. En comparant ces échanges d'information à ceux des neurones dans le cerveau, nous verrons qu'une sorte de cerveau global s'auto-organise dans nos sociétés. Le développement moderne des télécommunications et l'invention des ordinateurs connectés par internet continuent à accroître les capacités de ce cerveau global.

15. En dynamique des fluides, les effets de mémorisation sont particulièrement nets dans le cas des écoulements de Couette-Taylor. Des tourbillons apparaissent entre deux cylindres en rotation. La structure de ces tourbillons ne dépend pas seulement de l'état présent du système, mais aussi de ses états passés.

Clairement, la vie évolue en mémorisant une quantité sans cesse croissante d'information. Elle le fait de deux façons différentes, d'une part en augmentant le nombre d'êtres vivants capables de mémoriser de l'information, d'autre part en augmentant la capacité de mémoire de ces êtres vivants. Nous avons vu que plus un système mémorise d'information plus son *entropie* diminue et que toute diminution d'*entropie* d'un système accroît sa capacité de produire du travail mécanique, donc de dissiper de l'énergie.

Ainsi la vie s'auto-organise en formant des structures vivantes de plus en plus complexes, capables de mémoriser de plus en plus d'information, de façon à dissiper toujours plus d'énergie. C'est ce que font les sociétés humaines. Elles s'auto-organisent en formant un « cerveau global » capable de mémoriser toujours plus d'information. Cette information leur permet de dissiper de plus en plus d'énergie. C'est ce que nous appelons le progrès scientifique et technique.

Les phénomènes de dissipation d'énergie ont longtemps été un frein à notre compréhension des lois de la nature. La résistance de l'air fait qu'une force semble nécessaire pour maintenir la vitesse d'un corps en mouvement. Les corps célestes se meuvent dans le vide. Grâce à eux, Newton a pu montrer que la force est liée non pas à la vitesse, mais à l'accélération. Le mouvement des astres est parfaitement prédictible. Les lois de la physique ont été établies grâce à des expériences reproductibles, dont le résultat est parfaitement prédictible.

Il n'en est plus de même lorsqu'on aborde des phénomènes plus complexes comme ceux rencontrés en dynamique des fluides. Les fluides obéissent pourtant à des équations précises, les équations de Navier-Stokes, mais qu'on ne peut pas résoudre analytiquement. On peut les résoudre numériquement. C'est ce que font tous les météorologues, mais la moindre incertitude sur les données initiales est amplifiée et rend toute prédiction à long terme impossible. Les équations de Navier-Stokes contiennent un terme dit de viscosité. C'est lui qui est responsable de la dissipation d'énergie. Si l'on supprime ce terme, alors les équations deviennent solubles analytiquement et la prédiction à long terme devient possible.

La biologie étudie les êtres vivants. Ce sont des *structures dissipatives* encore plus complexes que les écoulements des fluides. Elles font intervenir des

réactions chimiques. Cependant les lois de la chimie découlent de celles de la physique. Les êtres vivants y sont soumis, mais, plus complexes que les fluides, ils dissipent plus d'énergie. Il n'est donc pas étonnant que leur comportement soit encore moins prévisible. Le problème de la biologie est que, dans ces conditions, il devient difficile d'effectuer des expériences reproductibles. Le problème devient encore plus difficile lorsqu'on aborde les sciences humaines. C'est pourquoi on parle de sciences dures (la physique) et de sciences molles (la sociologie).

Le but de ce livre est de montrer que les processus de dissipation d'énergie sont les mêmes de la physique à la biologie ou la sociologie, mais qu'ils deviennent de plus en plus difficiles à identifier quand on passe des sciences dures aux sciences molles. Il faut donc étudier ces processus dans le domaine des sciences dures, là où ils sont facilement identifiables par des expériences reproductibles, pour pouvoir ensuite les suivre et les identifier dans des domaines beaucoup plus complexes comme ceux de la biologie ou de la sociologie.

3. L'auto-organisation en physique

Les *structures dissipatives* s'auto-organisent à la manière des changements d'état de la matière. Il s'agit d'un processus universel de dynamique non-linéaire. Un état *critique* existe à partir duquel des événements appelés « *bifurcations* » s'enchaînent les uns après les autres, produisant des avalanches de *bifurcations*.

L'amplitude des avalanches est aléatoire.

Leur fréquence est inversement proportionnelle à leur amplitude.

C'est le processus de *criticalité auto-organisée*.

3.1. Les processus d'auto-organisation

Une propriété commune aux molécules et aux individus d'une société est la capacité de s'organiser par eux-mêmes. Les molécules d'eau s'organisent pour former des cristaux de glace. C'est le passage de l'état liquide à l'état solide. Les flocons de neige offrent un magnifique exemple d'auto-organisation. Le processus d'auto-organisation des sociétés humaines aurait-il quelque relation avec les changements d'état de la matière ? Aussi surprenant que cela paraisse, nous allons voir que c'est le cas.

Les physiciens distinguent deux types de changements d'état appelés aussi *transitions de phase*. Ils distinguent les *transitions de phase* abruptes et les *transitions de phase* continues. L'apparition du brouillard dû à la condensation de l'eau dans l'atmosphère est une *transition de phase* abrupte. Elle nécessite la présence de « germes » de condensation, comme des poussières ou des particules chargées électriquement, généralement présentes dans l'atmosphère. Lorsqu'un germe est présent, la transition est très rapide. Le phénomène inverse qui est l'apparition de bulles de vapeur dans de l'eau à la température d'ébullition est aussi une transition abrupte. L'eau a du mal à bouillir sans germes. Une pincée de sel provoque immédiatement l'ébullition.

Dans les années 80, les physiciens ont découvert que, de façon générale, les

structures dissipatives s'auto-organisent à la manière des *transitions de phase* continues. Il me faut donc maintenant décrire ces transitions en détail.

3.2. Les transitions de phase continues

3.2.1. L'opalescence critique

Moins connue que les transitions abruptes, la *transition de phase* continue entre l'état liquide et l'état vapeur ne nécessite aucun germe. Elle ne s'observe qu'à une pression et une température bien précises qualifiées de pression et température *critique*.

La figure 1 montre les divers états (ou phases) que peut prendre une substance en fonction de sa température et de sa pression. Chaque état est représenté par un point ayant pour abscisse la température de la substance et pour ordonnée sa pression. On distingue sur ce diagramme trois zones marquées solide, liquide et vapeur. Si la zone solide est bien distincte des deux autres, la ligne séparant le liquide de la vapeur s'arrête en un point dit *point critique* au-delà duquel le liquide ne se distingue plus de la vapeur. Les coordonnées du *point critique* sont la pression et la température *critique* de la substance.

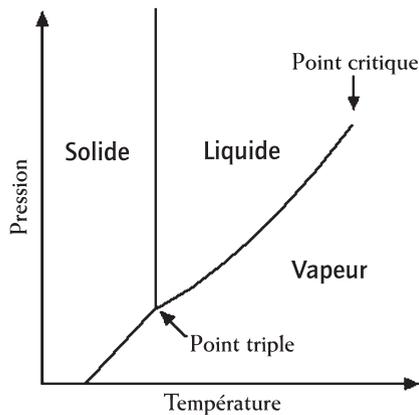


Figure 1. Diagramme pression-température.

Pour l'eau, cette pression est d'environ 220 atmosphères et cette température proche de 374 °C. La transition est donc difficile à observer. L'expérience est plus facile avec des gaz comme le dioxyde de carbone (gaz carbonique) ou l'hexafluorure de soufre. Pour le dioxyde de carbone, la transition se produit à 31,1 °C sous 73 atmosphères. Pour l'hexafluorure de soufre, elle se produit à 45,5 °C sous 37 atmosphères. C'est une expérience traditionnelle des cours de physique de l'enseignement supérieur.

Lorsque le volume correspond aux conditions critiques, mais que la température est légèrement inférieure à celle du *point critique*, on observe que le fluide est séparé en deux parties, une partie plus dense, dite liquide, surmontée d'une partie moins dense, dite gazeuse. La surface de séparation réfléchit la lumière comme le fait la surface de l'eau. Cette réflexion est due à la différence de densité entre les deux parties. Lorsqu'on augmente la température, cette différence de densité diminue. La surface de séparation, bien que restant sensiblement au même endroit, devient de moins en moins visible (l'intensité des reflets diminue). Lorsque la température *critique* est atteinte, la surface de séparation disparaît. Les deux parties du fluide ont atteint la même densité. Il n'y a plus de différence entre elles. Si l'on continue à chauffer, le fluide reste parfaitement homogène.

Si maintenant on refroidit le fluide, un phénomène nouveau va se produire. Lorsque la température *critique* est atteinte, le fluide se met à diffuser la lumière. C'est le phénomène d'*opalescence critique*. Il est dû à des fluctuations aléatoires de densité du liquide. Une caractéristique surprenante de l'*opalescence critique* est que son aspect reste le même qu'on l'observe à l'œil nu, à la loupe ou au microscope. Les physiciens disent que la structure est invariante par *changement d'échelle*. Si l'on continue à refroidir, alors de fines gouttelettes se forment et grossissent. Plus denses que le reste du fluide, elles descendent au fond du récipient où elles forment un liquide homogène.

3.2.2. Du ferromagnétisme au paramagnétisme

Un autre exemple de transition continue à un *point critique* est celui de la transition entre le *ferromagnétisme* et le *paramagnétisme*. Tout le monde sait que le fer s'aimante dans un champ magnétique. Lorsqu'on retire le champ magnétique, le fer reste aimanté. Pour s'en convaincre, il suffit de prendre un trombone de bureau et de le poser contre un aimant. Le trombone aimanté va désormais

attirer à lui tous ceux de la boîte. Si on chauffe un morceau de fer aimanté au-delà de 770 °C, il se désaimante. On a atteint la température *critique* ou *point critique*, appelé aussi *point de Curie*, du nom du physicien français Pierre Curie. Au-delà du *point de Curie*, le fer reste sensible au champ magnétique, mais il ne garde pas son aimantation. De *ferromagnétique*, il est devenu *paramagnétique*.

Le physicien allemand, Ernst Ising, a développé un modèle de cette transition. Dans ce modèle, chaque particule de fer se comporte comme un petit aimant élémentaire appelé *spin* (prononcé : spinne). Chaque *spin* a deux orientations possibles, vers le haut ou vers le bas. Au-delà du *point critique*, dit *point de Curie*, l'agitation thermique des particules est telle qu'en l'absence de champ magnétique un *spin* change sans cesse d'orientation. En présence d'un champ magnétique d'intensité suffisante, les *spins* tendent à s'aligner dans sa direction mais, dès qu'on supprime le champ, ils deviennent à nouveau désordonnés. Si l'on diminue la température, les *spins* changent moins souvent d'orientation. Un *spin* tend alors à s'aligner sur son voisin. De proche en proche, imitant leurs voisins, les *spins* se retournent les uns après les autres. On observe des avalanches de retournements de *spins*. Des domaines dits « *domaines d'Ising* » se forment à l'intérieur desquels tous les *spins* ont la même orientation (figure 2). En l'absence de champ magnétique extérieur, il y a à peu près autant de domaines à *spin* vers le haut que de domaines à *spin* vers le bas. À l'intérieur d'un même domaine, les *spins* « coopèrent » pour produire un certain champ magnétique. Les *spins* de deux domaines opposés sont en « compétition ». Le moindre champ magnétique extérieur va rompre cette symétrie et décider des vainqueurs de la compétition. C'est ainsi que, lorsque le fer se refroidit, il garde l'aimantation, même faible, à laquelle il est soumis. Grâce au fer on a pu retrouver le champ magnétique terrestre au moment de la solidification des roches et en retracer l'histoire.¹⁶

La taille des domaines est aléatoire, mais, au *point critique*, la distribution de leurs tailles a une propriété remarquable. Comme l'*opalescence critique*, elle est invariante par *changement d'échelle*. Autrement dit, ces domaines forment une structure aléatoire qui a le même aspect vu à l'œil nu, à la loupe ou au microscope. Il n'y a aucune dimension caractéristique. Aucun paramètre physique ne

16. Il a été ainsi possible de retracer la dérive historique des continents.

permet en effet d'en fixer la dimension. Mathématiquement, cela implique que la distribution des tailles suit une loi de puissance. Pratiquement, on trouve que le nombre de domaines ayant une dimension donnée est inversement proportionnel à cette dimension (ou à une puissance de cette dimension, proche de l'unité). La figure 2 montre la distribution des *domaines d'Ising* obtenue par simulation numérique pour trois températures différentes. Au-dessus du *point critique* ($T > T_C$), on observe surtout des petits domaines. Au *point critique* ($T = T_C$), la distribution est invariante par *changement d'échelle*. En dessous du *point critique* ($T < T_C$), les grands domaines dominent.

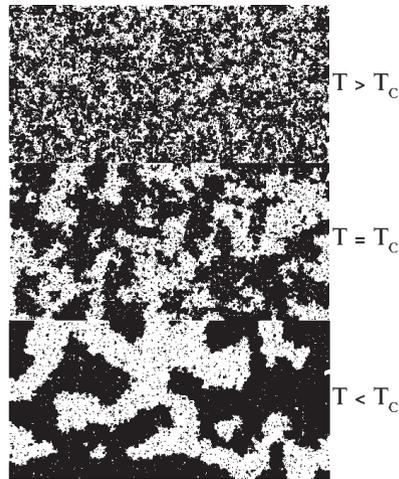


Figure 2. Exemples de *domaines d'Ising* (T_C est la température critique).

Bien que développé spécifiquement pour le *ferromagnétisme*, le modèle d'Ising s'applique aussi bien à la condensation d'un liquide au *point critique*. Au lieu de considérer deux orientations de *spin*, il suffit de considérer deux densités différentes, celle du gaz et celle du liquide. Selon les applications l'un ou l'autre de ces deux exemples paraîtra plus approprié.

Il est remarquable qu'un modèle comme celui d'Ising s'applique en sciences humaines. Il est utilisé en intelligence artificielle pour modéliser la propagation des croyances. Nous verrons que les animaux évolués tendent à s'imiter

les uns les autres comme les *spins* « imitent » leurs voisins. On parle de retournement d'opinion comme on parle de retournement de *spin*. Comme les *spins*, les individus peuvent coopérer ou être en compétition. Nous verrons qu'effectivement les sociétés humaines s'auto-organisent selon un processus tout à fait semblable à celui des *transitions de phase* continues.

3.3. La notion de bifurcation

On dit qu'un système est dans un état métastable lorsqu'un qu'un très faible apport d'énergie suffit pour que le système passe brusquement dans un état plus stable. Un tel changement d'état s'appelle une *bifurcation*. L'énergie à fournir pour qu'il se produise porte le nom d'*énergie d'activation*. La figure 3 montre un exemple de système mécanique dans lequel une balle est dans un état métastable au sommet d'un demi-cylindre. Dans ces conditions, une très faible perturbation de l'environnement telle qu'une vibration ou un souffle d'air peut apporter l'*énergie d'activation* nécessaire pour que la balle quitte son état métastable et tombe dans un état plus stable.

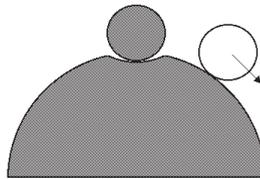


Figure 3. Exemple de *bifurcation*.

Un petit apport d'énergie extérieure permet alors d'en libérer une quantité bien supérieure. Dans le cas des *spins* décrits plus haut, l'*énergie d'activation* est apportée par l'agitation thermique des atomes de fer. Elle provoque le retournement d'un *spin*. L'énergie libérée par le retournement d'un *spin* peut alors servir d'*énergie d'activation* pour retourner d'autres *spins*. On observe alors une cascade ou avalanche de retournements de *spins*.

L'exemple de la figure 3 permet d'illustrer les propriétés générales des *bifurcations*. On peut les énumérer comme suit :

1. Amplification d'une fluctuation aléatoire
2. Rupture de symétrie
3. Apparition et mémorisation d'information
4. Invariance par *changement d'échelle*

On retrouvera ces propriétés dans tous les processus d'auto-organisation.

Ceux-ci sont déclenchés par des fluctuations aléatoires. Certains physiciens pensent que l'Univers a pour origine une fluctuation quantique. Les galaxies et les étoiles ont pour origine des fluctuations de densité de la matière. Les courants de *convection*, ou les courants atmosphériques naissent de fluctuations thermiques. En biologie, les espèces végétales et animales naissent de fluctuations *génétiques*. Nous verrons que les sociétés humaines ont pour origine des fluctuations *culturelles*. L'amplification de ces fluctuations porte le nom de « sensibilité aux conditions initiales ». Elle explique pourquoi il est difficile de prédire l'évolution d'une *structure dissipative*. On le constate pour les prévisions météorologiques. On le constate encore davantage pour le comportement d'un animal, d'une personne ou d'une société.

Une *bifurcation* est caractérisée par ce que les physiciens appellent une rupture de symétrie. Ils donnent à cette expression un sens très particulier. Ils veulent dire que certaines *transformations* géométriques qui, avant la *bifurcation*, laissent le système invariant ne le laissent plus invariant après. Par exemple, un gaz homogène est invariant par translation. Après formation de gouttelettes, il ne l'est plus. Une gouttelette est invariante par rotation. Après cristallisation, elle ne l'est plus. De façon générale, les *bifurcations* introduisent des contraintes qui font que certaines opérations précédemment permises ne le sont plus. Ainsi la balle de la figure 3 peut sortir de son état métastable aussi bien vers la droite que vers la gauche. Après la *bifurcation*, elle est condamnée à rester d'un côté ou de l'autre.

On observe des ruptures de symétrie aussi bien dans l'auto-organisation de l'Univers au moment du Big Bang (matière/antimatière) que dans la formation des galaxies (chapitre 4). L'apparition de la vie correspond à une remarquable rupture de symétrie : la *chiralité*. Les molécules organiques sont généralement asymétriques. Dans les organismes vivants, seule une des deux structures symétriques est présente. Les êtres vivants eux-mêmes sont asymétriques.

À de très rares exceptions près, la structure spirale des coquilles d'escargot tourne toute dans le même sens et nous avons tous le cœur à gauche.

Il y a apparition d'information en ce sens que le nouvel état ne peut être exactement prévu. Dans le cas de la figure 3, l'information qui apparaît peut être symbolisée par les chiffres 0 et 1 suivant que la balle tombe à droite ou à gauche du cylindre. Il y a apparition d'un bit d'information.

L'invariance par *changement d'échelle* implique que les *bifurcations* ont les mêmes propriétés, quelle que soit l'échelle spatiale ou temporelle des événements considérés. Elles peuvent se produire aussi bien à l'échelle des atomes ou des molécules qu'à l'échelle d'une galaxie ou à celle de tout l'univers. Elles n'ont pas d'échelle caractéristique. Les propriétés du système représenté sur la figure 3 sont bien indépendantes de la taille de ce système. Lorsque les événements sont tous de même nature, l'arborescence de *bifurcations* devient une arborescence *fractale*. Une structure *fractale* est invariante par *changement d'échelle*. Elle a le même aspect général, vue à l'œil nu, à la loupe ou au microscope. Un flocon de neige est un bon exemple d'auto-organisation suivant une arborescence *fractale*.

Dans le cas des *structures dissipatives*, cela entraîne que le flux d'énergie varie comme une certaine puissance (en général fractionnaire) de la taille de la structure. En thermodynamique, ces lois de puissance sont caractéristiques des systèmes dans un état de dissipation maximale d'énergie. Les ingénieurs savent, par exemple, que pour optimiser la dissipation d'énergie d'un radiateur, il faut lui donner une structure *fractale*. Ce principe d'optimisation est connu sous le sigle de HOT (en anglais : *Highly Optimized Tolerance*).

3.4. Le processus de criticité auto-organisée

Nous avons dit que les *structures dissipatives* s'auto-organisaient à la manière des *transitions de phase* continues. Il y a cependant des différences importantes entre les deux. Dans le cas d'une *transition de phase* continue, le système évolue vers un état d'équilibre statique (sans mouvement). Il cherche à minimiser son énergie interne. Dans le cas d'une *structure dissipative*, celle-ci tend vers un état d'équilibre « dynamique » (avec mouvement) qui maximise le flux

d'énergie qui la traverse. On dit qu'il y a équilibre dynamique lorsque le mouvement reste stationnaire, c'est-à-dire identique à lui-même. On parle alors d'état stationnaire. Une *structure dissipative* tend vers un état stationnaire de production maximale d'*entropie*. Elle ne l'atteint pas nécessairement.

Reprenons l'exemple de l'atmosphère terrestre (section 2.2). En l'absence de courants atmosphériques, la différence de température croît entre les pôles et l'équateur. Cette différence rend l'atmosphère instable. De grands courants atmosphériques s'auto-organisent transportant la chaleur de l'équateur vers les pôles. Ces courants ont pour effet de diminuer la différence de température qui les avait créés. Cela les déstabilise. Ils se désagrègent en courants de plus en plus petits. On observe des avalanches de perturbations. Le physicien russe Kolmogorov a établi que l'énergie transportée par les petites perturbations est une puissance fractionnaire de leur taille. Il y a bien invariance par *changement d'échelle*.

Le physicien danois Per Bak et ses collaborateurs ont montré que ce processus s'appliquait de façon générale aux *structures dissipatives*. Per Bak compare aussi l'énergie à du sable (section 1.3). Imaginons que l'on déverse continûment du sable sur une table. Celui-ci forme un tas dont la pente devient de plus en plus élevée. On constate qu'il existe une pente *critique* (l'analogie du *point critique*) à partir de laquelle des avalanches peuvent se former. Celles-ci ne se forment pas immédiatement. La plupart du temps apparaissent de petites avalanches, moins souvent de plus grosses, exceptionnellement de très grosses. Per Bak a montré que l'amplitude des avalanches est inversement proportionnelle à leur fréquence. Les physiciens appellent cela une loi en $1/f$ (f désignant la fréquence).

Ces avalanches ont pour effet de diminuer la pente du tas de sable. Celle-ci peut devenir inférieure à la pente *critique*. Les avalanches s'arrêtent. Le sable continuant à affluer, la pente du tas de sable augmente à nouveau pour dépasser la pente *critique* jusqu'à apparition de nouvelles avalanches. Ainsi la pente du tas de sable oscille aléatoirement autour de sa valeur *critique* sans jamais s'y stabiliser. Per Bak a montré que ce processus est très général. Les *structures dissipatives* tendent à osciller au voisinage d'un état *critique*. Il a donné à ce processus le nom de *criticalité auto-organisée* (en anglais : *Self-organized Criticality* ou SOC).

Les mathématiciens qui étudient les systèmes dynamiques non-linéaires qualifient d'*attracteur* les valeurs vers lesquelles tendent les paramètres d'un tel système. Lorsque ces derniers évoluent de manière imprévisible, ces valeurs sont qualifiées d'*attracteur étrange*. D'une manière générale, les structures dissipatives sont attirées vers un état de production maximale d'*entropie* qui a les caractères d'un *attracteur étrange* (section 18.4).

La loi en $1/f$ s'applique aux vraies avalanches, notamment aux avalanches de neige. Les hauteurs ou les largeurs mesurées sont effectivement inversement proportionnelles au nombre d'avalanches observées de la même taille. Cette loi s'applique aussi aux tremblements de terre. Lorsque l'énergie géothermique se dissipe à travers la croûte terrestre, elle produit des tremblements de terre dont l'amplitude est inversement proportionnelle à leur fréquence d'apparition. La loi porte alors le nom de Gutenberg-Richter.

Le processus de *criticalité auto-organisée* entraîne que le flux d'énergie qui traverse une *structure dissipative* n'est, en général, pas constant. Il fluctue aléatoirement formant ce que les physiciens appellent un « bruit en $1/f$ ». Per Bak compare ce phénomène à celui des embouteillages sur une autoroute. Le flux de voitures y est maximal lorsque les embouteillages apparaissent.

Les *structures dissipatives* produisent de l'*énergie libre* (énergie mécanique) à partir de différences de température. Ce sont des machines thermiques naturelles. On voit qu'elles sont instables : elles ont continuellement tendance à s'emballer puis à s'arrêter. Cela était vrai aussi des premières machines thermiques (à vapeur ou à essence) fabriquées par l'Homme. C'est grâce à l'utilisation d'un régulateur à boules que l'ingénieur écossais James Watt a pu construire la première machine à vapeur utilisable industriellement. Les moteurs à essence doivent leurs performances actuelles aux multiples asservissements dont ils ont été munis grâce au progrès de l'électronique.

Per Bak et ses collaborateurs ont montré que le processus de *criticalité auto-organisée* s'applique à l'évolution des espèces biologiques. Certains physiciens pensent qu'il s'applique aussi à l'évolution des sociétés humaines. La thèse de ce livre est qu'il s'applique de façon très générale à la manière dont l'Univers s'auto-organise. Celle-ci sera traitée au chapitre suivant. Les applications biologiques seront traitées dans la partie II. La partie III nous amènera petit

à petit à l'évolution de l'Homme qui sera traitée dans la partie IV. Nous nous contenterons ici de donner quelques exemples en sciences humaines.

3.5. Quelques exemples en sciences humaines

Nous avons vu que le mécanisme de condensation au *point critique* s'applique à l'auto-organisation des *structures dissipatives*. Il s'applique donc à la vie en général et aux sociétés humaines en particulier.

3.5.1. Les avalanches d'événements

Une caractéristique importante du processus général d'auto-organisation est la formation d'avalanches d'événements, chaque événement ayant les propriétés d'une *bifurcation*. On peut illustrer ce processus par une allégorie due à Benjamin Franklin :

« *Faute d'un clou le fer fut perdu,
Faute d'un fer le cheval fut perdu,
Faute d'un cheval le cavalier fut perdu,
Faute d'un cavalier la bataille fut perdue,
Faute d'une bataille le royaume fut perdu,
Et tout cela faute d'un clou de fer à cheval !* »

Il est facile de voir que chacun de ces événements a bien les propriétés d'une *bifurcation* :

Cette avalanche d'événements est bien déclenchée par une fluctuation aléatoire, la perte d'apparence minime d'un clou de fer à cheval.

Il y a rupture de symétrie en ce sens qu'à chacun de ces événements de nouvelles contraintes apparaissent qui limitent les possibilités d'action des combattants. Il arrive parfois en sciences humaines que ces contraintes soient de même nature géométrique qu'en physique. Par exemple, le développement d'un réseau routier a entraîné la nécessité de conduire toujours du même côté de la route, ce qui est bien une rupture de symétrie au sens géométrique du terme.

L'apparition d'information est due au caractère imprédictible des événements considérés. Plus sa probabilité est faible, plus l'information apportée est grande. Shannon définit la quantité d'information apportée par un événement comme étant l'opposé du *logarithme* de la probabilité de cet événement (section 17.5). La mémorisation de l'information est une conséquence de l'irréversibilité des événements. La perte d'un cheval ou d'un cavalier est un phénomène irréversible. Le résultat s'inscrit définitivement dans le cours de l'Histoire.

L'invariance par *changement d'échelle* se retrouve dans le fait que chacun de ces événements a bien les mêmes propriétés alors que leur importance varie dans des proportions considérables depuis la simple perte d'un fer à cheval jusqu'à la perte d'un royaume.

3.5.2. La loi de Zipf

En sciences humaines, une population d'individus peut jouer le rôle d'une population de molécules. Le phénomène d'*opalescence critique* nous montre que des molécules de gaz peuvent spontanément se condenser en une myriade de gouttelettes de dimensions variées. Une population humaine peut-elle en faire autant ?

Elle le fait effectivement. Les populations humaines tendent à se condenser dans les villes. Le mécanisme de la condensation est tout à fait semblable. Aux fluctuations aléatoires des molécules correspondent les décisions aléatoires des individus. Des avalanches d'événements se produisent, semblables à l'avalanche d'événements décrite à la section précédente.

Une ville naît à l'initiative de quelques individus. L'un d'entre eux décide de construire sa maison dans un endroit qui lui semble propice : terre fertile, eau potable à proximité, etc. Un autre hésite entre s'installer au même endroit ou dans une autre région. Il réalise que s'il s'installe au même endroit, les deux individus pourront s'entraider. Un troisième arrive et profite des aménagements déjà faits pour s'installer lui aussi. Un hameau se forme.

Un de ses habitants s'aperçoit que le site est propice à certaines activités qu'il exploite avec profit. Attirés par le gain, d'autres viennent aussi pour en faire

autant. Un des habitants se met à faire du pain pour tout le monde. Il devient boulanger. D'autres commerces s'installent. Ces facilités attirent de nouveaux habitants. Le hameau devient village. Il faut construire une mairie, une église, une école. Des entreprises s'installent. Le village est devenu une ville.

Il s'agit bien d'une avalanche d'événements, les uns entraînant les autres. Semblables aux avalanches de *spins*, ces avalanches sont caractéristiques des processus d'auto-organisation à l'état *critique*. Si le mécanisme de condensation est le même, alors la distribution des populations dans les villes doit obéir aux mêmes lois statistiques que la distribution des gouttelettes dans l'*opalescence critique* ou celle des *domaines d'Ising* au *point de Curie*. Elle doit suivre une loi de puissance. C'est en effet le cas. Le nombre de villes ayant une population de taille donnée est inversement proportionnel à cette taille. Établi notamment par George Kingsley Zipf, ce résultat est connu sous le nom de loi de Zipf.

4. L'auto-organisation de l'Univers

Contrairement à ce que l'on a longtemps cru, l'univers observable est un système ouvert. Au fur et à mesure de son évolution, apparaissent des structures capables de dissiper l'énergie de plus en plus efficacement. Ces structures sont d'autant moins fréquentes qu'elles dissipent plus d'énergie, une caractéristique des processus de *criticalité auto-organisée*. L'univers maximise la vitesse de dissipation d'énergie comme on minimise l'énergie potentielle dans un cristal en alternant les réchauffements et les refroidissements. Il y a alternance entre une macroévolution et une microévolution.

4.1. Le paradoxe thermodynamique

Si l'on demande à un physicien de donner un exemple de système thermodynamique fermé, il y a de bonnes chances qu'il cite l'Univers tout entier. Cela implique que l'Univers dans son ensemble devrait tendre vers l'équilibre thermodynamique. Or, c'est tout le contraire de ce qu'on observe.

On associe aujourd'hui les débuts de l'Univers à un événement appelé « Big Bang » qui se serait produit il y a 13,7 milliards d'années. Les astronomes détectent et étudient le rayonnement électromagnétique issu de cette époque lointaine, le fond diffus cosmologique. L'observation de ce rayonnement nous montre qu'à l'origine l'Univers était très chaud et très proche de l'équilibre thermodynamique. Il n'a cessé de s'en éloigner. En se refroidissant, l'Univers s'est condensé en formant des macrostructures de plus en plus petites, superamas puis amas de galaxies. Avec la formation des étoiles, de fortes différences de température sont apparues spontanément. Avec l'apparition sur Terre de structures vivantes de plus en plus complexes et hautement improbables, les écarts à l'équilibre thermodynamique se sont encore accrus. L'Univers serait-il ouvert ?

On sait que les galaxies s'éloignent de nous à une vitesse, dite de récession, d'autant plus grande qu'elles sont plus distantes. C'est l'expansion de l'Univers.

À partir d'une certaine distance, cette vitesse excède nécessairement celle de la lumière. Plus aucun rayonnement ne peut alors nous en parvenir. On a là une limite au-delà de laquelle l'Univers sera à jamais inobservable. Tant que la vitesse d'expansion de l'Univers est fixe, cette limite est fixe et l'Univers observable (ou susceptible de l'être) est fermé.

Depuis 1998, on sait que l'expansion de l'Univers s'accélère. Cela veut dire que certaines galaxies aujourd'hui visibles (ou qui auraient pu le devenir) disparaîtront à jamais. Notre univers est donc ouvert. Conformément au principe de relativité, la situation est la même pour tous les habitants de toutes les galaxies. Bien que chacun de leurs univers soit en partie différent du nôtre, ils sont eux aussi tous ouverts.

Le paradoxe est ainsi résolu. Sa solution vient du fait que la vitesse de la lumière est finie et qu'elle limite les possibilités d'échanges d'information dans l'espace-temps. L'Univers étant ouvert, il peut s'auto-organiser. Galaxies, étoiles, planètes peuvent se former. La vie peut apparaître sur Terre. Notre existence même est liée à ce qui se passe aux confins de l'Univers.

4.2. La dissipation d'énergie dans l'Univers

La source d'énergie qui alimente l'univers est inconnue. Les cosmologistes parlent d'énergie sombre ou noire. L'univers semble contenir aussi de la matière invisible, dite noire. Le fait que son expansion s'accélère montre qu'il est hors équilibre. La 3^e loi de la thermodynamique implique que l'Univers s'auto-organise de façon à maximiser son taux de production d'entropie. Il crée des *structures dissipatives* capables de produire de l'*énergie libre* et de dissiper cette énergie de plus en plus efficacement.

On peut estimer le taux de dissipation d'énergie des différentes structures de l'Univers : galaxies, étoiles ou êtres vivants. Il est clair qu'une étoile dissipe plus d'énergie qu'un animal, mais lequel des deux dissipe l'énergie le plus efficacement ? Une façon d'estimer l'efficacité avec laquelle une structure dissipe l'énergie est de mesurer son taux de production d'*énergie libre* en watts par unité de masse, par exemple en watts par kilogramme de matière. C'est ce qu'a fait l'astronome américain Éric Chaisson. La figure 4, due à Chaisson

(2001), montre l'efficacité avec laquelle diverses structures dissipent l'énergie dans l'Univers, en fonction de l'âge à laquelle elles sont apparues au cours de l'évolution.

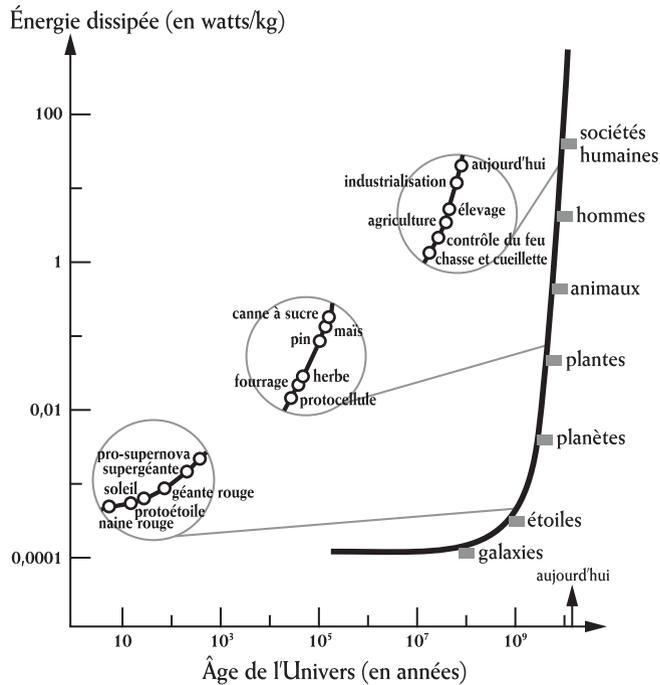


Figure 4. Énergie dissipée par unité de masse en fonction de l'âge d'apparition (d'après Éric Chaisson, 2001).

On constate que cette efficacité croît de plus en plus vite avec le temps. Elle s'est mise à croître particulièrement vite après l'apparition de la vie. Capables de se mouvoir, les animaux dissipent l'énergie plus efficacement que les plantes. À cause de son cerveau, l'Homme dissipe l'énergie encore plus efficacement que les autres animaux. Il est impressionnant de constater qu'un être humain dissipe par unité de masse dix mille fois plus d'énergie que le Soleil. L'Homme crée des sociétés qui dissipent l'énergie encore plus efficacement. Leur taux de production d'énergie libre ne cesse de croître.

De façon générale les structures qui apparaissent ne sont pas du tout uniformément réparties. Elles sont localisées dans le temps et dans l'espace. Nous allons voir que l'Univers s'auto-organise effectivement comme des *transitions de phase* continues, c'est-à-dire sous forme d'avalanches déclenchées par des fluctuations aléatoires. Ces avalanches sont d'autant plus rares qu'elles dissipent plus d'énergie, une caractéristique du processus de *criticalité auto-organisée*.

4.3. Le mécanisme d'auto-organisation

Les physiciens théoriciens pensent que le Big Bang serait né d'une fluctuation quantique, suivie par la condensation d'une avalanche de particules. Ils distinguent trois séries d'avalanches successives produisant d'abord des quarks, ensuite des hadrons (dont les protons et les neutrons) et enfin des leptons (dont les électrons). Chacune de ces séries d'avalanches aurait donné lieu à une rupture de symétrie, la plus connue étant celle qui a donné naissance à un monde de matière à partir d'un mélange de matière et d'antimatière.

Ces condensations successives auraient été possibles grâce à un refroidissement de l'Univers. Ce refroidissement est associé à une très forte accélération de l'expansion de l'Univers appelée *inflation*. Grâce à l'*inflation*, l'Univers est devenu un système thermodynamiquement ouvert (comme expliqué plus haut) donc hors-équilibre.

Le plasma, gaz conducteur très chaud et opaque constituant alors l'Univers s'est refroidi permettant aux protons de capturer les électrons. L'Univers devenant un gaz neutre transparent, l'énergie s'est alors échappée sous forme de rayonnement. C'est ce rayonnement qu'on observe actuellement sous la forme du fond diffus cosmologique. Le spectre de ce rayonnement nous montre que l'Univers était alors très proche de l'équilibre thermodynamique.

Les inhomogénéités (très faibles) de ce rayonnement montrent que les fluctuations aléatoires de densité de l'Univers étaient invariantes par *changement d'échelle*, comme celles de l'*opalescence critique*. C'est bien là une propriété des *transitions de phase* continues au *point critique* (section 3.2). L'énergie

dissipée pouvant s'évacuer, la matière a continué à se condenser, formant des super-amas, puis des amas de galaxies. La matière des galaxies s'est finalement condensée pour former des étoiles.

Les étoiles naissent d'une fluctuation aléatoire appelée instabilité gravitationnelle. Des astronomes, comme le Vénézuélien Antonio Parravano, ont montré que le mécanisme de formation des étoiles est lui aussi analogue à celui des *transitions de phase* continues. La masse initiale des étoiles au moment de leur formation est effectivement distribuée suivant une loi de puissance, caractéristique des condensations en un *point critique*. Le nombre d'étoiles qui se forment est inversement proportionnel au carré de leur masse initiale.

On retrouvera ces mêmes mécanismes aussi bien en biologie qu'en sciences humaines.

4.4. Un panorama de l'évolution

L'astrophysicien autrichien Erich Jantsch distingue deux types d'évolution qu'il qualifie de macroévolution et de microévolution. Inspirée de celles de Jantsch, la figure 5 montre une suite de condensations lentes formant de grandes structures (macroévolution) alternant avec la formation rapide d'avalanches de petites structures (microévolution). La partie gauche de la figure suggère une relation possible entre les trois microstructures et les trois macrostructures nées de l'évolution cosmique primordiale. Cependant aucune flèche ne les rejoint, car, l'Univers étant opaque à ce moment-là, cette partie de l'évolution est inobservable.

Si l'on part des atomes légers (essentiellement de l'hydrogène) dont sont formées les galaxies, alors on observe la suite d'événements décrits dans le texte qui suit. Les termes scientifiques en italique sont expliqués dans le glossaire. On les retrouvera tout au long de ce livre.

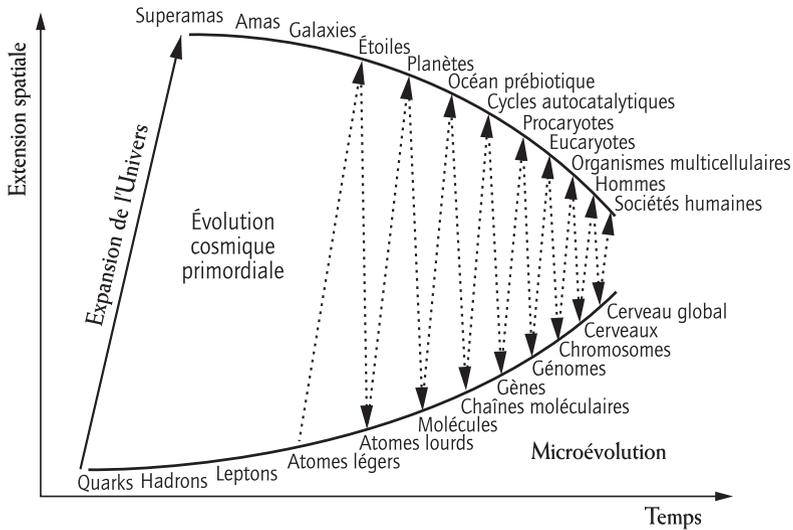


Figure 5. L'alternance entre la macroévolution et la microévolution (d'après Erich Jantsch, 1980).

1. Condensation lente des atomes légers en étoiles, déclenchant des cycles de réactions nucléaires.
2. Formation rapide d'avalanches d'atomes lourds. En fin de vie stellaire, une bonne partie de ces atomes lourds se trouvent rejetés dans l'environnement interstellaire.
3. Condensation lente des atomes lourds autour des nouvelles étoiles en formation.
4. Formation rapide d'avalanches de petites molécules, notamment de l'eau, et du dioxyde de carbone.
5. Condensation lente des planètes et formation éventuelle d'un océan dit « prébiotique », favorable à l'apparition de la vie.

6. Formation rapide d'avalanches de molécules organiques dans l'océan prébiotique.
7. Condensation lente de cycles *autocatalytiques* dans des bulles d'acides gras.
8. Formation rapide d'avalanches de molécules d'ARN.
9. Condensation lente des cycles producteurs de protéines en cellules *pro-caryotes* (cellules sans noyau capables de se reproduire).
10. Formation rapide d'avalanches de *gènes* conduisant à une grande diversité de *procaryotes*.
11. Condensation lente de cycles conduisant à une *symbiose* de *procaryotes*. Apparition des premières cellules *eucaryotes* (cellules à noyau).
12. Formation rapide d'avalanches de *génomés* (*symbioses* de *gènes*) conduisant à une grande diversité d'*eucaryotes*.
13. Condensation lente d'*eucaryotes* conduisant à la formation d'organismes pluricellulaires munis d'un cerveau.
14. Formation rapide d'avalanches de cerveaux conduisant à une grande diversité d'animaux.
15. Condensation lente des neurones conduisant à la formation du cerveau humain.
16. Formation rapide d'avalanches de cerveaux humains.
17. Condensation lente des cerveaux humains avec formation d'un cerveau global (société humaine).

Nous retrouverons des alternances similaires en biologie (section 6.4) et en sciences humaines (section 12.4).

4.5. L'algorithme d'optimisation

Il arrive souvent qu'un ingénieur ait à optimiser un système complexe dépendant de plusieurs paramètres. Pour cela, il doit chercher les valeurs des paramètres qui optimisent une mesure des performances du système. Supposons que, par approximations successives, il ait trouvé un maximum. Il n'est pas sûr que ce maximum soit unique et que, s'il y en a d'autres, ce maximum soit le plus élevé. Il peut y avoir des maximums secondaires. Dans ce cas, notre ingénieur utilisera le plus souvent un algorithme dit de « *recuit simulé* ».

Cet algorithme simule une *transition de phase* : la cristallisation d'une substance. On sait que si l'on refroidit rapidement un liquide en dessous du point de solidification, il va se former un ensemble désordonné de cristaux. On peut améliorer la cristallisation, en réchauffant le matériau (*recuit*) puis en le laissant refroidir lentement. Au cours du réchauffement, les cristaux les plus petits fondent d'abord. Plus longs à fondre les gros cristaux se maintiennent en partie. Leur taille va s'accroître au cours du refroidissement. On peut continuer à améliorer ainsi la cristallisation, en répétant l'opération, c'est-à-dire en faisant osciller la température autour du point de fusion avec une amplitude décroissante (*recuits successifs*). On obtient à chaque fois des cristaux de mieux en mieux ordonnés jusqu'à la formation éventuelle d'un monocristal. Au cours de cette opération, le matériau s'auto-organise de façon à minimiser son énergie interne. Dans un monocristal, l'énergie interne du système est minimale.

On peut visualiser l'opération comme la recherche du point le plus bas d'une surface représentant l'énergie interne du système en fonction des positions des atomes (paramètres du système). Cette surface contient en général de nombreux creux ou minimums secondaires. Si l'on place une bille sur la surface, elle va minimiser son énergie potentielle en roulant dans un creux, mais la surface peut avoir plusieurs creux plus ou moins profonds. Pour faire sortir la bille de son creux, il faut la secouer¹⁷, c'est-à-dire lui fournir de l'énergie d'une façon aléatoire comme on fournit de l'énergie aux atomes d'un cristal en le réchauffant. La bille a alors de bonnes chances de retomber dans un creux

17. Les guerres et les révolutions sont les « secousses » qui forcent les sociétés à se réorganiser (section 12.4).

plus profond, comme le solide a de bonnes chances de se retrouver dans un état mieux ordonné, d'énergie interne plus basse.

L'algorithme s'applique aussi bien à la recherche d'un minimum que d'un maximum (en intervertissant le haut et le bas). Il est utilisé par les ingénieurs pour maximiser les performances d'un système. La figure 5 montre que l'Univers procède de la même façon en cherchant à maximiser son taux de production d'entropie. Il opère par *recuits* successifs, d'amplitudes de plus en plus faibles, formant des structures de plus en plus complexes et de plus en plus efficaces à dissiper l'énergie.

Ainsi, extrêmement chaud au moment du Big Bang, l'Univers pourrait s'être réchauffé plusieurs fois pour former successivement les hadrons, les leptons puis les atomes d'hydrogène. Ces réchauffements successifs pourraient correspondre à des condensations successives en super-amas, amas puis proto-galaxies. En se condensant, l'hydrogène des galaxies s'échauffe à nouveau pour déclencher, au cœur des étoiles, les réactions de fusion nucléaire produisant de l'hélium. Des réchauffements successifs produiront des atomes plus lourds comme le carbone, l'azote et l'oxygène, structures ordonnées de plus en plus complexes.

Il est à noter qu'à chaque étape la température maximale atteinte est inférieure à celle du maximum précédent. Éjectés dans l'environnement interstellaire, les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène vont se condenser à nouveau autour des étoiles en formation. La température atteinte sera alors propice à la formation de molécules simples comme celles de l'eau ou du dioxyde de carbone.

Après refroidissement de l'environnement circumstellaire et condensation de la Terre, le réchauffement suivant viendra des réactions de fission nucléaire (radioactivité) dans le noyau terrestre. La chaleur dégagée par ces réactions sera responsable de la convection dans le manteau terrestre qui maintiendra le dioxyde de carbone dans l'atmosphère et l'eau à l'état liquide.

Nous verrons que les sources hydrothermales ont été vraisemblablement propices à la formation de structures encore plus complexes et ordonnées, les molécules organiques qui sont à l'origine de la vie sur Terre (partie II). La *convection* interne va provoquer la condensation de la croûte terrestre en une succession

de supercontinents qui modulera à son tour le climat et l'évolution des espèces, formant des organismes vivants de plus en plus complexes.

En biologie, on retrouvera l'alternance entre la microévolution et la macroévolution sous une forme appelée *sélection r et K*. Elle conduit à l'apparition d'espèces animales ou végétales de plus en plus complexes, suivie de leur extinction (chapitre 6). En sciences humaines, on la retrouvera sous la forme de civilisations de plus en plus évoluées et de leur effondrement (chapitre 14).

J'ai comparé le résultat de la microévolution à des cristaux de mieux en mieux formés. Avec l'apparition des *gènes*, il devient clair que ces microstructures cristallines jouent le rôle de mémoire. Ce qui reste lorsqu'une étoile explose, qu'une espèce animale s'éteint ou qu'une civilisation disparaît, ce sont les germes qui permettent l'apparition des macrostructures suivantes. Au fur et à mesure de l'évolution, ces germes mémorisent de plus en plus d'information.

Nous verrons (section 9.3) qu'un cerveau, notamment le cerveau humain, fonctionne de la même manière. Nous passons notre vie à mémoriser de grandes quantités d'information dont nous oublierons la plus grande part. Édouard Herriot définit la *culture* comme ce qui reste quand on a tout oublié. Chez l'Homme la *culture* est devenue le moteur de l'évolution (partie III). Elle est le résultat de l'expérience acquise au cours de toute une vie.

Grâce au langage, puis à l'écriture, une partie croissante de cette expérience est préservée à la mort d'un individu et transmise aux générations futures. Ce livre fait lui-même partie du processus. Mon espoir est qu'il sera parmi les germes qui permettront de bâtir les civilisations futures.

4.6. La vie en dehors du système solaire

Au-delà de la formation des étoiles, notre description de l'évolution est limitée à un seul échantillon : le système solaire. La question se pose de savoir si cet échantillon est représentatif. Depuis 1995, on sait que des planètes orbitent autour d'autres étoiles. À ce jour plus de 500 planètes extrasolaires ont été détectées. D'après ce que nous avons vu, la vie est un processus physico-chimique de dissipation d'énergie. Il est donc naturel de

penser que ce processus s'est développé toutes les fois que les conditions ont été favorables.

On peut considérer la formation des planètes, puis l'apparition des diverses formes de vie indiquées sur la figure 4 comme les avalanches d'un processus de *criticalité auto-organisée*. Si l'on estime l'amplitude de ces avalanches en termes de watts/kg portés en ordonnée, alors on peut estimer leurs fréquences respectives, celles-ci étant inversement proportionnelles aux amplitudes. Typiquement un ordre de grandeur sépare chaque type d'avalanche. Grossièrement, une étoile sur dix pourrait avoir une planète comparable à la Terre, parmi lesquelles une sur dix pourrait donner naissance à une certaine forme de vie. Ceci est tout à fait conforme à ce qu'on sait actuellement sur les planètes extrasolaires. Si l'on extrapole aux sociétés humaines, une étoile sur cent mille pourrait donner naissance à une certaine forme de civilisation.

Il paraît donc plausible que des civilisations comparables à la nôtre aient pu se développer dans la Galaxie. Si celles-ci émettent dans le domaine radio, nous devrions être capables de détecter leurs signaux. Les radioastronomes se sont intéressés à cette possibilité. Le nombre de civilisations dont nous pourrions détecter les signaux est donné par l'équation dite de Drake (du nom du radioastronome Frank Drake). On peut limiter ici cette équation à un produit de trois facteurs :

- le taux de formation des étoiles dans la Galaxie (typiquement 10 étoiles par an).
- la fraction de ces étoiles susceptibles de donner naissance à une civilisation (estimée plus haut à 1/100 000).
- le temps pendant lequel cette civilisation émet dans le domaine radio.

On voit que, pour que nous ayons une chance de détecter au moins une civilisation comparable à la nôtre, celle-ci doit émettre pendant au moins dix mille ans. Malgré les multiples essais¹⁸, aucune civilisation extraterrestre n'a encore été détectée. On peut raisonnablement en déduire que, si de telles civilisations existent, leur durée d'émission dans le domaine radio est inférieure à dix mille ans.

18. Les premières tentatives de recherche d'intelligence extraterrestre ou SETI (search for extraterrestrial intelligence) datent de 1960.

Nous verrons que ceci est tout à fait conforme aux conclusions de ce livre. Le principal souci de notre humanité future sera de préserver notre environnement de façon à maintenir la vie sur Terre le plus longtemps possible. Dans ce but, nous ferons tous nos efforts pour utiliser l'énergie disponible le plus efficacement possible. En particulier, nous éviterons de la disperser sous forme de rayonnement dans l'espace. Nos transmissions se feront de préférence par câbles ou par rayonnement très directif. Notre civilisation émet depuis moins d'un siècle. Nous verrons qu'elle traverse une période exceptionnelle de croissance rapide. D'ici un nouveau siècle, nos émissions dans l'espace seront vraisemblablement réduites. Si d'autres civilisations évoluent de la même manière, leur durée d'émission sera certainement aussi très inférieure à dix mille ans, compromettant nos chances de les détecter.

Par contre, il est possible que des civilisations plus avancées que la nôtre existent au sein de la Galaxie et que certaines d'entre elles détectent nos signaux. Dans ce cas, l'hypothèse la plus vraisemblable est qu'elles nous observent, un peu comme nous observons nous-mêmes les singes ou les dauphins, jugeant inutile de gaspiller de l'énergie à essayer de communiquer avec une civilisation moins évoluée que la leur. Cela résout le paradoxe dit de Fermi, du nom du physicien Enrico Fermi qui se demandait pourquoi nous nous trouvions apparemment seul dans une galaxie contenant des centaines de milliards d'autres étoiles.

Nous verrons que notre humanité tend vers une civilisation unique dotée d'un cerveau global planétaire (chapitre 16). Il n'est donc pas exclu que, dans un futur très lointain, des échanges d'information entre des civilisations plus avancées, que n'est actuellement la nôtre, créent un cerveau global galactique¹⁹. Ce serait tout à fait conforme aux lois de l'évolution décrites dans ce livre.

4.7. La vie de l'univers

Il est difficile de terminer ce chapitre sans mentionner l'hypothèse du physicien théoricien Lee Smolin²⁰. On sait que les physiciens ont unifié les lois de

19. Cette tendance à la formation d'une « conscience cosmique » rejoint l'idée de Teilhard de Chardin d'une convergence spirituelle de l'évolution vers un point Oméga.

20. Lee Smolin. « *The Life of the Cosmos* ». Oxford (1997)

la physique nucléaire et de l'électromagnétisme. Cela leur a permis de rendre compte de l'existence des particules élémentaires, mais pas de leurs masses. Or, l'Univers est très sensible aux masses de ses particules, en ce sens que des masses très légèrement différentes confèreraient à l'Univers des propriétés nettement différentes, notamment en ce qui concerne l'existence de la vie. La question se pose donc de savoir pourquoi les masses des particules fondamentales semblent précisément ajustées pour rendre la vie possible.

On sait que la matière de l'Univers se condense dans des singularités appelées trous noirs. Certains théoriciens pensent que les trous noirs sont susceptibles de créer d'autres univers. Les univers se reproduiraient ainsi à travers les trous noirs. Or, la faculté pour un univers de créer un trou noir dépend des masses de ses particules fondamentales. L'idée de Lee Smolin est que les univers qui créent le plus de trous noirs se reproduisent plus vite que les autres. Si l'on admet que, lorsqu'un univers se reproduit, les masses des particules fondamentales peuvent subir des « mutations », alors la « sélection naturelle » va favoriser les univers dont les masses des particules produisent le plus de trous noirs. Capable de se reproduire, notre univers lui-même aurait les propriétés d'un organisme vivant.

Lee Smolin ne mentionne pas la troisième loi de la thermodynamique. Lorsqu'il a émis sa théorie, cette loi n'était encore qu'une hypothèse plausible. Elle vient maintenant étayer son hypothèse. On peut en effet reformuler celle-ci en termes de la troisième loi. Notre univers ne serait qu'un élément d'une avalanche d'univers. Dans cette avalanche, les univers successifs dissiperaient l'énergie de plus en vite. Nous verrons au chapitre suivant (section 5.3) que la sélection naturelle est un processus physique de maximisation des flux d'énergie. Dans cette avalanche d'univers, les masses des particules évolueraient de façon à maximiser la vitesse de dissipation de l'énergie, donc le taux de production de trous noirs.

Pour la même raison, les masses des particules évolueraient de façon à maximiser les chances d'apparition de la vie et la production d'organismes vivants. Bien plus, nous verrons au chapitre 9 que le développement de l'intelligence augmente la vitesse à laquelle les êtres vivants dissipent l'énergie. Il s'en suit que les masses des particules évolueraient de façon à maximiser les chances d'apparition et de développement de formes d'intelligence.

II

L'évolution génétique

5. Le mécanisme de Darwin

La *sélection naturelle* favorise les individus les mieux adaptés à leur environnement. Ce faisant, elle maximise les flux d'énergie dissipée. Elle apparaît ainsi comme une conséquence des lois de la thermodynamique hors-équilibre. La *sélection naturelle* agit directement sur les *gènes*. Ceux-ci s'adaptent en mémorisant de l'information sur leur environnement. En reproduisant cette information, les *gènes* créent des avalanches d'énergie dissipée.

5.1. L'épuisement des ressources

À la fin du XVIII^e siècle, la population en Angleterre s'accroît rapidement. Craignant une nouvelle famine, l'anglais Thomas Malthus publie son fameux « *Essai sur le principe de la population* ». Il constate que les populations humaines tendent à s'accroître en *progression géométrique* (on dit aussi *exponentiellement*). L'étendue des terres cultivables étant limitée, il s'en suit un épuisement rapide de nos ressources alimentaires. Un demi-siècle plus tard, cette constatation de Malthus inspire Charles Darwin : le même problème se pose pour les populations d'animaux sauvages. Tant que de la nourriture est disponible, ces populations croissent *exponentiellement*. C'est pourquoi hommes et animaux cherchent sans cesse de nouvelles ressources.

Une solution à ce problème est d'émigrer. Tout animal en quête de nourriture cherche à émigrer. C'est ce que l'homme a fait pendant longtemps. Grâce aux analyses modernes d'*ADN*, on a pu reconstituer les diverses migrations de notre propre espèce dite *Homo sapiens* depuis son apparition en Afrique il y a plus de cent mille ans. Encore aujourd'hui, lorsque ses ressources s'épuisent, l'homme cherche à émigrer, mais cela devient pour lui de plus en plus difficile.

Qu'il émigre ou non, l'homme ou l'animal ne survit que s'il trouve un nouveau moyen de se nourrir. L'un et l'autre doivent faire face à un changement d'environnement auquel il leur faut s'adapter. En d'autres termes, il est nécessaire

qu'ils « évoluent ». Nous avons vu qu'à l'époque de Darwin, l'idée d'évolution n'était pas neuve. Le français Jean-Baptiste de Lamarck avait déjà proposé l'idée d'une progression de la nature allant des plus petits organismes jusqu'aux animaux et végétaux les plus complexes, pour aboutir à l'homme. Toutefois, le mécanisme de cette évolution restait obscur.

5.2. La sélection naturelle

En ce qui concerne les animaux, Darwin avait observé, notamment aux îles Galapagos, la grande variété des individus à l'intérieur d'une même espèce. Il savait aussi comment les éleveurs mettent à profit ces variations pour sélectionner les animaux les mieux adaptés à la consommation et favoriser leur reproduction. C'est ce qu'on appelle la *sélection artificielle*. L'idée vint donc à Darwin que ce mécanisme devait également s'exercer dans la nature et favoriser les animaux les mieux adaptés à leur environnement.

Ayant plus de difficultés à survivre, ceux qui étaient le moins bien adaptés devaient en moyenne vivre moins longtemps et donc avoir moins de descendants. Parmi ceux-ci, ceux qui avaient hérité de ces mêmes caractères devaient subir le même sort, conduisant rapidement à une disparition des caractères les moins adaptés à leur environnement. C'est ce que Darwin a appelé la *sélection naturelle*. L'épuisement des ressources entraînant un changement continu de l'environnement, une évolution permanente des caractères devait s'ensuivre. Non seulement Darwin justifiait l'hypothèse de Lamarck, mais de plus il en proposait une explication.

La théorie de Darwin allait bouleverser la biologie jusqu'à nos jours. Elle permettait aux biologistes de comprendre l'évolution des êtres vivants en attribuant à leurs caractères une « valeur sélective ». Ainsi, pour un animal se nourrissant de feuilles à la cime des arbres, un long cou présente un avantage certain. Les biologistes disent qu'il a une valeur sélective élevée. Les êtres vivants dont les caractères ont une valeur sélective élevée vivent plus longtemps et se reproduisent davantage que les autres. Leur population devient alors dominante. On peut ainsi expliquer l'apparition d'espèces nouvelles comme la girafe.

Imaginons qu'une forêt se développe. L'herbe pousse mal sous les arbres à cause de l'ombre. Des mammifères herbivores dépérissent. Ils se mettent à manger les feuilles des arbres. Ceux qui ont un cou plus long que celui des autres ont davantage à manger et prolifèrent davantage. Parmi leurs descendants, ceux qui ont ce même caractère prolifèrent également. Favorisant à chaque génération les animaux au cou le plus long, la *sélection naturelle* ne tarde pas à faire apparaître un groupe particulier d'animaux au cou plus long que celui des autres. Se nourrissant au même endroit, ces animaux se reproduisent entre eux, conservant l'avantage d'un cou long. Une nouvelle espèce est née, celle de la girafe.

5.3. Aspect thermodynamique

Les phénomènes que nous venons de décrire ont bien les caractéristiques d'une *transition de phase* continue : amplification d'une fluctuation aléatoire par une avalanche d'événements. Notons que, si l'apparition d'une espèce nouvelle (*phylogenèse*) peut être considérée comme une transition continue, le développement d'un embryon à partir d'un germe (*ontogenèse*) peut être considéré comme une transition abrupte (nécessitant un germe).

Comme toute *structure dissipative*, les êtres vivants ne peuvent subsister sans apport constant d'énergie. Les plantes utilisent directement l'énergie solaire. L'Homme et les animaux utilisent indirectement l'énergie solaire initialement emmagasinée par les plantes. Admirateur de Darwin, Boltzmann²¹ voyait la vie comme une lutte pour l'énergie. Lorsque les ressources s'épuisent, l'environnement évolue. La *sélection naturelle* va alors adapter les organismes vivants à leur nouvel environnement. C'est le postulat de base de la biologie. Tel qu'il est énoncé ici, on ne peut le vérifier quantitativement, car pour cela il faudrait connaître la grandeur physique optimisée par la *sélection naturelle*, et être capable de la mesurer autrement que par le nombre de descendants. Quelle est cette grandeur ? En 1922, le statisticien américain Alfred Lotka conclut que la *sélection naturelle* maximise le flux d'énergie qui traverse une structure organique. Elle fonctionne, dit-il explicitement, comme une troisième loi de la thermodynamique.

21. Ludwig Boltzmann, « *Populare Schriften* ». Leipzig : J. A. Barth, 1905.

Cette affirmation est remarquable, car, en 1922, la loi de production maximale d'entropie ou MEP était encore inconnue. Les êtres vivants étant des *structures dissipatives*, MEP implique effectivement qu'ils maximisent le flux d'énergie qui les traverse (section 2.2). Vue sous ce jour, la *sélection naturelle* n'est plus une loi de la biologie, mais une loi de la physique. Cela signifie qu'on peut donner des exemples de *sélection naturelle* en physique. C'est bien le cas.

Considérons à nouveau une casserole d'eau que l'on met sur le feu. Tant que la différence de température de l'eau est faible entre le haut et le bas de la casserole, aucun mouvement n'apparaît. La chaleur se propage de bas en haut par *conduction* (de la même façon qu'elle se propage dans le manche de la casserole). Le flux de chaleur y est proportionnel à la différence de température.

Lorsqu'on augmente la différence de température, on atteint un seuil *critique* au-delà duquel des courants de *convection* apparaissent. Le flux de chaleur devient alors proportionnel au carré de la différence de température. Ainsi, en dessous du seuil le flux de chaleur le plus élevé est produit par la *conduction* ; au-delà du seuil, il est produit par la *convection*. Dans les deux cas, « la nature sélectionne » le processus qui produit le plus grand flux d'énergie. Il y a bien « *sélection naturelle* ».

5.4. Les gènes

Dans la publication de Darwin, une partie de sa théorie restait obscure, l'origine de ce qu'on appelle maintenant les fluctuations *génétiques*, c'est-à-dire l'origine de la diversité des individus. Celle-ci était constatée, mais non comprise. Darwin publia sa théorie en 1859. Six ans plus tard, le moine G. Mendel publiait son étude des lois de l'hérédité montrant l'origine de la diversité, mais cette étude resta longtemps méconnue. Ce n'est que trente-cinq ans plus tard que le travail de Mendel fut reconnu et ses résultats reproduits. Ils mettent en évidence des « facteurs d'hérédité » qu'on appellera plus tard les *gènes*. Une population d'individus dispose d'un grand nombre de *gènes* formant ce qu'on appelle une ressource *génétique*.

On sait maintenant que ces ressources proviennent de mutations aléatoires des *gènes*. Ces mutations sont rares et n'ont en général aucun effet discernable

sur les caractères d'une population. Chaque individu dispose d'une partie de ces ressources, mais seuls certains de ces *gènes* se traduisent en caractères observables. Les autres *gènes* pourront être transmis et, éventuellement, se traduire aussi en caractères observables. Lorsque par hasard leur effet est néfaste, les *gènes* concernés sont rapidement éliminés par la *sélection naturelle*. Ce n'est que lorsque leur effet s'avère favorable que ceux-ci sont transmis en plus grand nombre et finissent par s'imposer dans une population.

Le support des *gènes* fut rapidement identifié à des corpuscules appelés *chromosomes* qui apparaissent dans le noyau des cellules au moment de leur division, mais leur véritable nature ne sera connue qu'en 1953 lorsque F. Crick et J. Watson élucideront la structure des molécules d'ADN et son mécanisme de réplication. On sait maintenant que l'information contenue dans les *gènes* est codée dans l'ADN. L'évolution des espèces se résume donc à l'évolution d'une information codée. La *sélection naturelle* est le mécanisme par lequel cette information, codée dans les *gènes*, s'adapte à un changement d'environnement.

5.5. Le néodarwinisme

Pour les biologistes modernes, la *sélection naturelle* ne s'applique pas aux individus, mais aux *gènes*, par l'intermédiaire de leurs manifestations chez les individus. C'est ce qu'on appelle le néodarwinisme, théorie popularisée par le zoologiste R. Dawkins dans son livre « *Le Gène égoïste* ». Pour Dawkins, nous ne sommes qu'un « véhicule » construit par nos *gènes* pour assurer leur survie.

Sans le savoir, les biologistes ont découvert une propriété fondamentale des *structures dissipatives*. Comme nous l'avons vu (section 2.5), elles s'auto-organisent en mémorisant de l'information sur leur environnement. Elles mémorisent l'information qui leur permet de maximiser la production d'énergie libre. Il est donc clair que, du point de vue thermodynamique, le processus de *sélection naturelle* s'applique non pas aux structures elles-mêmes, mais à l'information qu'elles mémorisent. Dans le cas des plantes ou des animaux, elle s'applique donc aux *gènes*. Plus une espèce mémorise d'information, plus elle dissipe d'énergie. La dissipation d'énergie est directement liée à la diminution d'entropie du système, c'est-à-dire à l'information mémorisée.

Avec la vie, la nature a découvert un processus de réplication de l'information, c'est-à-dire un formidable processus de multiplication de l'énergie dissipée. Alors que l'énergie se conserve, l'information se réplique. Elle peut s'étendre et perdurer. Si vous donnez de l'énergie à quelqu'un, vous n'en disposez plus. Si vous lui donnez de l'information, vous en disposez encore. Un proverbe chinois dit que si vous donnez un poisson à quelqu'un, vous le nourrissez pour un jour. Si vous lui apprenez à pêcher, vous le nourrissez pour la vie. Cela montre comment la réplication de l'information crée des avalanches d'énergie dissipée. Elle est la clé de l'évolution.

6. La criticalité auto-organisée en biologie

Plus un organisme dissipe d'énergie, plus vite son environnement évolue, et plus vite il doit se réadapter. En favorisant les organismes qui s'adaptent plus vite que les autres, la *sélection naturelle* accélère l'évolution, provoquant des extinctions de masse. Des périodes d'évolution rapide alternent avec des périodes d'évolution lente. C'est le phénomène des *équilibres ponctués*, manifestation biologique du processus de *criticalité auto-organisée*.

6.1. L'effet de la reine rouge

Nous avons vu que l'évolution de l'Univers s'accélère (chapitre 4). C'est particulièrement le cas de l'évolution *génétique*. Nous avons vu que les organismes vivants maximisent la dissipation d'énergie en s'adaptant à leur environnement. Ils mémorisent de l'information sur leur environnement. Plus ils mémorisent d'information, plus ils dissipent d'énergie. Mais plus vite ils dissipent l'énergie, plus vite ils modifient leur environnement et plus vite ils doivent se réadapter. C'est ce qu'en *cybernétique* on appelle une *rétroaction* positive. Cette *rétroaction* a pour effet d'accélérer l'évolution de sorte que tout va de plus en plus vite.

Ce mécanisme s'applique à toutes les *structures dissipatives*. Le biologiste Leigh van Valen l'a découvert en 1973, dans le cas des espèces vivantes. Celles-ci se réadaptent grâce aux mutations. Mais la vitesse de mutation des *gènes* est limitée. Lorsqu'une espèce n'a plus le temps de s'adapter, elle s'éteint. Pour subsister, une espèce doit évoluer le plus vite possible. Leigh van Valen a appelé ce mécanisme l'effet de la *reine rouge*, en référence à l'œuvre de Lewis Carroll²² dans laquelle la *reine rouge* dit : « ici, il faut courir le plus vite possible pour rester sur place ». Leigh van Valen explique ainsi pourquoi, tout au long de l'évolution, des espèces s'éteignent.

22. Lewis Carroll, « *Alice au pays des merveilles* ». Tome 2 : « *De l'autre côté du miroir* ».

6.2. Les extinctions de masse

Ce phénomène a été mis en évidence par les paléontologues. L'extinction la mieux connue du public est celle des dinosaures. Celle-ci s'est produite il y a 65 millions d'années, c'est-à-dire à la fin de l'ère secondaire, appelée maintenant *mésozoïque*. Elle est considérée comme une extinction de masse, en ce sens que 75 % des espèces (50 % des genres) vivant à cette époque ont disparu en même temps. L'analyse des espèces disparues montre que cette extinction est due à un changement rapide de l'environnement, vraisemblablement occasionné par la chute d'un météorite dont les effets auraient été accentués par des éruptions volcaniques. Une caractéristique à noter de cet événement est que l'extinction a surtout frappé les plus gros organismes. La plupart des petits organismes, notamment les petits mammifères de l'époque, ont survécu.

Bien étudiée parce que relativement récente, cette extinction de masse est loin d'être la seule. Précédant celle-ci, quatre autres extinctions majeures ont été clairement identifiées. Toujours au *mésozoïque*, il y a 205 millions d'années, 48 % des genres ont disparu entre le *trias* et le *jurassique*. La plus grande extinction de masse a eu lieu il y a 251 millions d'années, entre le *permien* et le *trias* où 83 % des genres ont disparu, marquant la limite entre le *paléozoïque* (ère primaire) et le *mésozoïque* (ère secondaire). À la fin du *dévonien*, entre 360 et 375 millions d'années, une série d'extinctions successives ont provoqué la disparition de 50 % des genres. Enfin, entre 440 et 450 millions d'années, entre l'*ordovicien* et le *silurien*, deux extinctions successives ont provoqué la disparition de 57 % des genres.

Parmi les causes possibles de ces extinctions, on cite les éruptions volcaniques, les chutes de météores, les variations du niveau de la mer et les changements (réchauffement ou refroidissement) climatiques à l'échelle de la planète. Il est à noter que ces deux dernières causes sont actuellement invoquées comme menaçant l'espèce humaine. Vu ce qui a été dit plus haut (section 3.4.1), le lecteur comprendra que cesdites causes ne sont que les fluctuations aléatoires qui ont déclenché les avalanches d'extinction observées. Elles ne sont que le clou du fer à cheval qui a provoqué la perte du royaume.

6.3. Les équilibres ponctuels

Les extinctions de masse sont régulièrement suivies d'une floraison d'espèces nouvelles. Celles-ci occupent peu à peu les *niches écologiques* libérées par les espèces éteintes. La compétition entre les espèces est alors très intense. Certaines espèces dites prédatrices se développent aux dépens d'autres qu'elles prennent pour proies. Les proies tendent alors à disparaître. Se retrouvant sans ressources, les prédateurs tendent à disparaître à leur tour, ce qui permet aux proies de se multiplier à nouveau. L'environnement est alors très instable et les fluctuations de population importantes. Peu à peu l'environnement se stabilise. Les populations les mieux adaptées se développent aux dépens des autres et dominent l'évolution. Inévitablement, elles épuisent leurs ressources, ce qui les fragilise. Ayant de plus en plus de difficultés à subsister, elles deviennent les victimes de leur succès. À la moindre variation de leur environnement, elles s'éteignent, entraînant souvent avec elles d'autres extinctions. D'où un nouveau phénomène d'extinction de masse.

L'évolution des espèces n'est donc pas parfaitement continue comme certains biologistes le pensaient autrefois, mais plutôt discontinue. Elle est entrecoupée de phases d'expansion rapide, durant lesquelles une grande variété d'espèces nouvelles apparaissent, et de phases de stagnation, dites périodes de stase, interrompues par des extinctions brutales. Ce point de vue, largement confirmé par la *paléontologie*, a donné naissance à la théorie des *équilibres ponctuels* de Stephen Jay Gould et Niles Eldredge.

En 1993, Per Bak et Kim Sneppen ont montré que le phénomène des *équilibres ponctuels* est un processus de *criticalité auto-organisée*. Les extinctions de masse obéissent aux mêmes lois statistiques que les avalanches ou les tremblements de terre : l'importance des extinctions est inversement proportionnelle à leur fréquence.

6.4. Les sélections r et K

Les phénomènes décrits plus haut s'observent dans les écosystèmes où ils ont été étudiés par Robert MacArthur et Edward Osborne Wilson. Ils ont montré que la *sélection naturelle* pouvait agir de deux façons différentes. Lorsque

l'environnement est instable, elle favorise les individus les plus adaptables, c'est-à-dire les petits organismes qui se reproduisent très vite et se dispersent sur de longues distances. C'est la sélection r. Lorsque l'environnement est stable, la *sélection naturelle* favorise au contraire les individus les mieux adaptés, c'est-à-dire les gros organismes, ayant une vie longue et produisant un petit nombre de descendants qu'ils protègent soigneusement. C'est la sélection K.

Dans les écosystèmes, les deux types de stratégie s'observent à tout moment, mais dans des proportions variables. Certaines époques favorisent la sélection r tandis que d'autres favorisent la sélection K. Bien adaptés à un environnement particulier, les organismes favorisés par la sélection K sont très sensibles aux variations de l'environnement. C'est le cas des arbres. Lorsque le climat change, ceux-ci meurent en premier. Ils sont remplacés par la savane. Sur une échelle de temps beaucoup plus grande, les dinosaures ont laissé la place aux petits mammifères. Les mammifères ont évolué à leur tour pour produire des mamouths, aujourd'hui disparus. On observe ainsi une alternance entre une macroévolution lente dominée par la sélection K et une microévolution rapide dominée par la sélection r. L'analogie avec la macroévolution et la microévolution de Jantsch (section 4.4) est frappante. Nous retrouverons ce processus en sciences humaines.

Nous avons comparé ce processus à un algorithme de *recuit simulé* (section 4.5). La quantité d'information mémorisée dans les *gènes* s'accroît à chaque itération, donnant naissance à des organismes vivants de plus en plus complexes. On s'attend donc à ce qu'ils soient capables de dissiper l'énergie de plus en plus efficacement.

6.5. L'évolution du métabolisme

La figure 4 de la section 4 montre l'efficacité moyenne avec laquelle une plante ou un animal dissipe l'énergie en watts/kg. La figure 6 montre la puissance dissipée par les organismes vivants en fonction de leur masse. On constate qu'elle est proportionnelle à la puissance $3/4$ de leur masse. Cette relation, établie pour la première fois par Max Kleiber, porte le nom de loi de Kleiber. Cette loi de puissance paraît valable pour tous les êtres vivants, des plus petits aux plus grands. Elle montre qu'il y a bien invariance par *changement d'échelle*,

comme on peut s'y attendre d'une avalanche de *bifurcations* au *point critique* (section 3.2). Elle montre que les êtres vivants sont effectivement optimisés pour dissiper l'énergie.

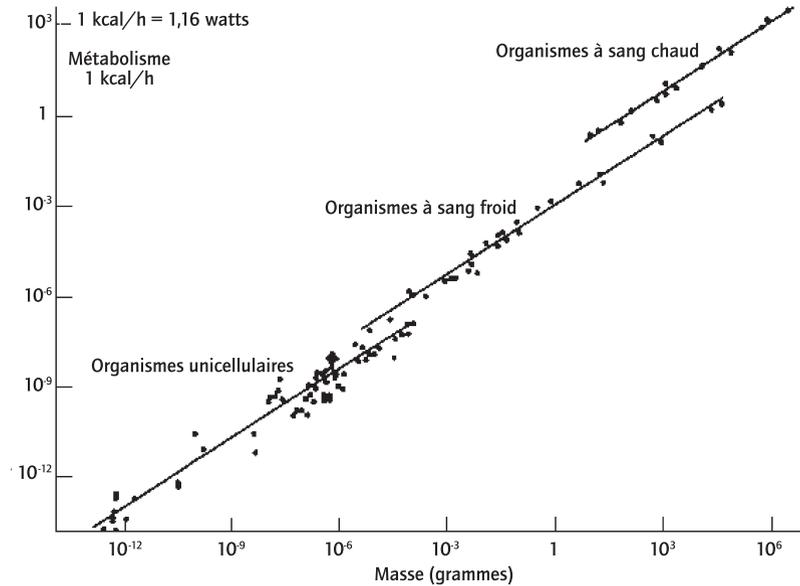


Figure 6. La loi de Kleiber (d'après Whitfield, 2006).

On constate aussi l'existence de trois facteurs différents pour les organismes unicellulaires, les organismes à sang froid et les organismes à sang chaud. Ceux-ci correspondant à des étapes successives de l'évolution, il y a bien amélioration des performances avec la complexité de la structure.

Les biologistes découvrent peu à peu que la *sélection naturelle* n'est pas le seul mécanisme par lequel la vie évolue. Alors que celle-ci implique une compétition entre les individus, il existe aussi un mécanisme de coopération. Ce mécanisme peut conduire à la *symbiose*. Nous allons maintenant l'examiner.

7. La coopération en biologie

Si les organismes ayant des *gènes* différents sont mis en compétition par la *sélection naturelle*, ceux qui ont des *gènes* identiques tendent à coopérer : c'est la sélection de parentèle. Elle permet la formation des sociétés d'insectes. Il arrive aussi que des organismes ayant des *gènes* différents coopèrent : c'est la symbiose. Tandis que coopération et compétition agissent en alternance sur les *gènes*, la coopération l'emporte peu à peu produisant des organismes de plus en plus complexes, dissipant l'énergie de plus en plus efficacement.

7.1. La sélection de parentèle

La *sélection naturelle* met les êtres vivants en compétition pour leur survie, c'est-à-dire pour l'obtention d'une source d'énergie, la nourriture. La compétition permet de sélectionner les individus dont les *gènes* sont le mieux adaptés à leur environnement. Ceux-ci se multiplient *exponentiellement*, entraînant une réplication rapidement prépondérante de l'information *génétique* correspondante. Mais cela entraîne aussi un épuisement rapide des ressources, d'où un changement de l'environnement qui va nécessiter une mise à jour de l'information mémorisée, d'où l'évolution des espèces.

C'est un processus sans fin. Tel que je l'ai décrit jusqu'ici, il est assez simple. Là où les choses se compliquent, c'est que la compétition n'est pas le seul processus permettant d'améliorer les chances de survie des individus. Il existe un autre processus qui s'appelle la coopération. Lorsque la nourriture se fait rare, les individus qui coopèrent ont bien plus de chances de survivre que les individus qui ne coopèrent pas. Longtemps mal comprise par les biologistes, la coopération a joué dans l'évolution *génétique* un rôle essentiel qu'il nous faut maintenant passer en revue.

Prenons l'exemple d'une abeille ayant trouvé une nouvelle source de nourriture. On pourrait s'attendre à ce qu'elle s'en nourrisse et garde cette découverte pour

elle afin d'en profiter égoïstement à l'avenir. Chacun sait qu'au contraire elle rentre à la ruche et, en effectuant une danse remarquable, communique immédiatement aux autres abeilles la direction et la distance de cette source. Pendant longtemps un tel comportement *altruiste* a intrigué les biologistes. Il semblait contraire aux règles de la *sélection naturelle* telles que les avait décrites Darwin.

On doit l'explication de ce phénomène au biologiste William D. Hamilton. En 1970, Hamilton et Price ont montré qu'entre les animaux, le degré d'altruisme est directement proportionnel aux nombres de *gènes* communs, un résultat qui a été ensuite repris, généralisé et popularisé par Edward Osborne Wilson. On sait que les abeilles d'une ruche ont toutes été engendrées par une même reine. Leur comportement *altruiste* s'explique ainsi par leurs *gènes* communs. Rarement une loi de la biologie a été aussi bien vérifiée expérimentalement, souvent même quantitativement. Les biologistes ont donné à ce comportement le nom de *sélection de parentèle* (en anglais : *Kin selection*).

Thermodynamiquement, ce résultat est évident. Nous avons vu que la production d'*énergie libre* est liée à l'information mémorisée. Dans le cas de *gènes* communs, la *sélection naturelle* ne s'applique plus aux individus, mais à l'ensemble des *gènes* communs à ces individus. Leur production d'*énergie libre* sera proportionnelle au nombre de *gènes* communs.

7.2. Exemple de l'amibe du terreau

On déduit de ce qui précède que le processus de *sélection de parentèle* est étroitement lié au mode de transmission des *gènes*. On sait que les bactéries se reproduisent par division cellulaire. Les *gènes* de la cellule fille sont identiques aux *gènes* de la cellule mère. On dit que la transmission des *gènes* est purement verticale. Des bactéries dont les *gènes* sont différents ont des descendants dont les *gènes* sont différents. Il n'y aura pas entre eux de *sélection de parentèle*.

Dans le cas des animaux évolués, la reproduction est sexuée, de sorte que des animaux dont les *gènes* sont différents peuvent avoir des descendants ayant des *gènes* communs. C'est le cas des frères ou des cousins. Il y aura des effets de *sélection de parentèle*, c'est-à-dire apparition de comportements *altruistes*, par exemple entre frères et sœurs.

L'amibe du terreau, appelée « *dictyostelium discoideum* », est un cas particulièrement intéressant, car celle-ci possède trois mécanismes différents de reproduction :

1. Lorsque leur nourriture est abondante, elles se reproduisent par division cellulaire comme les bactéries. La transmission de l'information est alors purement verticale sans échange horizontal. Ce mode de reproduction privilégie la compétition entre les descendants. Il n'y aura pas de sélection de parentèle.

2. Lorsque leur nourriture est moins abondante, elles se reproduisent par accouplement entre deux amibes. Il s'agit d'une reproduction sexuée entraînant un certain échange horizontal d'information. Cela entraînera des effets de *sélection de parentèle*.

3. Lorsque leur nourriture devient rare, elles émettent un signal de détresse sous la forme d'une molécule appelée adénosine monophosphate cyclique ou AMPc. Imité par les amibes voisines, cet appel s'étend rapidement à toute la *colonie*. À ce signal, les amibes se rassemblent toutes pour former un organisme multicellulaire qui prend l'aspect d'une limace. Solidaires les unes des autres, les dix à cent mille cellules qui forment cette limace coordonnent alors leurs efforts. La limace rampe vers la lumière. À la limite de l'épuisement, la limace s'arrête et se redresse. Ses cellules se différencient, formant une longue tige, appelée pédicelle, au bout de laquelle se gonfle une capsule de spores. Alors que la limace meurt, la capsule éclate et les spores se dispersent, donnant naissance à de nouvelles amibes dans un environnement que la limace « espère » meilleur. Dans ce cas, toutes les ressources *génétiques* sont mises en commun, maximisant la coopération entre les descendants, donc le phénomène de *sélection de parentèle*.

En 1975, Wilson prédit que la longueur du pédicelle devait être proportionnelle au nombre de *gènes* communs des amibes de la *colonie*. En effet, plus leur proximité *génétique* est grande, plus il devrait y avoir d'amibes prêtes à se sacrifier, par altruisme, pour les membres de la capsule. Cette prédiction a été vérifiée expérimentalement en 1990, avec un mélange de deux cultures d'amibes. Le rapport de la longueur du pédicelle au diamètre de la capsule varie effectivement en proportion du nombre de *gènes* communs.

Ce processus de mise en commun des ressources *génétiques* chez les amibes est vraisemblablement analogue à celui qui a conduit à l'apparition des premiers organismes multicellulaires, il y a plus d'un milliard d'années. Chez ces organismes, toutes les cellules partagent en commun la même information *génétique*. Elles coopèrent étroitement entre elles pour assurer la survie de l'individu. Elles ont cependant chacune des tâches très spécialisées. Cela est possible parce qu'une partie seulement de leurs *gènes* est « exprimée » : celle qui correspond à leur spécialisation.

7.3. Adaptation et adaptabilité

Nous avons vu plus haut que la coopération peut être plus efficace que la compétition pour assurer la survie des individus. Pourtant l'évolution darwinienne repose sur la *sélection naturelle* qui, elle-même, implique une compétition entre les individus. Comment se fait-il qu'on puisse observer à la fois compétition et coopération dans une même population ? La raison profonde est liée à la différence entre adaptation et adaptabilité, différence à laquelle j'ai déjà fait allusion à propos des *sélections r et K*. La coopération suppose un long et laborieux effort d'auto-organisation entre les individus d'une même société. Cet effort favorise l'adaptation de ce groupe d'individus à un environnement donné. Mais dès que l'environnement change, ces efforts sont mis en péril. Au contraire, la compétition favorise l'adaptabilité. La *sélection naturelle* choisit directement les individus les plus adaptés à l'environnement actuel parmi la grande biodiversité des individus en présence. Dès que l'environnement change, il lui suffit d'en choisir d'autres, maintenus en réserve.

On comprend ainsi mieux les choix de reproduction chez l'amibe du terreau (*dictyostelium discoideum*). Lorsque la nourriture est rare, la population stagne et l'environnement reste stable. Pour arriver à progresser, nos amibes choisissent une politique de solidarité : elles s'auto-organisent en mettant toutes leurs ressources *génétiques* en commun et coopèrent afin de s'adapter au mieux à la situation actuelle. Par contre, lorsque la nourriture est abondante, la population augmente *exponentiellement*, entraînant une évolution rapide de l'environnement. Pour faire face à cette évolution rapide, nos amibes choisissent une politique individualiste : la division cellulaire. Chacun garde son héritage *génétique*, mais tous ces héritages sont

en compétition. La *sélection naturelle* choisira parmi eux, ceux qui sont les mieux adaptés à la nouvelle situation.

Il peut sembler paradoxal d'associer la division cellulaire ou *clonage* à une variabilité *génétique*, mais il faut prendre garde de bien distinguer l'individu et le groupe. Les effets de la transmission sur eux sont opposés. Si le *clonage* maintient la variabilité des *gènes* à l'intérieur d'un groupe, il s'oppose par contre à leur variation entre un même individu et ses descendants. Ainsi il favorise l'adaptabilité du groupe aux dépens de celle de l'individu. Par contre, en favorisant la coopération, les échanges de *gènes* entre individus favorisent l'adaptabilité de l'individu, mais pas celle du groupe.

On peut raisonner de même pour les taux de mutations. Un taux de mutations rapide favorise l'adaptabilité de l'individu, mais pas celle du groupe. Un groupe ne peut s'organiser que si ses composants (les individus) sont stables (fiabiles). En stabilisant les individus, un taux de mutations lent favorise l'adaptabilité du groupe aux dépens de celle de l'individu.

7.4. La symbiose en biologie

On peut représenter les différentes phases d'évolution d'un groupe d'individus dans ce que les physiciens appellent un *espace des phases* à deux dimensions (figure 7). Chaque stade de l'évolution y est représenté par un point ayant pour coordonnées d'une part l'état du groupe, caractérisé par le pourcentage de *gènes* communs entre ses individus et porté ici en ordonnées, d'autre part sa vitesse d'évolution caractérisée par le taux de mutations de ses individus et porté ici en abscisse. On peut identifier dans ce plan quatre régions (quadrants) correspondant à quatre états d'évolution différents.

À l'origine de la vie, le mode de reproduction était la division cellulaire ou *clonage*. Lorsque les différentes cellules ont des *gènes* différents, le *clonage* maintient la différence. L'évolution est possible grâce aux mutations. La sélection naturelle favorisant les cellules les mieux adaptées à l'environnement, le mode de fonctionnement est le mode original décrit par Darwin et matérialisé par un point dans le quadrant marqué « Compétition » de la figure 7.

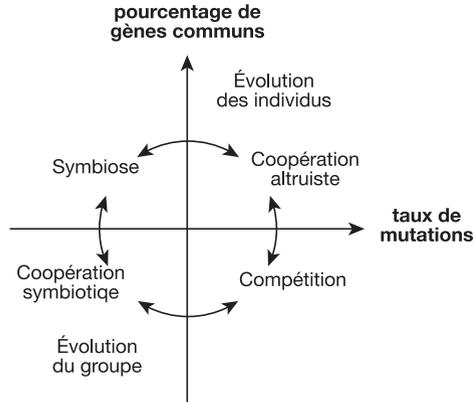


Figure 7. Mécanismes d'adaptation à l'environnement.

Pendant longtemps les biologistes se sont interrogés sur l'avantage sélectif de la reproduction sexuée. Au premier abord celle-ci apparaît comme un handicap puisqu'elle nécessite la rencontre incertaine de plusieurs individus (généralement deux) pour produire un seul descendant. Aujourd'hui les biologistes sont d'accord pour dire que l'avantage sélectif est un facteur d'adaptabilité des individus à un environnement variable. Autrement dit la reproduction sexuée jouerait un rôle analogue aux mutations.

Lorsqu'il y a reproduction sexuée, le nombre de *gènes* communs augmente. On passe au quadrant dénommé « Évolution des individus ». Celle-ci est doublement assurée par les mutations et le mode de reproduction. On a vu toutefois que la reproduction sexuée entraînait le processus de *sélection de parentèle*, impliquant la possibilité d'une *coopération altruiste* entre des individus porteurs de *gènes* semblables. La reproduction sexuée conduit ainsi au stade « *Coopération altruiste* ».

Grâce au partage des tâches, la coopération permet d'accroître le taux de dissipation de l'énergie. Toute coopération est cependant lente à s'établir (voir partie IV). Elle ne peut s'établir complètement que si le taux de mutations est suffisamment faible pour maintenir l'identité des *gènes* communs responsables de la coopération. Dans ce cas, on peut atteindre le stade : « *Symbiose* ». Nous verrons que celle-ci implique une mise en commun des *gènes* qui se reproduisent alors de concert.

La figure 7 montre que la *symbiose* peut être atteinte par une voie différente. Lorsque le *clonage* maintient les différences entre les individus, un accroissement de la dissipation d'énergie peut encore être obtenu par coopération entre des individus ayant des *gènes* différents. On sait que cela est possible. Un exemple classique est le lichen qui associe une algue unicellulaire et un champignon. Dans ce cas l'évolution ne se fait plus au niveau de l'individu, mais au niveau du groupe. De nouvelles coopérations peuvent s'établir à travers de nouveaux choix d'individus. Sur la figure 7, ce stade d'évolution est appelé « *Coopération symbiotique* ».

7.5. Le mécanisme général

Les quatre modes d'évolution de la figure 7 sont très généraux. L'évolution peut ainsi se faire soit par modification *génétique* des individus, soit par modification de la composition des groupes. Agissant sur l'information mémorisée dans les *gènes*, la *sélection naturelle* agit aussi bien au niveau du groupe qu'à celui de l'individu. Les quatre modes d'évolution s'appliquent aussi bien aux *génomés*, considérés comme des *gènes* coopérant entre eux, qu'aux organismes multicellulaires considérés comme une *symbiose* de cellules. Dans ce dernier cas, on retrouve les modes d'évolution des écosystèmes, la compétition correspondant à la sélection r et la *symbiose* correspondant à la sélection K. Nous retrouverons ces modes d'évolution dans les sociétés humaines.

Le choix entre ces quatre modes d'évolution dépend lui-même de l'évolution de l'environnement. La coopération ne peut se développer que dans un environnement stable, mais en augmentant le taux de production d'*énergie libre* (section 7.1) elle tend à rendre l'environnement instable. Au contraire, en favorisant l'adaptabilité, la compétition peut se développer dans un environnement instable (section 7.3), mais, moins apte que la coopération à accroître la production d'*énergie libre*, elle conduit rapidement à un épuisement des ressources qui tend à stabiliser l'environnement. Le point représentatif va donc errer dans le plan de la figure 7, oscillant entre la *symbiose* et la compétition, faisant évoluer tantôt les groupes tantôt les individus.

Ce comportement, modélisé par la roue de la section 18.4, est typique des *attracteurs étranges* en dynamique non-linéaire (section 3.3). L'*attracteur* est ici le

point central dit *critique*. Ce comportement engendre les fluctuations en $1/f$ du processus de *criticalité auto-organisée* avec formation lente de macrostructures suivie d'une redécomposition rapide en structures plus petites de sorte que l'état de *symbiose* est rarement atteint. Celle-ci ne s'achève en général qu'après de nombreuses itérations de l'algorithme de *recuit simulé* (section 4.5).

Thermodynamiquement, la formation d'un nouvel organisme par *symbiose* de deux organismes différents est possible s'ils dissipent plus d'énergie ensemble que séparément. Les deux organismes évoluent alors au point où ils ne peuvent plus survivre l'un sans l'autre. Le phénomène s'apparente à la formation lente de monocristaux par *recuit* tel que je l'ai décrit à la section 4.5. Il est dans la lignée de l'évolution de l'Univers telle qu'elle est décrite sur la figure 5.

Cet algorithme d'optimisation prend un nouvel aspect en biologie. Lorsqu'il y a compétition, la *sélection naturelle* agit sur les individus. Lorsqu'il y a coopération, elle agit sur les groupes. Elle tend ainsi à alterner l'optimisation de la dissipation d'énergie du tout et celle des parties. Combinant plusieurs méthodes d'optimisation différentes, l'évolution biologique est particulièrement efficace à accroître la dissipation de l'énergie. De fait, mathématiciens et ingénieurs ont développé des algorithmes d'optimisation dits « *génétiques* » qui s'inspirent largement de l'évolution biologique.

Bien que jamais observée au laboratoire, la formation de nouveaux organismes par *coopération symbiotique* paraît thermodynamiquement hautement probable. Longtemps négligé par les biologistes, ce mode d'évolution semble maintenant reconnu, notamment à la suite des travaux de la biologiste Lynn Margulis. Elle a en particulier émis l'hypothèse que les cellules *eucaryotes* (cellules à noyau comme celles dont nous sommes constitués) seraient le produit d'une *coopération symbiotique* entre des *procaryotes* (cellules primitives sans noyau comme celles des bactéries) de nature différente. Les analyses d'ADN ont confirmé en grande partie cette hypothèse.

On peut tenter de comparer l'évolution telle que je l'ai décrite à la résolution d'un puzzle. On cherche généralement à assembler d'abord des pièces de couleurs voisines, celles-ci ayant de bonnes chances d'appartenir à une même région du puzzle. C'est l'équivalent de la *sélection de parentèle*. Il arrive également que deux pièces de couleurs très différentes s'assemblent. C'est la

coopération symbiotique, mais elle est assez rare. On finit en général par assembler de grands ensembles ayant chacun leur couleur propre. On retrouve ce type de coopération dans les éco-systèmes ou à l'intérieur des organismes multicellulaires. On le retrouvera dans les sociétés humaines.

8. Un panorama de l'évolution génétique

À l'origine, des cycles chimiques se seraient formés, dissipant l'énergie de plus en plus efficacement. La vie serait apparue lorsque, produisant leurs propres *catalyseurs* (*enzymes*), des cycles dits *autocatalytiques* se sont reproduits. Protégés à l'intérieur d'une bulle d'acide gras, ces cycles auraient donné naissance aux premières cellules *procaryotes* (bactéries). Des *symbioses* de *procaryotes* auraient plus tard donné naissance aux cellules *eucaryotes*. Celles-ci auraient ensuite formé des organismes multicellulaires sous forme de plantes, de champignons ou d'animaux.

8.1. L'origine de la vie

Le processus selon lequel la vie est apparue sur Terre est encore largement débattu. De nombreuses incertitudes subsistent. Il est clair cependant que ce processus suit les lois générales de l'évolution décrites dans la première partie, en particulier les lois de la thermodynamique hors équilibre.

Nous avons vu que les êtres vivants sont des *structures dissipatives*. Tandis que les courants de *convection* dans une casserole produisent de l'*énergie libre* par un moyen physique, une caractéristique commune à tous les êtres vivants est de faire la même chose au moyen d'un ensemble de réactions chimiques appelé *métabolisme*. On peut se demander si cette caractéristique est propre à la vie. Elle ne l'est pas.

Une *structure dissipative* produit de l'*énergie libre* tout en restant identique à elle-même. Cela veut dire que ni matière ni énergie ne peuvent s'y accumuler. Cela n'est possible que si la matière de la structure est constamment recyclée. C'est ce que font toutes les machines thermiques (machine à vapeur ou moteur de voiture). Elles opèrent suivant des cycles. Les courants de *convection* sont des cycles de matière. Le mot « cyclone » indique bien la nature cyclique du phénomène. Chez les êtres vivants, les réactions chimiques sont

cycliques. Dans les années 50, le chimiste russe Belousov s'est demandé s'il était possible de produire des réactions chimiques cycliques en dehors de la vie. Il a montré que c'était possible. Dans les réactions dites de Belousov et Zhabotinsky, la concentration des réactants oscille périodiquement de façon spectaculaire. Ces réactions sont l'équivalent d'un *métabolisme* en biochimie.

Une autre caractéristique commune à tous les êtres vivants est un mécanisme de reproduction. Les cycles de réactions chimiques des êtres vivants sont capables de s'auto-reproduire, donc de se multiplier, provoquant une croissance *exponentielle* de la dissipation d'énergie. Cette caractéristique est propre aux êtres vivants. Physiciens et biologistes se sont demandé laquelle des deux caractéristiques (*métabolisme* ou reproduction) est apparue la première. Les réactions de Belousov et Zhabotinsky montrent que le *métabolisme* n'est pas le propre des êtres vivants. La reproduction l'est. Logiquement le métabolisme doit donc apparaître en premier. Les êtres vivants apparaissent ainsi comme des *structures dissipatives* physico-chimiques capables de s'auto-reproduire.

Une *structure dissipative* n'apparaît que dans un milieu hors-équilibre, généralement en présence de différences de température. Ces différences de température sont ainsi des sources d'*énergie libre*. Sur Terre, il y a deux sources principales d'énergie : l'énergie solaire et l'énergie géothermique. De nos jours, la vie dissipe essentiellement l'énergie solaire grâce à un mécanisme appelé *photosynthèse*. On a donc pensé pendant longtemps que la vie était apparue sur Terre pour dissiper l'énergie solaire. La découverte surprenante de la vie sous-marine au voisinage des sources hydrothermales a introduit l'idée qu'elles pourraient être à l'origine de la vie. Ne nécessitant pas la *photosynthèse*, ces sources permettent l'apparition de *structures dissipatives* physico-chimiques plus simples. Elles apportent aussi sans cesse de la matière nouvelle comme l'hydrogène sulfuré ou le gaz ammoniac qui interviennent dans de nombreux *métabolismes* bactériens.

À la manière d'une casserole d'eau sur le feu, l'énergie des sources hydrothermales se dissipe par *convection*. L'énergie moyenne transportée par une molécule est la même pour chacun de ses degrés de liberté²³. Elle croît donc comme

23. Elle vaut $kT/2$ par degré de liberté où T est la température absolue et k la constante de Boltzmann.

le nombre de degrés de liberté. La loi de production maximale d'*entropie* va donc favoriser la formation de molécules complexes à un grand nombre de degrés de liberté, celles-ci transportant plus d'énergie que les autres.

À l'équilibre thermodynamique, les réactions chimiques se font dans les deux sens. Il y a autant de molécules qui s'assemblent que de molécules qui se désassemblent. Due au déséquilibre thermodynamique, la *convection* permet d'éloigner rapidement les molécules nouvellement formées avant qu'elles ne se désassemblent, favorisant la production continue de molécules. Celles-ci sont transportées vers des régions plus froides. Elles peuvent alors se déposer sur des minéraux dont certains facilitent les réactions chimiques. Ce sont des *catalyseurs*.

Les mouvements convectifs étant cycliques, ils favorisent le recyclage des produits de ces réactions. Ceux-ci reviennent au point de départ où ils sont réutilisés. Des cycles chimiques peuvent ainsi prendre naissance, accroissant la dissipation d'énergie due à la *convection*. Ils sont l'analogue chimique des cycles de la machine à vapeur étudiée par Carnot. Une première forme de *métabolisme* pourrait être apparue ainsi.

Les molécules des *catalyseurs* se retrouvent identiques à elles-mêmes à la fin d'un cycle de réactions chimiques. En facilitant les réactions chimiques, ces molécules facilitent la dissipation d'énergie. La loi de production maximale d'*entropie* va donc favoriser la production de *catalyseurs* organiques. Les biologistes leur donnent le nom d'*enzymes*.

Il a pu se produire qu'un ensemble de cycles chimiques fabrique tous les *enzymes* nécessaires à son fonctionnement. Cet ensemble de cycles devient alors capable de s'auto-reproduire. On dit qu'il est *autocatalytique*. Le phénomène de reproduction serait apparu ainsi. Il n'est efficace que si les *enzymes* ne se dispersent pas dans la nature, mais fonctionnent tous ensemble.

Parmi les molécules organiques ainsi formées se seraient trouvés des acides gras. Ceux-ci ont la propriété de former des membranes semblables à celles des bulles de savon. Ces membranes sont semi-perméables. Elles laissent passer les petites molécules nécessaires à la production de matière organique, mais ne laissent pas sortir les grosses molécules qui se forment à l'intérieur.

Lorsqu'un ensemble *autocatalytique* se trouve enfermé dans une telle bulle, il va pouvoir se reproduire sans que les *enzymes* se dispersent. Ayant besoin de moins d'apports matériels, les surfaces ont la propriété de s'étendre plus vite que les volumes. La bulle va alors s'aplatir et se scinder en deux. C'est le mécanisme de reproduction des bactéries. Certains *enzymes* risquent cependant de manquer dans chacune des deux parties. Cherchant toujours à maximiser la production d'*entropie*, l'évolution va favoriser les *enzymes* capables de s'attacher les uns au bout des autres et de se reproduire ainsi. On les retrouvera alors au complet dans chacune des deux cellules filles.

Voilà en gros comment on peut imaginer la série d'événements qui a conduit à l'acide ribonucléique ou *ARN*. Cet acide permet la synthèse des protéines nécessaires à la vie. Il mémorise l'information correspondante, mais, réactive chimiquement, cette mémoire n'est pas fiable. C'est pourquoi la vie garde en réserve une version plus stable de cette mémoire sous forme d'*ADN* (acide désoxyribonucléique).

Pendant longtemps la vie a été un mystère parce que la probabilité pour que des réactions chimiques au hasard produisent de l'*ARN* est si faible que l'âge de l'Univers ne suffirait pas à le faire apparaître. La 3^e loi de la thermodynamique implique que ces réactions chimiques n'ont pas eu lieu au hasard. À chaque étape ces réactions ont été systématiquement sélectionnées pour maximiser la production d'*entropie*. La *sélection naturelle* s'applique à la physique et à la chimie comme elle s'applique aux êtres vivants. La 3^e loi de la thermodynamique rend l'apparition de la vie non seulement possible, mais hautement probable toutes les fois que les conditions sont favorables.

8.2. L'évolution des procaryotes

Les premiers êtres vivants ont été des cellules sans noyau, semblables à ce que je viens de décrire. Ce sont les ancêtres de nos bactéries actuelles. Parce que leurs cellules n'ont pas de noyau, on les appelle des *procaryotes*. Ils seraient apparus il y a près de 4 milliards d'années soit 500 millions d'années seulement après la formation de la Terre. Toutes les bactéries contiennent un *chromosome* unique, support d'une molécule d'*ADN* de forme circulaire. Elles ont cependant une très grande variabilité *génétique*. On a maintenant identifié une

vingtaine de *métabolismes* différents chez les bactéries, chacun adapté à une source d'énergie particulière.

Dans tous les cas, l'énergie est emmagasinée, transportée et distribuée par une même molécule, l'adénosine triphosphate ou *ATP*, une propriété commune à tous les êtres vivants. On sait que l'adénine est une des bases du code *génétique*. Elle forme aussi l'adénosine de l'*ATP*. La chimie du vivant montre bien à quel point la dissipation d'énergie et la mémorisation d'informations sont étroitement liées.

On distingue les bactéries *hétérotrophes* qui vivent d'autres êtres vivants, des bactéries *autotrophes* qui se contentent de ressources minérales. Les premières bactéries étaient nécessairement *autotrophes*. Celles nées des profondeurs de l'océan feraient partie des bactéries *chimioautotrophes* dont le *métabolisme* utilise l'hydrogène sulfuré ou le gaz ammoniac. Seraient apparues ensuite les bactéries *photoautotrophes*, capables d'obtenir de l'énergie du rayonnement solaire. C'est le cas des bactéries pourpres sulfureuses qui utilisent l'énergie solaire pour combiner directement l'hydrogène sulfuré au dioxyde de carbone. Elles obtiennent ainsi des glucides (sucres) en libérant du soufre.

Il y a environ 3,8 milliards d'années sont apparues les cyanobactéries ou algues bleues capables de réaliser la réaction précédente en remplaçant l'hydrogène sulfuré par de l'eau. Ce faisant elles libèrent de l'oxygène à la place du soufre. On retrouve la trace de leurs *colonies* dans des formations calcaires appelées *stromatolites*. Certaines datent de 3,5 milliards d'années. L'oxygène ainsi libéré a d'abord été rapidement absorbé par le fer métallique alors abondant sur terre. Le fer rouille laissant des bandes rouges dans certains sédiments. Mais bientôt l'oxygène se répand dans l'atmosphère, mettant en danger les autres formes de vie existantes. L'oxygène est en effet très actif chimiquement. Il oxyde (brûle lentement) la matière organique. C'est comme si de nos jours l'atmosphère se remplissait de chlore. Que ferions-nous ?

Pour beaucoup de *procaryotes*, la situation a dû être dramatique. L'air devenant de plus en plus pollué, ils ont dû s'en protéger. Certains (les *anaérobies*) se sont réfugiés dans la vase au fond de l'eau. D'autres (les *aérobies*) se sont débarassés de l'oxygène en brûlant leurs déchets organiques, découvrant ainsi une nouvelle source d'énergie. Celle-ci devint vite populaire. Les bactéries

bétérotrophes se développant rapidement, le taux de production d'*entropie* fit un nouveau bond en avant à la surface de notre planète.

Il y a environ 1,5 milliard d'années, le pourcentage d'oxygène dans l'air se stabilisa aux alentours de sa valeur actuelle (20 %). C'est la limite au-delà de laquelle la matière organique devient trop inflammable. Le rayonnement ultraviolet solaire fut arrêté grâce à la transformation de l'oxygène de la haute atmosphère en ozone. La vie a pu se poursuivre en dehors de l'eau.

Ce développement soulève un certain nombre de questions. Durant la période considérée, le rayonnement solaire a augmenté de 10 %. Comment se fait-il que la température de la Terre soit restée constamment propice au développement de la vie ? Pourquoi non seulement l'oxygène de l'air n'a-t-il pas détruit la vie, mais en a accéléré le développement ? Pourquoi son pourcentage s'est-il stabilisé au niveau le plus propice à ce développement ? La réponse à ces questions tient dans la 3^e loi de la thermodynamique. La *biosphère* a chaque fois réagi de façon à maximiser son taux de production d'*entropie*. Accroître le développement de la vie s'est avéré en être le moyen le plus efficace.

8.3. Les colonies de bactéries

Les bactéries actuelles sont des cellules *procaryotes*. Elles se reproduisent par division cellulaire. Il s'en suit que les bactéries ont exactement les mêmes *gènes* que leur unique géniteur. À cause des mutations, elles n'ont cependant pas les mêmes gènes que leurs voisines, avec lesquelles elles sont en compétition. La *sélection naturelle* favorise celles dont les *gènes* sont le mieux adaptés à l'environnement, mais, lorsque ce dernier varie trop vite, les *gènes* n'ont pas le temps d'évoluer. Les bactéries risquent alors de disparaître. Si, par hasard, une bactérie trouve un moyen de s'en sortir, il est bon, pour les bactéries dans leur ensemble, que d'autres bactéries puissent en profiter.

C'est sans doute la raison pour laquelle l'évolution a favorisé le développement de mécanismes d'échanges de *gènes* entre les bactéries. On en distingue trois, la *transduction*, la *transformation* et la *conjugaison*. La transduction est un mécanisme accidentel d'origine virale, la *transformation* est le mécanisme le plus courant, la *conjugaison* est un mécanisme spécial dont je reparlerai plus loin.

Grâce à ces mécanismes, les bactéries peuvent acquérir de grands ensembles de *gènes* communs. Les bactéries qui partagent ces *gènes* en commun forment ce qu'on appelle une « souche ». Les bactéries d'une même souche ont tendance à se rassembler en sociétés appelées *colonies*. Les bactéries membres d'une même *colonie* coopèrent entre elles comme les membres d'une même famille. C'est le processus de sélection de parentèle décrit plus haut (section 7.1).

Les *colonies* de bactéries ont beaucoup de points communs avec les sociétés humaines. Elles peuvent contenir dix à cent milliards d'individus. À l'intérieur d'une même *colonie*, les bactéries échangent de l'information sous forme de molécules organiques (comme le font les amibes décrites à la section 7.2). Ce mode de communication a donné chez nous le goût et l'odorat. Les bactéries d'une même *colonie* ont un langage commun formé d'un large répertoire d'agents biochimiques.

Ce langage leur permet de coopérer entre elles et de s'organiser pour faire face à des conditions adverses. Selon Eshel Ben Jacob, il leur permet de recueillir, d'interpréter et d'échanger de l'information sur leur environnement. Elles mémorisent cette information collectivement. Cette faculté d'acquérir des connaissances communes leur permet de partager une même expérience. Nous verrons que ce processus d'apprentissage est très semblable à celui d'un cerveau. On peut donc parler d'intelligence collective ou sociale (section 9.2).

Les bactéries d'une même *colonie* peuvent avoir entre elles un comportement *altruiste*. Lorsque l'une d'entre elles découvre une nouvelle source de nourriture, elle communique l'information aux autres. Cette faculté a amené des bactéries, comme la myxobactérie, à développer des stratégies pour décourager les bactéries frauduleuses, c'est-à-dire celles qui profiteraient indûment de l'effort collectif. Dans ce cas elles isolent les bactéries frauduleuses en modifiant leur identité collective grâce à l'expression d'un nouveau *gène*. Elles génèrent ainsi un nouveau « dialecte » que les fraudeurs ne savent pas interpréter.

Certaines *colonies* peuvent développer la production, parfois coûteuse en énergie, de molécules qui peuvent être des poisons pour les bactéries d'une autre *colonie*, c'est-à-dire des molécules ayant un caractère antibiotique. Deux *colonies* de bactéries peuvent ainsi s'affronter.

Des bactéries de *colonies* différentes, comme celles de la plaque dentaire, peuvent aussi former des écosystèmes à l'intérieur desquels une collaboration s'établit. Chaque *colonie* développe sa propre expertise, dont bénéficie toute la communauté. Une bactérie d'une souche résistante à un antibiotique émet un signal pour le faire savoir. Parfois, après un échange de relations ressemblant à une parade nuptiale, elle offre son expertise à une bactérie d'une autre *colonie*. Elle lui transfère alors le *gène* qui lui confère cette immunité par le processus de *conjugaison*. C'est ce mécanisme qu'utilisent les bactéries pour développer leur résistance collective aux antibiotiques.

Il apparaît maintenant qu'en présence d'antibiotiques, les bactéries modifient leur organisation sociale de façon à maximiser leur chance de survie. Elles gardent collectivement en mémoire la manière dont elles ont précédemment réagi aux antibiotiques de façon à apprendre par expérience. Apparemment, les bactéries sont capables d'acquérir une résistance aux antibiotiques plus rapidement que nous en développons de nouveaux. Selon Eshel Ben Jacob, il se pourrait que, durant ces cinquante dernières années, notre usage immodéré des antibiotiques ait pu considérablement contribuer au développement de l'intelligence sociale des bactéries.

8.4. Des procaryotes aux eucaryotes

Pendant deux milliards d'années, les *gènes* ont, selon l'expression de Dawkins, fabriqué une multitude de « véhicules » pour assurer leur survie : les *procaryotes*. Chaque type de procaryote contient une association particulière de *gènes*, appelée *génome*. À l'intérieur d'un même *génome*, les *gènes* collaborent pour leur survie. De morphologie assez semblable, les *procaryotes* ont une très grande variété de *génomes* différents. Les *génomes* allaient à leur tour collaborer pour leur survie en fabriquant des « véhicules » plus élaborés : les *eucaryotes*.

Les premières cellules à noyau dites *eucaryotes* seraient apparues il y a deux milliards d'années. L'oxygène envahissait alors l'atmosphère terrestre. Selon Lynn Margulis et ses collaborateurs, le premier *eucaryote* serait né d'une *symbiose* entre une *archéobactérie* transformant le soufre en hydrogène sulfuré et une *eubactérie* transformant l'hydrogène sulfuré en soufre. On a là un parfait exemple de deux réactions chimiques opposées dont l'union forme un

nouveau cycle producteur d'énergie libre, c'est-à-dire une *structure dissipative*. Chacune vivant des déchets de l'autre, ces deux types de bactéries se seraient unis pour former un nouveau *métabolisme*, mais pas nécessairement d'un nouvel être vivant.

Un être vivant est caractérisé à la fois par son *métabolisme* et par son mode de reproduction. À ce stade, les deux bactéries ne forment qu'une *coopération symbiotique*. Tant qu'elles se reproduisent séparément, elles peuvent évoluer indépendamment l'une de l'autre, au risque de rompre la collaboration. Une véritable *symbiose* implique une mise en commun de leurs *chromosomes* avec répllication simultanée des deux *génomés*. De *symbiotique* la coopération devient alors aussi *altruiste*. Cela implique le développement d'un nouveau moyen de reproduction capable de répliquer plusieurs *chromosomes* à la fois. Ce nouveau moyen porte le nom de *mitose*. De circulaire, les *chromosomes* sont devenus linéaires. Une fois ces transformations accomplies, la *symbiose* est devenue totale.

Tandis que les cellules *procaryotes* sont entourées d'une paroi cellulaire rigide, les cellules *eucaryotes* n'ont qu'une membrane souple. Cela facilite les échanges avec l'extérieur. Une cellule *eucaryote* est un système thermodynamique largement ouvert. Seul le noyau qui contient le matériel *génétique* est protégé par une enveloppe. Le reste de la cellule est consolidé par un *cytosquelette*. Il était important d'isoler le matériel *génétique* dans un environnement stable, toute évolution des *génomés* pouvant déstabiliser la coopération. Nous avons vu en effet qu'une *symbiose* n'est possible que dans un environnement stable (section 7.4). Tandis que les *procaryotes* évoluent par acquisition de nouveaux *gènes*, les *eucaryotes* évoluent, semble-t-il, par acquisition de nouveaux *génomés*.

La plupart des cellules *eucaryotes* contiennent, en dehors du noyau, des inclusions appelées *organites* (parfois *organelles*). Parmi celles-ci se trouvent les *mitochondries*. C'est là qu'est emmagasinée sous forme d'ATP l'énergie nécessaire au fonctionnement de la cellule. Selon la théorie *endosymbiotique* de l'évolution, la présence des *mitochondries* serait le résultat d'une nouvelle *symbiose* avec une bactérie (protéobactérie). L'absence de paroi cellulaire permet à une cellule *eucaryote* de « phagocyter » une particule étrangère. Elle enrobe la particule jusqu'à ce que celle-ci devienne une inclusion. La particule peut ensuite être

digérée. Dans le cas qui nous intéresse, la protéobactérie n'aurait pas été digérée. Elle serait entrée en *symbiose* avec la cellule prédatrice, entraînant un échange partiel d'ADN. On sait en effet que les *mitochondries* conservent un reste d'ADN de type bactériel. Un phénomène similaire se serait produit pour les *chloroplastes*, *organites* qui confèrent à certaines cellules *eucaryotes* la possibilité de capter la lumière et d'obtenir de l'énergie par *photosynthèse*. C'est le cas par exemple des cellules végétales.

Le mécanisme ayant permis à un ensemble de bactéries de s'associer pour former une cellule *eucaryote* unique est difficile à reconstituer. Une analogie frappe l'imagination. L'auto-organisation d'un ensemble de bactéries différentes pour former une cellule vivante unique rappelle un peu celle d'une ville. Comme les villes, les cellules *eucaryotes* ont des dimensions très variables. Elles peuvent varier d'un facteur mille. On peut émettre ici une conjecture. La distribution des tailles des *eucaryotes* suit-elle la loi de Zipf ? Les biologistes ne semblent pas s'en être préoccupés.

Protégés par leur épais mur cellulaire, les *procaryotes* ressemblent à des châteaux forts du Moyen Âge. Ils doivent faire venir leur nourriture de l'extérieur en sécrétant un suc digestif. De même que des hordes barbares s'attaquaient aux villages fortifiés, de même les bactéries sont attaquées par des hordes de molécules errantes, des molécules d'ARN appelées bactériophages. Les bactéries ont dû apprendre à se défendre.

La paix revenue, certains villages se sont étendus en dehors des fortifications et sont devenus de gros bourgs. L'économie s'y est développée. Il a fallu restructurer le village. Devenues inutiles, certaines fortifications ont disparu. Il en est de même chez les *procaryotes* qui ont évolué en *eucaryotes*. Chez les *eucaryotes*, les restes de l'enceinte extérieure sont devenus une structure interne, le *cytosquelette*.

En s'étendant, les villes nouvelles englobent souvent des villages voisins. Les *eucaryotes* n'hésitent pas eux non plus à englober un *procaryote* qui traîne dans le voisinage. C'est la *phagocytose*. Le *procaryote* est alors, en général, digéré. De même, le village englobé est souvent remplacé par une nouvelle zone d'urbanisme. Certains monuments anciens peuvent être cependant conservés. Les *eucaryotes*, eux aussi, ont gardé d'anciennes structures. Leur

noyau, centre administratif de la cellule contenant l'*ADN*, est entouré d'une enceinte réminiscente de celle des premiers *procarvates*. C'est leur citadelle.

Parmi les anciennes structures, on trouve les *organites*, en particulier les *mitochondries*. Ce sont les banques. La molécule d'adénosine triphosphate ou *ATP* y tient lieu de monnaie. Elle permet de se procurer l'énergie indispensable au fonctionnement de l'ensemble. De même que la banque frappe la monnaie, de même la *mitochondrie* fabrique l'*ATP*. La monnaie est enfermée dans des coffres à la banque. L'*ATP* est enfermée à l'intérieur de la membrane de la *mitochondrie*.

Comme il se doit pour une banque, les *mitochondries* ont gardé une certaine indépendance. Elles ont leur propre *ADN*. Toutefois, celui-ci ne lui permet pas de se reproduire. Elles auraient alors une trop grande liberté. L'*ADN* contenu dans une *mitochondrie* ne permet de reproduire que sa membrane. L'*ADN* qui permet de reproduire l'intérieur de la *mitochondrie* a été transféré dans le noyau. Celle-ci est donc sous contrôle de l'administration centrale. La *mitochondrie* ne contrôle que sa membrane, c'est-à-dire l'accès aux coffres. Pour y avoir accès, il faut une double clé, sous forme de protéines. L'une est fournie par la *mitochondrie*, l'autre par le noyau.

J'arrêterai ici la comparaison, espérant avoir suffisamment montré à quel point on retrouve chez les premiers êtres vivants les problèmes économiques et sociaux qui nous préoccupent.

8.5. Les organismes multicellulaires

Moins imaginatifs que les *gènes*, les *génomés* n'ont formé que trois types fondamentaux de « véhicules » ou *eucaryotes* susceptibles d'assurer leur survie. Mais chacun de ces trois types a montré une capacité remarquable à développer des structures complexes de morphologies très différentes. On distingue ces trois types par leur *métabolisme*. Celui des *autotrophes* qui utilisent l'énergie solaire pour produire de la matière organique à partir de matière minérale, celui des *hétérotrophes* qui se nourrissent de matière vivante et celui des *bétérotrophes* qui utilisent des déchets organiques. Chacun de ces trois types d'*eucaryotes* a indépendamment donné naissance à des organismes multicellulaires. Les

premiers ont donné naissance aux plantes, les deuxièmes aux animaux, les troisièmes aux champignons.

Les premiers *eucaryotes* ont formé un ensemble d'êtres vivants pour la plupart unicellulaires appartenant au règne des *protocistes*. Lamibe du terreau dont j'ai parlé plus haut est un exemple de *protociste*. Si leur *métabolisme* est bien moins varié que celui des bactéries, leur morphologie et leur mode de reproduction le sont beaucoup plus. On peut dire que les *protocistes* ont expérimenté toutes les sortes possibles de morphologies et de modes de reproduction. Les plus entreprenants d'entre eux se sont mis à bâtir des « super-véhicules » capables d'assurer pleinement la survie de leur matériel *génétique* : les organismes multicellulaires.

On pense que ceux-ci sont apparus il y a environ un milliard deux cents millions d'années. Ils sont le résultat d'une *symbiose* de cellules *eucaryotes*, toutes nées d'une même cellule mère. Contrairement aux *symbioses* de cellules *procaryotes* nées de souches très différentes, les *symbioses* d'*eucaryotes* sont constituées d'individus identiques. Au départ, il s'agit donc d'une coopération de type *altruiste*, due au processus de *sélection de parentèle*. En se divisant, les cellules restent simplement attachées les unes aux autres.

Cela ne suffit pas pour en faire un organisme unique. Toute coopération nécessitant un partage des tâches, un mécanisme de différenciation cellulaire était nécessaire. Nous avons vu que les premiers *eucaryotes* sont nés par acquisition de nouveaux *génomés*. Un nombre croissant de biologistes pensent que c'est la façon dont les espèces ont évolué. Les noyaux d'*eucaryotes* se sont avérés être un endroit idéal pour héberger et assurer la survie d'un bon nombre de *génomés*. Un *génome* ne développe des cellules que lorsque l'environnement est favorable. On dit alors que le *génome* « s'exprime ». Des *génomés* différents nécessitent des environnements différents pour s'exprimer. L'évolution a donc favorisé le développement d'un mécanisme dans lequel les cellules issues de l'action d'un premier *génome* produisent les conditions favorables à l'expression du *génome* suivant.

La nature avait ainsi découvert un mécanisme semblable à celui d'un feu d'artifice à plusieurs étages dans lequel les morceaux issus de l'explosion d'un premier étage explosent à leur tour en formant des morceaux qui exploseront

eux-mêmes ensuite. Les cellules issues des différents étages peuvent ainsi acquérir des fonctions différentes. Le résultat est particulièrement spectaculaire dans le cas des insectes chez lesquels un premier *génom*e produit une chenille puis, lorsque l'environnement devient favorable, un second *génom*e produit un papillon. Les biologistes donnent à ce processus le nom de *morphogénèse*. Chaque étape de la *morphogénèse* prépare les conditions pour l'étape suivante. Le développement de l'ensemble de l'organisme se trouve ainsi programmé dans les *gènes*.

Comme pour toute *symbiose*, se pose alors le problème de la reproduction de l'individu. L'organisme s'étant différencié, le problème s'est trouvé naturellement résolu en confiant la reproduction de l'organisme à un groupe de cellules particulières. Tout au long de la vie d'un organisme multicellulaire, chaque cellule continue à se reproduire pour compenser la perte d'autres. Cette reproduction se fait par mitose (section 8.4). Celle-ci opère sur des cellules *diploïdes* (chaque *chromosome* est double). Une telle disposition se prêtait tout naturellement à la reproduction sexuée. Vu ses avantages, il est normal qu'elle soit apparue. En biologie, sexe et reproduction sont deux opérations opposées. Le sexe est une fusion de deux cellules, alors que la reproduction est une division cellulaire. Pour obtenir une reproduction sexuée, il suffisait de garder des cellules reproductrices *haploïdes* (chaque *chromosome* est simple). En fusionnant des cellules *haploïdes* provenant de deux organismes différents, on obtient des cellules *diploïdes* qui peuvent alors continuer à se reproduire par *mitose*. Ce nouveau mécanisme de reproduction est appelé *méiose*.

Nous avons comparé le développement des *eucaryotes* à celui des villes. On peut comparer le développement des organismes multicellulaires à celui des États par coopération entre des cités indépendantes. Le premier problème à résoudre est celui des voies de communication. Chez les premiers organismes multicellulaires, les cellules ont continué à communiquer entre elles par échange de molécules organiques. Mais une substance organique ne diffuse que très lentement à travers un tissu serré de cellules. L'évolution a donc favorisé le développement de voies d'accès sous forme de réseaux de capillaires. Chez les animaux, elle a développé, grâce aux cellules nerveuses, des méthodes d'échange d'informations encore plus rapide, l'équivalent de nos lignes téléphoniques.

Les membranes cellulaires sont semi-perméables. Elles sélectionnent les molécules qu'elles laissent passer suivant leur taille. Elles peuvent aussi laisser passer des molécules chargées électriquement, qu'on appelle des *ions*. Lorsque la charge d'un gros *ion* est compensée par la charge de signe opposé d'un petit *ion*, et que seuls les petits *ions* traversent la membrane, apparaît alors une différence de potentiel électrique. Un liquide qui contient des *ions* conduit l'électricité. Cette différence de potentiel peut alors se propager très vite sous la forme d'un courant électrique. Deux cellules peuvent ainsi communiquer rapidement à distance. La nature avait trouvé un moyen de convertir une information chimique en un signal électrique. C'est ainsi que les premières cellules nerveuses sont nées, il y a environ 700 millions d'années, chez des animaux marins semblables à nos méduses.

Non seulement les cellules nerveuses pouvaient communiquer rapidement entre elles, mais aussi, moyennant certaines modifications, leurs terminaisons pouvaient devenir sensibles à la pression ou à la lumière. Un nouveau moyen d'importer de l'information était apparu. En important des informations nouvelles et en mémorisant ces informations, la vie allait continuer à s'auto-organiser, augmentant dans des proportions considérables la dissipation de l'énergie. Ce nouveau mode de mémorisation de l'information allait peu à peu compléter celui des *gènes*. Nous verrons qu'avec l'Homme, il va presque entièrement le supplanter.

III

Des gènes à la culture

9. L'émergence de l'intelligence

Le développement de l'intelligence apparaît comme une conséquence des lois de la thermodynamique.

Les bactéries d'une même *colonie* échangent entre elles de l'information comme le font les neurones d'un cerveau. L'ensemble de la *colonie* se comporte comme un cerveau global, manifestant des formes d'intelligence collective.

Dans les deux cas, il s'agit d'un processus de *criticalité auto-organisée*. Les sociétés d'insectes agissent de même, mais, à la différence des bactéries, l'information échangée n'est pas transmise génétiquement. Les sociétés humaines se comportent *culturellement* comme les *colonies* de bactéries le font *génétiquement*.

9.1. L'intelligence d'une bactérie

La plupart des bactéries possèdent un appendice appelé *flagelle* en forme de tire-bouchon. La rotation de celle-ci autour de son axe permet à la bactérie de se déplacer. Plongée dans une solution nutritive inhomogène, la bactérie va nager dans la direction où la concentration de nourriture est la plus élevée. Fait-elle preuve d'intelligence ?

Si vous posez la question à un biologiste, il répondra vraisemblablement que le comportement des bactéries est un exemple d'émergence de l'intelligence chez les êtres vivants. L'intelligence serait une propriété émergente, c'est-à-dire une propriété qui apparaît et se développe au fur et à mesure de l'évolution.

Si vous posez la même question à un biochimiste, il répondra plutôt que la bactérie obéit à la loi de Le Chatelier. Énoncée pour la première fois au XIX^e siècle par le chimiste français Henry Louis Le Chatelier, cette loi énonce que, en présence d'un déséquilibre, tout système chimique évolue de façon à en modérer les effets. Considérée comme un ensemble de réactions chimiques, la

bactérie se dirige vers les régions où la nourriture est la plus concentrée pour en réduire la concentration, c'est-à-dire réduire effectivement le déséquilibre.

La loi de Le Chatelier est une conséquence des deux premières lois de la thermodynamique. La troisième loi ne fait qu'ajouter que la bactérie s'y dirige le plus vite possible, compte tenu des contraintes auxquelles elle est soumise. La bactérie obéit donc aux lois de la *mécanique statistique*. Cherchant à optimiser la production d'*entropie*, le développement de l'intelligence apparaît comme une conséquence de ces lois.²⁴

9.2. L'intelligence collective des bactéries

Nous avons vu qu'ayant des *gènes* communs, les bactéries d'une même souche forment des *colonies*. À l'intérieur d'une même *colonie*, les bactéries échangent de l'information sous forme de molécules organiques. Lorsqu'une bactérie détecte et reconnaît une telle molécule, elle va en général réémettre le même signal en produisant cette même molécule, de façon à transmettre l'information à d'autres bactéries. Nous avons déjà décrit ce comportement chez les amibes (section 7.2).

De même qu'en imitant leurs voisins, les *spins* d'un matériau *ferromagnétique* engendrent des avalanches de retournement de *spin*, de même, en imitant leurs voisines, les bactéries engendrent des avalanches de signaux moléculaires. Ces signaux permettent aux bactéries de s'auto-organiser collectivement de façon à optimiser le développement de leur *colonie* et la recherche de leur nourriture. Pour ce faire, la *colonie* reste constamment au voisinage du seuil *critique* de déclenchement des avalanches (section 3.3). Il en résulte la formation de structures *fractales* rappelant la formation des cristaux de neige (figure 8).

24. Le slogan : « En France on n'a pas de pétrole, mais on a des idées » montre bien que, dans un monde d'organismes en compétition, le développement de l'intelligence est considéré comme une nécessité pour la survie.

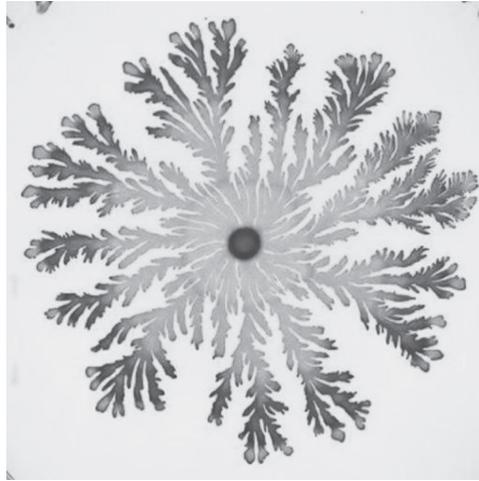


Figure 8. Développement d'une *colonie* de bactéries (photo Eshel Ben Jacob).

On peut comparer les bactéries à des molécules. Ces dernières échangent de l'information au moment des chocs moléculaires. Elles transportent l'information sous forme de quantité de mouvement associée à chacun de leurs degrés de liberté. Il en résulte une auto-organisation du fluide sous forme de cascades de tourbillons obéissant dans certaines conditions à la loi de Kolmogorov (section 3.3).

Bien plus variés, les échanges d'information entre les bactéries conduisent à des possibilités de comportement et d'adaptation au monde extérieur beaucoup plus étendues. On peut comparer les bactéries d'une même *colonie* aux cellules d'un cerveau. Ces dernières échangent et mémorisent collectivement de l'information. Les bactéries en font autant. Nous avons vu qu'elles disposent d'un vaste répertoire d'agents biochimiques de communication à l'aide duquel elles mémorisent collectivement de l'information. On conçoit donc qu'elles puissent, elles aussi, donner lieu à des comportements généralement considérés comme intelligents. Elles peuvent par exemple générer et utiliser des connaissances communes, développer une identité de groupe les distinguant d'autres *colonies*, et même prendre des décisions en commun (section 8.3). On peut donc parler effectivement d'intelligence collective.

9.3. Un modèle du cerveau

La figure 9 montre un schéma de principe du fonctionnement d'un cerveau d'après Bak et Stassinopoulos. Il représente le cerveau d'un singe. Celui-ci voit un signal lumineux qui peut être soit rouge soit vert, et il a deux leviers devant lui. Si la lumière est rouge, il doit presser le levier gauche. Si la lumière est verte, il doit presser le levier droit. Le signal lumineux change régulièrement de couleur. Chaque fois qu'il presse le bon levier, le singe reçoit une cacahuète.

Sur la figure 9, les relations entre le singe et le monde extérieur sont schématisées par des flèches. Le singe reçoit du monde extérieur une information sous forme binaire, c'est-à-dire pouvant prendre deux valeurs (signal rouge ou vert). Chaque fois qu'il presse sur un levier, il envoie au monde extérieur une information également binaire (levier droit ou gauche). Enfin il reçoit du monde extérieur de l'énergie sous forme d'une cacahuète.

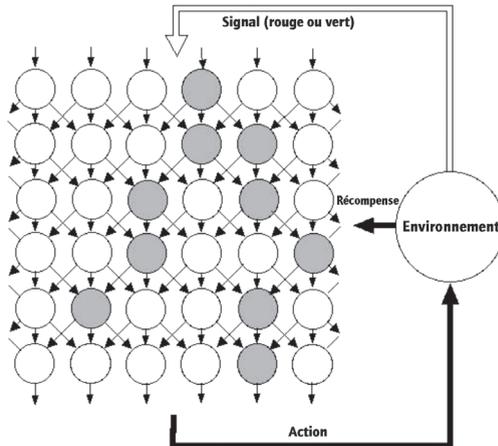


Figure 9. Fonctionnement du cerveau (d'après Bak et Stassinopoulos).

Nous savons que, comme toute *structure dissipative*, un organisme vivant importe de l'information de son environnement auquel il s'adapte en s'auto-organisant de façon à maximiser le flux d'énergie qui le traverse (section 2.5).

C'est bien la même situation qui est décrite ici. On s'attend donc à ce que non seulement le cerveau du singe s'auto-organise pour maximiser l'apport de cacahuètes, mais aussi qu'il le fasse à la manière d'une *structure dissipative*, c'est-à-dire comme une *transition de phase au point critique*. Il semble que ce soit effectivement le cas.

Chaque petit cercle de la figure 9 représente une cellule du cerveau appelée « neurone ». Les flèches indiquent la manière dont l'information circule entre les neurones. La ligne supérieure de cellules représente les neurones sensoriels recevant les signaux du monde extérieur. La ligne inférieure représente les neurones moteurs donnant l'ordre aux muscles d'agir. À chaque instant, chacun des neurones du cerveau peut avoir l'un ou l'autre de deux états possibles : soit un état excité, dans lequel il transmet l'information, soit un état de repos dans lequel il ne la transmet pas. Sur la figure 9, les neurones excités sont en gris, ceux au repos en blanc.

Lorsqu'un neurone reçoit des signaux d'autres cellules, il se charge électriquement. La charge reçue est plus ou moins grande suivant l'intensité de la connexion. Lorsque sa charge dépasse un certain seuil, il devient lui-même excité et transmet l'information aux autres neurones. On observe alors des avalanches de signaux au cours desquelles un nombre plus ou moins grand de neurones deviennent excités. L'analogie avec les retournements de *spin* décrits à la section 3.2.2 est frappante.

Initialement, les intensités des connexions sont arbitraires. En présence de signaux variés provenant de l'environnement, les neurones excités forment des *domaines d'Ising* plus ou moins étendus suivant la valeur des seuils. La probabilité pour qu'un de ces domaines connecte les neurones sensoriels aux neurones moteurs s'obtient en résolvant un problème mathématique dit de percolation. La propagation d'un courant électrique à travers des *domaines d'Ising* est en effet comparable à celle de l'eau à travers du marc de café. Il est à noter que, si le modèle d'Ising date de 1924 et les premiers travaux sur la percolation de 1957, ils font encore de nos jours partie de domaines de recherche très actifs. Sur les quatre médailles Fields décernées en 2010, deux l'ont été pour des travaux en mécanique statique, dont une à Stanislav Smirnov pour des travaux sur ces sujets.

Lorsque les seuils sont bas, les *domaines d'Ising* sont étendus. Les connexions entre les neurones sensoriels et les neurones moteurs sont nombreuses, conduisant à une activité intense et désordonnée. Lorsqu'on augmente la valeur des seuils, les *domaines d'Ising* deviennent plus petits et les connexions plus rares. On atteint un seuil critique au-dessus duquel la probabilité de connexion devient très faible et toute action cesse. Ce seuil joue un rôle analogue à celui du *point de Curie* pour le fer (section 3.2.2). Comme pour toute *structure dissipative*, on s'attend à ce que le cerveau fonctionne efficacement au voisinage du seuil *critique*.

Au *point critique*, le fer est très sensible à son environnement. Le moindre champ magnétique extérieur décide de son aimantation. Dans les simulations numériques de Bak et Stassinopoulos, l'apport d'une cacahuète renforce l'intensité des connexions entre les neurones excités, que ceux-ci soient directement responsables ou non de l'action. Il renforce les avalanches de signaux qui ont contribué à un apport d'énergie. L'absence de cacahuète diminue au contraire l'intensité de ces connexions, donc l'amplitude des avalanches. On a là l'équivalent de la *sélection naturelle* en biologie. Celle-ci règle les avalanches de gènes, comme les intensités des connexions règlent les avalanches de signaux. Dans les deux cas, il s'agit bien d'avalanches d'information.

Cependant, cela ne suffit pas à assurer le bon fonctionnement du cerveau. Pour être sensible à son environnement, le cerveau doit être maintenu au voisinage du *point critique*. C'est la clé du succès de l'algorithme. Si trop de neurones moteurs sont excités, la valeur des seuils est augmentée. Si aucun neurone moteur n'est excité, leurs valeurs sont réduites. Pour réfléchir, le cerveau doit être dans un état intermédiaire entre le sommeil et l'hyperactivité. D'où les oscillations des seuils semblables à celles de la température dans l'algorithme de *recuit simulé* (section 4.5), ou les *équilibres ponctués* en biologie (section 6.3). De longues périodes d'inactivité alternent avec de courtes périodes d'activité intense. On sait en effet que la mémoire s'efface lorsqu'elle n'est pas régulièrement réactivée.

Dans les tests numériques de Bak et Stassinopoulos, le signal lumineux alterne périodiquement entre le rouge et le vert. On enregistre le pourcentage de bonnes réponses au cours du temps. Ce pourcentage fluctue d'abord dans de très larges proportions puis se stabilise au voisinage de 100 %, démontrant les capacités d'apprentissage de ce modèle de cerveau.

9.4. Les propriétés du modèle

Le modèle de Bak et Stassinopoulos rend bien compte des principales propriétés du cerveau, essentiellement permettre aux organismes vivants qui en sont munis d'apprendre et de mémoriser les réactions appropriées à un grand nombre de situations. Il est entièrement compatible avec ce que l'on sait du cerveau, en particulier il est capable de réapprendre après ablation d'une partie du réseau.

Il rend aussi compte d'un certain nombre d'observations courantes. Chacun sait qu'il est difficile de réfléchir en présence de bruit ou d'agitation autour de soi. Il nous faut alors diminuer la sensibilité de notre cerveau au milieu extérieur en remontant ses seuils. Mais, lorsque ces seuils sont trop élevés, nous nous endormons. Très souvent, au moment du réveil, une solution apparaît aux problèmes qui nous ont préoccupés la veille. C'est à ce moment-là que notre cerveau traverse l'état *critique*.

Per Bak compare le fonctionnement du réseau neuronal à celui d'un réseau de canaux alimentant un ensemble de barrages. Lorsque l'eau ne se dirige pas où on veut, on peut la rediriger en diminuant son accès aux canaux présentement actifs (affaiblissement des connexions) tout en ouvrant les barrages (diminution des seuils) de façon à alimenter d'autres canaux, et cela jusqu'à ce que le résultat attendu soit obtenu. L'addition de fluctuations aléatoires du niveau de l'eau permet d'éviter à l'algorithme de rester piégé dans un optimum secondaire. On a bien là un algorithme d'optimisation par approximations successives tout à fait semblable à celui décrit à la section 4.5.

Tel que je l'ai exposé, le modèle s'applique à un réseau régulier de neurones entre une rangée de neurones sensoriels et une rangée de neurones moteurs. Bak et Stassinopoulos ont montré qu'il s'applique à une configuration quelconque de neurones liés par des connexions arbitraires. Il est donc possible de l'appliquer à une population d'individus où chacun d'entre eux peut échanger de l'information avec n'importe quel autre. On peut alors parler d'intelligence collective ou de « cerveau global ».

9.5. L'intelligence collective des insectes

L'Homme n'est pas le seul organisme multicellulaire à former des sociétés à l'intérieur desquelles les individus collaborent en grand nombre, effectuant chacun des tâches spécialisées. C'est le cas aussi des insectes²⁵. Dans les sociétés d'insectes, la reproduction est confiée à une femelle unique : la reine. Étant descendants d'une même reine, tous les membres de la communauté ont des gènes en commun, d'où une incitation à coopérer liée au processus de *sélection de parentèle* (section 7.1).

Cette coopération implique des échanges d'information entre les membres de la société. Comme les bactéries, les insectes échangent des informations sous forme de molécules organiques appelées *phéromones*. Munis d'un cerveau et d'organes sensoriels, ils échangent également des informations sonores et visuelles, notamment au moment de l'accouplement. L'ensemble des insectes d'une *colonie* forme donc un cerveau global capable de manifester des formes d'intelligence collective.

À la différence des bactéries, les insectes n'échangent pas de *gènes* ou d'informations susceptibles d'être transmises à leurs descendants. C'est pourquoi les sociétés d'insectes restent figées. Leur comportement social reste le même d'une génération à une autre. Dans une société d'insectes, les échanges d'information horizontaux (d'un individu à un autre) sont déconnectés des échanges verticaux (d'un individu à ses descendants). Seule procréatrice, la reine est incapable de transmettre à ses descendants les informations échangées et mémorisées collectivement par la société.

Un certain nombre de biologistes, dont notamment Edward Osborne Wilson, ont cherché à comprendre le comportement de l'Homme à partir du comportement des animaux, fondant une discipline appelée « sociobiologie ». Ils ont pris généralement pour modèle, soit les animaux *génétiqument* proches de l'Homme comme les grands singes, soit les sociétés d'insectes. L'application

25. En botanique, de nombreuses fleurs peuvent être considérées comme des sociétés de fleurs. C'est le cas des fleurs composées. Elles sont formées de petites fleurs sans pédoncule groupées en inflorescences, formant ce qu'on appelle le capitule. C'est le cas par exemple de la marguerite (*leucanthemum vulgare*).

de leurs résultats à l'Homme reste controversée. D'une part, bien que formant des sociétés semblables à celles des insectes, les Hommes ne le font pas pour des raisons génétiques de *sélection de parentèle*. D'autre part, bien que proches de l'Homme, les grands singes ne forment pas des sociétés comme lui.

À la section 11.4, nous montrerons que l'évolution de l'Homme devient compréhensible si l'on admet que, de *génétique*, elle est devenue *culturelle*. Elle n'est plus dominée par l'information contenue dans ses *gènes*, mais par l'information contenue dans son cerveau. Nous verrons que les sociétés humaines se comportent *culturellement* comme les *colonies* de bactéries le font *génétiquement*.

10. L'émergence de la culture

Le développement du cerveau a conduit à de nouvelles formes d'échange d'information (visuelle ou acoustique) entre les individus.

Mémorisée non plus dans les *gènes*, mais dans le cerveau, cette information est qualifiée de *culturelle*.

Chez les oiseaux et les mammifères, une quantité importante d'information *culturelle* est transmise aux descendants par imitation des adultes, d'où l'apparition d'une *sélection de parentèle culturelle* (*sélection de groupe*). La transmission d'informations *culturelles* vient à l'appui de l'évolution *génétique* et réciproquement (*effet Baldwin*).

10.1. L'imitation chez les animaux

L'imitation est un moyen d'échange et de réplication de l'information. C'est en imitant leurs voisins que les insectes ou les bactéries créent des avalanches de signaux biochimiques, semblables aux avalanches de signaux électriques produites par les neurones du cerveau (ou aux avalanches de retournement de *spin* dans un *domaine d'Ising*). Cela leur permet de former ce que nous avons appelé un cerveau global avec manifestation d'intelligence collective.

Il n'est donc pas étonnant que, favorisées par la sélection naturelle, des formes d'imitation plus élaborées se soient développées chez les animaux évolués. Si des êtres semblables à nos méduses ont été les premiers à posséder un système nerveux, il semble que les *céphalopodes* aient été les premiers à se doter d'un cerveau et d'organes de vision performants. Après les insectes, ce sont les animaux les plus anciens chez lesquels la capacité d'imitation a été mise en évidence.

En 1992, deux chercheurs italiens, Graziano Fiorito et Pietro Scotto, ont dressé un poulpe à distinguer des boules blanches et des boules rouges en récompensant le choix d'une boule blanche. Ce dressage a eu lieu en présence d'autres poulpes qui observaient la scène. Lorsque ces autres poulpes ont été

ensuite soumis au même dressage, ils ont d'emblée choisi des boules blanches. Il y avait eu apprentissage par imitation.

Bien que capables d'imiter occasionnellement leurs voisins, les poulpes n'ont pas développé de comportements collectifs. Ils vivent en solitaire. Cela tient sans doute à plusieurs raisons. La première est que l'information ainsi acquise ne reste mémorisée que quelques jours. Elle n'est pas systématiquement retransmise à d'autres poulpes ni à leurs descendants. La seconde est que, pour des raisons de défense, les *céphalopodes* ont tendance à se camoufler. Ils changent constamment de forme et de couleur, rendant leur identification difficile. Il semble donc douteux qu'ils puissent s'identifier les uns les autres.

Nous avons vu qu'un réseau de type neuronal fonctionne grâce à des interactions reproductibles entre les mêmes acteurs. Cela ne paraît pas possible chez les poulpes. Les bactéries ou les insectes sont capables de s'identifier entre eux grâce aux signaux biochimiques qu'ils émettent. Dans ce cas, une information mémorisée sous forme biochimique est transmise sous forme biochimique. En ce qui concerne les poulpes, l'information est mémorisée dans le cerveau. Elle ne peut être transmise qu'après codage et décodage de signaux visuels ou acoustiques. Nous qualifions ces échanges de *culturels*. Ces échanges se sont développés chez les oiseaux et chez les mammifères.

Isolé à sa naissance, un oiseau ne produira qu'un chant inné rudimentaire caractéristique de son espèce. C'est en imitant ses parents ou ses semblables qu'il développe un chant élaboré, caractéristique du groupe dans lequel il vit. La période d'apprentissage est limitée à l'enfance. En fin d'apprentissage, son chant acquiert souvent des caractéristiques personnelles permettant une identification individuelle entre congénères et, plus particulièrement, entre partenaires sexuels. Il y a bien là transmission verticale d'une information *culturelle*.

Non seulement les oiseaux ont un appareil vocal élaboré, mais ils disposent aussi d'une vision parmi les plus performantes du monde animal. Leur vision des couleurs est supérieure à celle de la plupart des mammifères et, vraisemblablement, quadrichromique. Leur acuité visuelle, notamment celle des aigles, est bien connue. Les oiseaux peuvent facilement identifier et imiter leurs congénères. Un exemple de transmission horizontale d'information *culturelle* souvent cité chez les oiseaux est le cas des mésanges qui, dans les

années cinquante, se mirent à percer les capsules des bouteilles de lait déposées le matin à la porte des habitants de Londres, pour en boire le contenu. Les Londoniens ont pu suivre directement, et à leur détriment, le développement de ce comportement *culturel*.

Les oiseaux ont clairement les capacités nécessaires pour développer des formes d'intelligence collective. Celles-ci sont particulièrement visibles chez les oiseaux migrateurs. Qui n'a pas observé le rassemblement des hirondelles à l'automne ? Ces rassemblements peuvent être interprétés comme des phénomènes de *criticalité auto-organisée*. Ils ressemblent en effet à des condensations au voisinage d'un *point critique*. Des groupes se font et se défont comme des *domaines d'Ising* lorsque la température oscille autour du *point critique*. Si, en vol, le groupe suit l'oiseau de tête, ce dernier est régulièrement remplacé. Il n'y a pas de chef permanent, pas plus que dans une *colonie* de bactéries ou parmi les neurones du cerveau. La décision du départ est apparemment prise collectivement de façon purement démocratique. Nous avons vu que les phénomènes au *point critique* sont très sensibles à l'environnement. Il en est de même de ces rassemblements, souvent utilisés comme indicateurs de l'évolution météorologique.

Les bactéries qui ont des *gènes* communs forment des *colonies*. Les insectes qui ont des *gènes* communs forment des sociétés. Les biologistes interprètent ces phénomènes en termes de *sélection de parentèle*. Le rassemblement des oiseaux migrateurs est un phénomène analogue. Pourtant il se produit entre des oiseaux qui, bien que d'une même espèce, n'ont pas les mêmes *gènes*. Un certain nombre de phénomènes de ce type sont restés longtemps incompris des biologistes parce qu'ils ne font pas intervenir des informations mémorisées dans les *gènes*, mais des informations mémorisées dans le cerveau. Nous allons les passer en revue.

10.2. Les « mèmes » de Dawkins

Dans son livre « *Le Gène égoïste* », Richard Dawkins montre que la *sélection naturelle* s'applique à l'information mémorisée dans les *gènes*. Elle favorise celle qui se réplique le plus vite. Il remarque toutefois que l'information contenue dans les *gènes* n'est pas la seule à être répliquée. Lorsque nous répétons ce que

nous avons entendu, nous répliquons également de l'information. Il émet alors l'idée que cette information pourrait faire aussi l'objet d'une *sélection naturelle*. Pour renforcer l'analogie avec les *gènes*, Dawkins propose d'appeler *mêmes* les éléments d'information que les Hommes échangent entre eux, essentiellement par le langage. Ce dernier pourrait être considéré comme un code *mémétique* analogue au code *génétique*. Nous transmettons à nos enfants non seulement des ressources *génétiques*, mais aussi, grâce à l'éducation que nous leur donnons, des ressources *mémétiques*. Ainsi l'évolution de l'Homme ne serait pas seulement *génétique*, mais aussi *mémétique*.

Thermodynamiquement, il s'agit de deux formes différentes d'un seul et même processus : l'acquisition, la mémorisation et la reproduction d'informations liées à l'environnement. Dans le premier cas, l'information est mémorisée dans une molécule d'*ADN*. Dans le second cas, elle est mémorisée dans le cerveau. La molécule d'*ADN* est difficile à modifier : elle convient pour un stockage de l'information à long terme. L'information contenue dans le cerveau est beaucoup plus facile à modifier : le cerveau convient pour un stockage à court terme. La différence entre les deux est comparable à celle entre la mémoire de masse d'un ordinateur et sa mémoire vive. L'avantage sélectif lié au développement du cerveau est qu'il permet une adaptation beaucoup plus rapide à un changement d'environnement.

Dans ce livre, nous utiliserons le mot *culture* à la place du mot *mème*. Pour désigner les ressources *mémétiques*, nous parlerons d'héritage *culturel*. Dans ce qui suit, nous allons montrer qu'un certain nombre de comportements d'animaux évolués ne peuvent être compris sans tenir compte de l'information *culturelle*. Nous montrerons ensuite que, chez l'Homme, la partie *culturelle* est devenue dominante.

10.3. L'altruisme chez les animaux évolués

Nous avons vu que la *sélection naturelle* ne s'applique pas aux individus, mais à leurs *gènes*. Lorsque ces derniers sont communs à tout un ensemble d'individus, alors la *sélection naturelle* va s'appliquer à cet ensemble. C'est le processus de *sélection de parentèle*. Il permet d'expliquer pourquoi les bactéries d'une même souche coopèrent au sein de *colonies* et pourquoi les insectes issus

d'une même reine coopèrent à l'intérieur d'une même société. Il ne permet pas d'expliquer pourquoi les oiseaux migrateurs, issus de parents différents, coopèrent entre eux pour voyager.

D'une façon générale, la *sélection de parentèle* permet de comprendre les phénomènes d'altruisme entre individus issus de parents communs, mais pas ceux entre individus issus de parents différents. Pourtant de tels phénomènes existent et s'observent régulièrement. Ils sont longtemps restés un mystère pour les biologistes. Un exemple souvent cité est celui des cris d'alarme émis par les oiseaux en présence d'un prédateur. Dès qu'un oiseau émet un cri d'alarme, il attire l'attention du prédateur sur lui. Il met sa vie en danger. Un tel comportement ne saurait avoir une origine *génétique*. Un *gène* qui met en danger la vie de l'individu qui le possède est automatiquement éliminé par la *sélection naturelle*.

Par contre, si un tel comportement naît *culturellement* au sein d'un groupe, il augmente les chances de survie du groupe. La *sélection naturelle* va donc favoriser les groupes à l'intérieur desquels ce comportement est imité, notamment par les enfants. On a bien là l'équivalent d'une sélection de parentèle, mais celle-ci ne s'applique plus à une information enregistrée dans les *gènes*, mais à une information enregistrée dans le cerveau, c'est-à-dire à une information *culturelle*.

Un tel comportement s'observe non seulement chez les oiseaux, mais aussi chez les mammifères, et plus particulièrement chez ceux qui vivent en groupe. Un exemple remarquable est celui de la chauve-souris vampire *Desmodus Rotondus*. Celle-ci se nourrit chaque nuit en suçant le sang d'autres animaux. Elle ne peut sans cela survivre plus de deux jours. Pourtant une fraction importante d'entre elles (jusqu'à 30 %) rentrent le matin bredouilles. L'espèce aurait dû s'éteindre. Elle existe toujours grâce à un comportement *altruiste* permettant à un individu qui n'a pas eu de nourriture, d'en recevoir régurgitée par un autre. Cela lui permet de subsister jusqu'à la nuit suivante. Un tel comportement, nuisible au donneur, ne peut se développer que si le donneur peut à son tour bénéficier d'une aide semblable en cas de besoin. Un groupe d'individus peut ainsi se former au sein duquel tous pratiquent cette stratégie de coopération. Survivant mieux que les autres, ce groupe va se reproduire davantage au point que ce comportement va devenir général.

Un tel comportement nécessite toutefois l'existence d'un mécanisme d'identification et d'élimination des fraudeurs. Il faut qu'un individu qui reçoit de l'aide, mais n'aide pas les autres, puisse être identifié et éliminé du groupe. Il faut aussi qu'un individu, qui a déjà eu de la nourriture, n'en demande pas aux autres. Il semble que ces chauves-souris aient pris l'habitude de se tâter le ventre avant d'échanger de la nourriture. On voit l'importance des échanges d'information entre les individus et la nécessité de mémoriser ces échanges au cours du temps. On a bien ici un exemple d'intelligence collective liée à un partage d'informations *culturelles*.

Dans les deux exemples qui précèdent, la *sélection naturelle* favorise le groupe plutôt que l'individu. Le zoologiste V.C. Wynne-Edwards a décrit de nombreux autres exemples du même type, montrant l'existence d'un processus de *sélection de groupe*. Une telle possibilité a été longtemps niée, notamment par George C. Williams et Richard Dawkins, parce que contraire à la théorie néodarwinienne du « *gène égoïste* ». Cette objection tombe si l'on admet que le processus de *sélection de groupe* est dû à un échange d'informations *culturelles*. Dans ce cas, la *sélection naturelle* n'agit pas sur les *gènes*, mais sur une information commune mémorisée dans le cerveau. Il s'agit bien d'une sorte de *sélection de parentèle*, mais elle est de nature *culturelle*.

Au chapitre 7 (section 7.4), nous avons vu que la coopération entre deux individus peut prendre deux aspects très différents : un aspect *altruiste* dû au partage d'informations communes, et un aspect *symbiotique* dû à une complémentarité d'intérêts. Dans le cas des *gènes*, un exemple du premier est la coopération entre deux fourmis, tandis qu'un exemple du second est la coopération entre le champignon et l'algue unicellulaire qui constituent le lichen. La même distinction doit aussi s'appliquer à la *culture*. S'il existe une *coopération altruiste* liée à une *culture* commune, il doit aussi exister une *coopération symbiotique* liée à des cultures complémentaires. Elle ne serait pas due à une affinité entre les coopérants, mais à leurs intérêts bien compris. Ce type de coopération a été décrit par le biologiste Robert Trivers sous le nom d'altruisme réciproque.

10.4. L'effet Baldwin

Nous venons de voir que le comportement des animaux évolués ne peut être parfaitement décrit sans tenir compte de l'information *culturelle* mémorisée dans leur cerveau. La question se pose alors de la contribution respective des *gènes* et de la *culture* dans leur évolution. C'est un psychologue américain, James Mark Baldwin, qui a le premier alerté les biologistes sur la nécessité de tenir compte des facultés d'apprentissage comme facteur évolutif. Dès la fin du XIX^e siècle, il a montré qu'une adaptation *culturelle* peut entraîner une évolution *génétique*. C'est ce qu'on appelle l'*effet Baldwin*.

Nous avons comparé plus haut le cerveau à la mémoire vive d'un ordinateur et les *gènes* à une mémoire de masse. De même que le résultat d'un calcul enregistré dans une mémoire vive peut être conservé de façon plus permanente dans une mémoire de masse, de même une adaptation *culturelle* mémorisée dans le cerveau peut être rendue plus permanente par des modifications *génétiques*. Chez les animaux évolués, le cerveau aurait ainsi pour rôle de guider et d'accélérer l'évolution.

Pour montrer ceci plus en détail, on peut reprendre l'exemple évolutif de la girafe de la section 5.2. Dans le cadre d'une évolution strictement darwinienne, un animal dont le cou est plus long que ceux des autres survit mieux et prolifère davantage en mangeant les feuilles des arbres. Peu à peu l'avantage sélectif d'un cou long devient dominant, créant une population de girafes. Si l'on tient compte de l'*effet Baldwin*, cette description devient quelque peu différente. L'animal qui essaie de manger les feuilles des arbres est aussitôt imité par les autres. Ceux qui ont les plus longs cous survivent mieux et prolifèrent davantage. Imitant leurs parents, les petits se mettent aussi à manger les feuilles des arbres. Parmi ceux-ci, ceux qui ont le cou le plus long prolifèrent encore davantage, conduisant rapidement à une population d'animaux au cou long.

Cet exemple peut donner l'impression d'une évolution lamarckienne au cours de laquelle un caractère acquis (manger les feuilles des arbres) serait transmis *génétiquement*. Il s'agit en fait de deux caractères différents dont l'un (manger les feuilles des arbres) est transmis *culturellement* et l'autre (avoir un cou long) est transmis *génétiquement*. Ces deux caractères co-évoluent au bénéfice l'un de l'autre.

Dans la partie qui suit nous allons voir l'importance croissante du cerveau dans l'évolution, depuis les primates jusqu'à l'espèce *Homo sapiens*. Bien que l'évolution *culturelle* soit devenue prépondérante chez l'Homme, elle continue cependant à influencer lentement son évolution *génétique*. Un bon exemple d'*effet Baldwin* chez l'Homme est celui du lactose. Chez les mammifères, la digestion du lactose contenu dans le lait maternel requiert un *enzyme* appelé lactase. La production du lactase cesse normalement après sevrage. À l'apparition de l'élevage, l'homme adulte s'est mis à boire du lait produit par des animaux. Cela lui causa des troubles de la digestion. La conséquence a été une évolution *génétique* qui fait que la plupart des hommes modernes (surtout les Occidentaux) continuent à produire du lactase à l'âge adulte et peuvent donc digérer le lait.

11. Des primates à l'Homme

Parce que l'information *culturelle* permet une adaptation plus rapide à l'environnement, la *sélection naturelle* va favoriser le développement du cerveau chez ceux capables de la transmettre.

Des primates à l'Homme, la quantité d'information transmise *culturellement* ne cesse de croître au point d'excéder, chez l'Homme, celle transmise *génétiquement*. De *génétique*, l'évolution de l'Homme devient essentiellement *culturelle*. Les individus *culturellement* semblables forment alors des sociétés humaines, comme les bactéries *génétiquement* semblables forment des *colonies*.

11.1. Des grands singes au genre Homo

Les mammifères ont évolué différemment des oiseaux. Il y a environ cent millions d'années, les mammifères étaient de petits animaux qui sortaient la nuit pour échapper aux dinosaures. Ils ont alors développé une bonne vision nocturne. On la retrouve de nos jours chez un grand nombre d'entre eux, par exemple chez le chat domestique. Leur vision des couleurs s'est développée plus tard. Celle-ci est devenue importante chez les primates, car elle leur a permis de mieux discerner les fruits dans les arbres. Une vision binoculaire stéréoscopique a de plus facilité la cueillette.

Les mammifères ont été également tardifs à développer un organe capable d'émettre des sons complexes et variés comme ceux des oiseaux. C'est chez les primates que les acquis *culturels* sont le plus clairement identifiables. Chez eux la faculté d'imiter dépasse celle de tous les autres animaux, au point qu'en français le verbe « singer » est devenu synonyme d'imiter. Les petits sont capables de reproduire des tâches complexes effectuées par les parents comme collecter de l'eau de pluie sur un matériau spongieux ou des insectes sur des rameaux ou brindilles.

Selon l'hypothèse la plus courante, la branche qui conduit à notre espèce se serait détachée de celle conduisant aux chimpanzés il y a environ sept millions

d'années. Cette séparation aurait eu lieu en Afrique orientale. Le climat ayant changé, les arbres sont devenus plus rares. La savane a peu à peu remplacé la forêt. Mangeurs de fruits, les primates qui vivaient dans les arbres n'ont plus eu ni logement ni nourriture. Ils ont désespérément cherché des moyens de survie. Adaptées à la cueillette des fruits, leurs mains leur permettaient aussi, avec un peu d'effort, de déraciner les plantes. Certains ont pu ainsi survivre en mangeant les racines, partie cachée de la plante, laissée par la plupart des autres animaux. L'appareil digestif de leurs descendants s'est lentement adapté à ce nouveau régime. La nécessité de se redresser pour arracher les plantes a vraisemblablement développé chez eux une morphologie favorable à la bipédie, démarche qu'ils ont alors adoptée.

Éduquer les petits était devenu un problème. Leur apprendre à se servir d'une brindille ne suffisait plus. Il a fallu leur apprendre des rudiments de botanique. Le petit qui mémorisait le mieux la relation entre l'aspect extérieur d'une plante et celui de sa racine avait de meilleures chances de survie. Il ne dépensait pas toute son énergie à déraciner les mauvaises plantes. La mémoire étant liée à la taille du cerveau, celui-ci s'est mis à grossir. Bref, en quelques centaines de milliers d'années, ces primates sont devenus des *australopithèques*.

Le processus que je viens de décrire est typique du mécanisme de l'évolution *génétique*. Que ce soit à cause d'une surexploitation ou d'un simple changement climatique, une population voit tôt ou tard ses ressources disparaître. Elle doit évoluer. Généralement quelques individus survivent, souvent en émigrant. Ils doivent alors s'adapter à un nouvel environnement. Peu à peu, ils forment une nouvelle espèce. Les *australopithèques* ont ainsi évolué pendant plusieurs millions d'années, formant diverses espèces se répartissant entre l'est et le sud de l'Afrique.

Il y a un peu moins de deux millions d'années, des *australopithèques* se sont trouvés à nouveau sans ressources. Certains ont vraisemblablement survécu en mangeant des restes de carcasses abandonnées par des fauves repus. Leurs descendants en ont fait autant. Leur appareil digestif s'est peu à peu adapté à ce nouveau régime. Ils se sont mis à aimer la viande. De là à essayer de tuer d'autres animaux, le pas a été vite franchi. Ils n'étaient pas du tout adaptés physiquement à cela, mais leur cerveau était suffisamment déve-

loppé pour qu'ils sachent se servir d'outils. Ils savaient casser des noix avec des pierres. Ils pouvaient donc jeter des pierres à la tête d'autres animaux. Peu à peu ils ont appris à choisir les bonnes pierres, puis à les tailler et enfin à les fixer au bout d'une tige pour en faire une lance. L'évolution devenait de plus en plus *culturelle*. Éduquer les enfants devenait aussi plus difficile. Il fallait leur apprendre une véritable technique. Quelques sons rudimentaires n'y suffisaient plus. Un langage abstrait devenait nécessaire. Ceux dont le cerveau était le plus développé étaient favorisés. L'homme primitif appelé « genre *Homo* » était né.

11.2. L'apparition de l'*Homo sapiens*

Les hommes primitifs se révèlent très doués pour épuiser leur environnement, et se retrouver régulièrement au bord de l'extinction. Pour y échapper, certains d'entre eux quittent l'Afrique. L'*Homo erectus* semble avoir été le premier à le faire, il y a plus de 400 000 ans. Traversant la péninsule du Sinaï, il part vers l'Asie. Pour subsister l'hiver, il maîtrise le feu. Les paléontologues ont maintenant identifié plus d'une douzaine d'espèces *Homo* différentes, sans doute chacune *génétiqument* adaptée à des environnements différents. Il y a plus de 150 000 ans, notre propre espèce, dite *Homo sapiens*, apparaît, toujours en Afrique. Elle a notre capacité intellectuelle. On pense qu'elle est sortie d'Afrique il y a 60 000 ans pour atteindre l'Australie, démontrant son aptitude à franchir un détroit, la ligne *Wallace*, en naviguant sur mer. Ayant moins de propension à migrer, les autres espèces du genre *Homo* s'éteignent après épuisement de leurs ressources. Il y a 30 000 ans, seules deux d'entre elles subsistent, la nôtre et l'espèce dite *Homo neanderthalensis*. Apparemment moins mobile que nous, l'homme de Néandertal disparaît à son tour. Il a pourtant un squelette robuste. Son cerveau est plus gros que le nôtre. Les scientifiques s'interrogent sur l'origine de sa disparition. Apparemment la clé de sa disparition réside dans la différence entre adaptation et adaptabilité (section 7.3).

Apparu en Europe, l'homme de Néandertal est, du point de vue génétique, parfaitement adapté à son environnement. Sa corpulence massive est mieux

adaptée au froid que celle de l'*Homo sapiens* né en Afrique²⁶. Sa grande capacité crânienne lui confère une mémoire d'éléphant. Mais tout cela nécessite beaucoup d'énergie : il a un gros appétit, difficile à pourvoir. Grâce à sa mémoire, il garde un vif souvenir de tous les détails de son enfance. Cela lui permet d'exploiter à fond son environnement, mais, dès que cet environnement change, il a du mal à s'adapter. Il est très affecté par la mort de ses proches. Il les enterre. Son enfance est plus courte que la nôtre et il ne vit pas très longtemps. C'est la façon dont son espèce s'adapte aux modifications de l'environnement.

Il y a environ quarante mille ans, l'*Homo sapiens* migre en Europe. Il y est moins adapté que l'homme de Néandertal, mais il est beaucoup plus adaptable. Toute sa vie il garde un cerveau d'enfant²⁷. Il apprend constamment, aussi vite qu'il oublie. Son imagination compense son manque relatif de mémoire : de même que les mutations des *gènes* permettent une évolution *génétique*, les mutations des idées permettent une évolution *culturelle*. Moins adapté au froid que l'homme de Néandertal, l'*Homo sapiens* le supporte tout aussi bien grâce à sa maîtrise technique dans l'art de s'en protéger : vêtements, abris, foyers. Face à un nouveau gibier, il invente de nouveaux outils, de nouvelles armes, de nouveaux pièges. Cette faculté d'adaptation entraîne une grande diversification de ses activités et un partage du travail entre hommes et femmes. C'est ainsi que l'*Homo sapiens* occupe peu à peu toutes les *niches écologiques* précédemment occupées par les autres espèces *Homo*. Au fur et à mesure qu'il envahit l'Europe, il représente une concurrence croissante pour l'homme de Néandertal. Ce dernier voit son gibier disparaître. Il est condamné à disparaître avec lui. Depuis vingt-huit mille ans, l'homme de Néandertal n'a plus laissé de trace.

Dix mille ans plus tard, l'adaptabilité de l'*Homo sapiens* va être à son tour mise à l'épreuve. La Terre entame un lent réchauffement climatique. Pendant huit

26. Le dégagement de chaleur d'un individu est proportionnel à son volume tandis que ses pertes de chaleur sont proportionnelles à sa surface. Ainsi les pygmées sont petits parce qu'adaptés à vivre en zone équatoriale. Le mammouth et autre grand mammifère que chassait l'homme primitif étaient au contraire adaptés au froid.

27. Une caractéristique appelée « néoténie » typique du genre *Homo* et plus particulièrement de l'espèce *Homo sapiens*.

mille ans, sa température moyenne va monter de un degré par millénaire. Plantes et animaux vont subir un profond bouleversement. Adaptées à des climats plus froids, un grand nombre d'espèces disparaissent. C'est le cas notamment des grands mammifères, principale source de nourriture pour l'homme. Beaucoup d'arbres meurent aussi. Ils sont remplacés par une végétation basse, à laquelle l'appareil digestif de l'homme n'est pas adapté. Les fruits, les légumes, la viande auxquels il était accoutumé sont devenus excessivement rares. À son tour, l'espèce *Homo sapiens* est au bord de l'extinction. La situation est particulièrement délicate au Moyen-Orient. La faune a été remplacée par des bovidés, les aurochs, formidables machines à tondre et à digérer l'herbe, nés d'une *symbiose* avec des bactéries. Malheureusement, les aurochs ont une fâcheuse tendance à se réunir en troupeaux denses difficiles à attaquer. Les oiseaux subsistent eux aussi en se nourrissant de graines. Ils arrivent au printemps puis migrent ailleurs. Ils sont difficiles à attraper. Le genre *Homo* semble condamné à disparaître, éventuellement en engendrant un nouveau genre *génétiquement* différent.

11.3. La révolution néolithique

Pour survivre, l'Homme n'a pas d'autres ressources que de manger lui aussi des graines, mais il n'a pas un appétit d'oiseau. Il lui en faut beaucoup et il les trouve indigestes. Patiemment, il les ramasse une à une et les écrase. Et là se produit un événement unique dans l'Histoire de l'évolution. L'Homme découvre que, bouillies dans l'eau, les graines deviennent digestes.

Au temps chaud, il apprend à cueillir les épis juste avant que la graine s'en échappe. Il lui suffit alors de secouer les épis pour s'en procurer un bon nombre. Il arrive à en conserver suffisamment pour subsister l'hiver. Au printemps suivant, il apprend à en semer. Sans le savoir, il a sélectionné les graines ayant le moins tendance à s'échapper de leur épi. En les ressemant, il accentue ce caractère *génétique*. Bientôt les graines mûres ne s'échappent plus de leurs épis. Les récoltes s'améliorent. Il a fabriqué des plantes domestiques incapables de se reproduire seules, mais bien adaptées à sa consommation. Il a découvert la *sélection artificielle*. L'agriculture était née. Plutôt que de chasser les bovidés, il devenait plus commode d'en capturer quelques-uns, de les nourrir de grains et de les laisser se reproduire. L'élevage se développe avec

l'agriculture. L'homme se met alors à boire le lait des bovidés, ajoutant un complément substantiel à sa nourriture.

En quelques siècles la base de subsistance de notre espèce avait complètement changé. On appelle cela la révolution *néolithique*. Si tout s'était passé comme avant, le genre *Homo* aurait dû disparaître. Au bout de quelques dizaines de milliers d'années, quelques rares individus auraient sans doute survécu grâce à une adaptation *génétique* aux céréales, comme celle des oiseaux ou des bovidés. Un nouveau genre serait apparu de la même façon que sont nés les premiers *australopithèques*. Pour la première fois, une espèce animale avait complètement changé de nourriture sans évolution notable de ses *gènes*, et cela en quelques centaines d'années seulement.

Survenue il y a dix mille cinq cents ans au Moyen-Orient, la révolution *néolithique* se répand en Égypte et dans toute l'Europe. Mille ans plus tard, une révolution similaire se produit indépendamment en Chine et s'étend à l'Inde. Colonisée plus tardivement par l'homme, l'Amérique traverse à son tour cette révolution d'abord au sud, il y a cinq mille cinq cents ans, puis au nord mille ans plus tard. Le passage des fruits aux racines nous avait lentement transformés de grands singes en *australopithèques*. Le passage des racines à la viande nous a peu à peu faits hommes. Le passage de la viande au lait et aux céréales s'opère en quelques siècles et, fait unique dans l'Histoire de l'évolution, laisse chaque fois nos *gènes* pratiquement inchangés.

Que s'est-il passé ? Thermodynamiquement, l'Homme a soudainement disposé d'une nouvelle source d'énergie, les céréales, liée à l'acquisition d'informations nouvelles. Jusqu'au *néolithique*, cette acquisition se faisait dans les *gènes*, c'était l'adaptation *génétique* à une nourriture nouvelle. Au *néolithique*, cette acquisition s'est faite pour la première fois dans le cerveau, c'est l'adaptation *culturelle*. L'homme s'est adapté aux céréales, non pas par une évolution de ses *gènes*, mais par une évolution de ses connaissances. Non seulement il a appris à cuire ses aliments, il a aussi appris à les conserver l'hiver. Ce que l'écureuil ou la fourmi font *génétiquement*, il le fait *culturellement*. De *génétique* l'évolution de l'Homme est devenue *culturelle*. Thermodynamiquement, les phénomènes restent les mêmes. Seul le lieu où l'information est mémorisée diffère.

11.4. La formation d'espèces culturelles

Le passage d'une évolution de type *génétique* à une évolution de type *culturelle* est devenu possible grâce à l'extraordinaire développement du cerveau humain. La capacité de mémoire de notre cerveau est difficile à évaluer, mais la plupart des estimations qui ont été faites²⁸ montrent qu'elle est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle de nos *gènes*. Cependant, alors que l'information contenue dans nos *gènes* est transmise à nos descendants directement à leur naissance, celle contenue dans notre cerveau ne l'est que progressivement ensuite par l'éducation. Nous avons vu que, chez les animaux évolués, ce transfert se fait par imitation des parents. L'espèce *Homo sapiens* semble avoir été la première à développer un langage évolué. Grâce au langage, la quantité d'information transmise des parents aux enfants a pu devenir supérieure à celle transmise par les *gènes*. L'évolution est alors naturellement devenue *culturelle*.

Une telle transition permet d'expliquer un certain nombre d'anomalies de notre espèce qui, sans cela, resteraient inexpliquées. La première anomalie est que le genre *Homo* ne consiste plus qu'en une seule espèce, la nôtre. Nous avons vu que pour subsister, une espèce doit évoluer le plus vite possible. C'est l'effet de la *reine rouge* (section 6.1). Une espèce qui n'évolue plus assez vite s'éteint. Au *néolithique*, une adaptation à une nouvelle nourriture qui *génétiquement* aurait demandé des dizaines de milliers d'années, s'est accomplie *culturellement* en en quelques siècles seulement, c'est-à-dire cent fois plus vite. Une telle adaptabilité conférait à l'espèce *Homo sapiens* une prépondérance complète sur toutes les autres espèces animales, plus particulièrement sur les autres espèces *Homo* avec lesquelles elle était en compétition directe. Grâce à cette adaptabilité exceptionnelle, l'*Homo sapiens* a vraisemblablement pris toutes les *niches écologiques* occupées par les autres espèces *Homo*, entraînant leur extinction. C'est l'explication que nous avons donnée plus haut à la disparition de l'homme de Néandertal. Il semble en effet que morphologiquement celui-ci n'avait pas les facultés d'élocution de l'*Homo sapiens*.

La seconde anomalie est que l'espèce *Homo sapiens* est la seule espèce animale ayant une propension à exterminer ses semblables. Tout *gène* qui aurait tendance

28. Voir par exemple : Ray Kurzweil, « *The singularity is near* », Penguin Books (2005).

à développer une telle propension mettrait en effet l'espèce qui le possède en danger. Il serait donc rapidement éliminé. Ce n'est plus le cas pour notre espèce qui est devenue prépondérante. Bien au contraire, l'évolution étant devenue *culturelle*, notre espèce *génétique* s'est subdivisée en genres puis en espèces culturelles différentes qui se sont affrontées. Ce sont les civilisations et les sociétés humaines. Nous avons vu que, survenue au Moyen-Orient, la révolution *néolithique* s'est poursuivie en Europe, puis successivement en Chine, en Inde, en Amérique et en Afrique, donnant à chaque fois naissance à de nouvelles civilisations. Comme le font les espèces animales, celles-ci se sont développées plus ou moins rapidement suivant l'environnement.

De même qu'en biologie il y a des proies et des prédateurs, de même sont apparues des civilisations proies et des civilisations prédatrices. Encore aujourd'hui, ces faits sont souvent interprétés en termes de différences raciales, ce qui sous-entend des différences *génétiques*. Faut-il rappeler que près de 99 % du *génom*e humain est identique à celui du chimpanzé et qu'il suffit qu'un seul de nos *gènes* diffère parmi des dizaines de milliers pour changer la couleur de nos yeux, de notre peau ou de nos cheveux ?

Nous sommes très sensibles aux apparences visuelles. Parmi deux individus de couleur différente, un aveugle sera incapable de distinguer lequel est blanc et lequel est noir, si tous les deux ont été élevés de la même façon par la même famille. Les deux parleront la même langue avec le même vocabulaire et le même accent. Ils auront le même héritage *culturel*. Par contre ce même aveugle distinguera sans problème deux Français élevés, l'un dans le sud, l'autre dans le nord, par leurs accents *culturellement* différents.

Clairement, nous faisons tous partie de la même espèce biologique *Homo sapiens* et, en biologie, les membres d'une même espèce s'entretuent rarement. Nous nous entretenons parce que notre évolution n'est plus *génétique*, mais *culturelle* et que, *culturellement*, nos civilisations sont différentes. Ainsi deux individus qui ne parlent pas la même langue, utilisent un code « *mémétique* » différent. Ils sont, *culturellement*, comme des organismes dont les codes *génétiques* seraient différents !

L'étude des langues permet, comme celle des *gènes*, de reconstituer les migrations passées de l'Homme. C'est ainsi qu'un linguiste italien, Luigi Luca Cavalli-Sforza est devenu généticien. Par l'étude des *gènes*, il a pu confirmer

la plupart des résultats établis par les linguistes, mettant ainsi directement en évidence l'évolution *culturelle* de l'Homme alors que celle-ci supplantait peu à peu son évolution *génétique*. Pour Cavalli-Sforza, l'évolution de l'Homme est clairement devenue *culturelle*²⁹.

Il existe enfin une troisième anomalie dont l'évolution *culturelle* rend compte³⁰. L'Homme est le seul animal évolué à former des sociétés capables de coordonner l'activité de millions d'individus. Cette capacité est due au fait que l'information *culturelle* se transmet aussi bien horizontalement (entre deux individus d'une même génération) que verticalement (d'un individu à ses descendants) alors que nos *gènes* ne se transmettent que verticalement. L'évolution *culturelle* de l'Homme apparaît ainsi comme étant au même stade que l'évolution *génétique* des bactéries. De même que les bactéries d'une même souche tendent à former des *colonies*, de même les êtres humains appartenant à une même civilisation tendent à former des sociétés à l'intérieur desquelles ils coordonnent leurs activités.

Si les sociétés humaines peuvent ressembler aux sociétés d'insectes, c'est bien qu'il existe un processus de *sélection de parentèle*, mais celle-ci n'est plus de nature *génétique*, elle est de nature *culturelle*. Dans ces conditions, le degré d'altruisme entre deux êtres humains n'est plus essentiellement déterminé par la proportion de *gènes* communs, mais par la proportion de *culture* commune. La fraternité *culturelle* éclipse la fraternité *génétique*. Elle se manifeste tout particulièrement dans les pays ayant développé une éducation nationale, commune à tous les enfants. Elle explique les sentiments et les actes patriotiques.

29. Voir : Luca Cavalli-Sforza, « *Évolution biologique, évolution culturelle* », Odile Jacob (2005).

30. On pourrait citer une quatrième anomalie : la ménopause. À l'exception, semble-t-il, des singes Bonobos, celle-ci n'existe pas chez les animaux. Elle permet à la femme âgée de continuer à jouer un rôle dans la transmission d'informations culturelles.

IV

L'évolution culturelle

12. Les lois de l'évolution culturelle

Il n'y a pas de coopération sans échange d'information. Une coopération peut naître d'échanges réciproques et s'étendre parmi des individus en compétition. Lorsqu'elle se développe, la coopération accroît le besoin d'échanger et de mémoriser de l'information. Nées de ce besoin, l'écriture et la monnaie ont facilité la transmission des richesses matérielles et *culturelles*.

Chez l'Homme, les règles d'héritage jouent le rôle des règles de transmission des *gènes* en biologie. Des époques de coopération alternent avec des époques de compétition. De même que les espèces biologiques s'éteignent, les sociétés humaines s'effondrent.

12.1. Le dilemme du prisonnier

Le problème du choix entre compétition et coopération n'a cessé d'être présent tout au long de l'histoire des sociétés humaines. Il s'est posé de façon particulièrement aiguë en Angleterre au XIX^e siècle à propos des pâturages communaux. À cette époque un individu pouvait parfaitement vivre du lait de sa vache. Imaginons un pâturage communal permettant à deux individus d'y faire paître convenablement chacun une vache. Un des individus peut décider de faire des économies et d'acheter une deuxième vache. Il pourra ainsi doubler ses revenus. L'inconvénient est que chaque vache aura 1/3 d'herbe en moins à brouter. Cet inconvénient peut lui paraître acceptable en regard du bénéfice escompté. En l'absence de réglementation, il achètera donc une deuxième vache. À court terme celle-ci lui apportera sans doute un bénéfice. Le problème est que l'autre individu n'appréciera pas cette démarche et, s'il le peut, en fera autant. Tôt ou tard, le nombre de vaches augmentant, le pâturage deviendra insuffisant.

À cette époque, le problème avait été soulevé par un économiste anglais, William Forster Lloyd. L'analyse de Lloyd a été reprise au XX^e siècle par Garrett

Hardin dans un article publié en 1968 dans *Science*³¹ sous le titre de « *The tragedy of the commons* », c'est-à-dire « La tragédie des biens communs ». Hardin montre que l'analyse de Lloyd s'applique d'une façon générale à tous les problèmes liés à la surpopulation, tels que l'épuisement des ressources naturelles ou la pollution. Le problème vient du fait que l'optimum pour un ensemble d'individus n'est pas le même que pour chacun d'entre eux. Mathématiquement, on ne peut pas optimiser un système en optimisant chacune de ses parties.

Ce théorème mathématique contredit les affirmations d'Adam Smith. Selon cet économiste anglais, un individu poursuivant uniquement son intérêt particulier serait conduit « comme par une main invisible » à promouvoir l'intérêt général. Les théories économiques libérales en vogue aujourd'hui et dont Adam Smith est le père semblent donc viciées à la base. Les économistes libéraux s'en défendent en disant qu'Adam Smith n'a jamais prétendu que l'intérêt particulier coïncidait dans tous les cas avec l'intérêt général. Pour eux, la solution à la tragédie des biens communs est simplement la privatisation, c'est-à-dire la compétition. Pour d'autres, la solution est la coopération. Elle implique une exploitation des biens en commun, grâce à l'imposition d'une réglementation admise par tous, c'est-à-dire un pouvoir démocratique.

Le problème du choix entre compétition et coopération est connu des mathématiciens, spécialistes de la théorie des jeux, sous le nom de « dilemme du prisonnier ». Tel qu'il a été posé en 1950 par Melvin Dresher et Merrill Flood, le problème concerne deux prisonniers ne pouvant pas communiquer entre eux. Chacun d'entre eux est accusé d'avoir commis un délit passible de dix ans de prison. Interrogés, ils hésitent entre rivaliser (en dénonçant l'autre) ou coopérer (en couvrant l'autre). Aucun des deux ne connaît le choix de l'autre. Ils savent que si chacun dénonce l'autre, le juge partagera la peine en deux en condamnant chacun à 5 ans de prison. Par contre, si chacun des deux couvre l'autre en disant qu'il est innocent, alors, dans le doute, le juge ne condamnera chacun qu'à 6 mois de prison. Clairement, ils ont un énorme avantage à coopérer. Malheureusement, si l'un coopère en innocentant l'autre, mais que l'autre ne coopère pas et accuse le premier, alors, le doute étant levé, l'accusé récoltera 10 ans de prison et l'autre, innocenté, sera libéré.

31. *Science*, 162, pp.1243-1248 (1968).

Chacun des deux prisonniers réfléchit à la meilleure stratégie possible. Leur situation étant identique, chacun des deux se dit : « Si l'autre me dénonce et que je coopère, j'aurai la peine maximale de 10 ans de prison, mais si je ne coopère pas je n'aurai que 5 ans de prison. Si l'autre coopère et que j'en fais autant, j'aurai 6 mois de prison, mais si je ne coopère pas, je serai libéré. Dans tous les cas de figure, je n'ai pas intérêt à coopérer. » Ainsi, bien que l'ensemble des deux prisonniers ait un énorme avantage à coopérer, aucun des deux ne va prendre ce risque. En l'absence d'échange d'information, chaque prisonnier va choisir la stratégie optimale pour lui, mais pas pour le groupe.

Mathématiquement, le problème est du même type que celui analysé par Lloyd lorsque deux partenaires se partagent l'usage d'un bien communal. Au lieu de rémissions de peine, ceux-ci acquièrent des avantages en nature plus ou moins importants. D'une façon générale, la solution au problème du dilemme du prisonnier repose sur le degré de confiance qu'on peut avoir en son partenaire. Mathématiquement, cela veut dire connaître sa probabilité de coopérer. Celle-ci ne peut être évaluée qu'à l'usage. C'est pourquoi un universitaire américain, spécialiste de politique, Robert Axelrod³² a considéré un « dilemme du prisonnier itéré » dans lequel le même type de situation se répète indéfiniment. Il a incité ses collègues mathématiciens, économistes, sociologues et même psychologues à proposer chacun une stratégie sous forme d'un logiciel. Il a ensuite mis tous ces logiciels (une soixantaine) en compétition deux à deux. À chaque itération le gain d'un partenaire est donné par une table des gains qui tient compte du choix de l'autre partenaire. Le gain final est la somme des gains obtenus à chaque itération. Sur environ 150 itérations, aucun des logiciels proposés n'a été constamment vainqueur. Parmi toutes les stratégies proposées, l'une d'entre elles s'est cependant montrée systématiquement supérieure aux autres, la plus simple, c'est-à-dire celle dont l'algorithme est le plus court. On peut qualifier cette stratégie de « donnant-donnant ». Elle consiste à coopérer la première fois puis à adopter ensuite le dernier choix fait par l'autre partenaire.

Le résultat de cette étude montre que la coopération peut apparaître dans un monde d'individus égoïstes, initialement tous rivaux les uns des autres et

32. Robert Axelrod, « *The evolution of cooperation* », Basic Books (1984).

cela, sans intervention d'aucune autorité extérieure. La coopération ne se développe que s'il y a interaction à long terme entre un petit nombre d'individus coopérant de façon réciproque. Elle peut alors s'étendre et se maintenir, quelles que soient les stratégies adoptées par les autres individus. Elle conduit à la formation de groupes d'individus coopérant entre eux et partageant la même stratégie.

Pour qu'une stratégie puisse l'emporter, il faut qu'elle coopère efficacement avec elle-même. C'est le cas de la stratégie « donnant-donnant ». Elle consiste à coopérer tant que les autres coopèrent. Il faut aussi qu'elle ne puisse pas être mise en échec par une stratégie différente. C'est encore le cas de la stratégie « donnant-donnant ». Elle n'essaye pas de coopérer avec les individus qui ne coopèrent pas. Il est remarquable qu'une stratégie aussi simple puisse petit à petit développer un noyau stable de coopération qui a tendance à s'étendre en dépit de stratégies adverses. Le logiciel ne comporte que cinq instructions. Il est suffisamment simple pour pouvoir être mémorisé dans quelques *gènes*. On comprend ainsi pourquoi un mécanisme de coopération a pu apparaître chez les bactéries. La stratégie « donnant-donnant » est en fait une stratégie d'imitation. À chaque itération, l'individu imite ce qu'a fait son partenaire à l'itération précédente³³. On comprend alors pourquoi la faculté d'imitation s'est peu à peu développée d'abord *génétiquement* puis *culturellement*.

12.2. L'écriture et la monnaie

L'analyse précédente montre que la coopération permet d'obtenir des gains supérieurs à ceux de la compétition. Thermodynamiquement, elle rend la dissipation d'énergie plus efficace. Mais elle a un inconvénient : elle est très lente à établir. Elle requiert de constants échanges d'informations.

Lorsque la nourriture est abondante, la compétition est la solution la plus simple. En biologie, c'est celle de la *sélection naturelle* entre les individus. Mais

33. La stratégie est d'autant plus efficace que l'information échangée est transmise verticalement d'un individu à ses descendants. C'est le cas de l'Homme et des bactéries. Dans un écosystème, les échanges d'information ne sont transmis verticalement que s'il y a modification génétique. Il peut alors y avoir formation d'une symbiose.

lorsque la nourriture se fait rare, les individus qui coopèrent ont bien plus de chances de survivre que ceux qui ne le font pas. Si un chasseur peut attraper un lièvre, trois chasseurs peuvent attraper un bien plus gros gibier que trois lièvres : ils peuvent attraper un mammouth. Une spécialisation des tâches leur permet d'y parvenir.

Comparés à la chasse, l'agriculture et l'élevage ont demandé une spécialisation encore plus poussée. Il n'est donc pas étonnant qu'elles aient entraîné la formation de véritables sociétés. À l'intérieur d'une même société, les individus coopèrent en échangeant de l'information, c'est-à-dire en développant un ensemble de connaissances communes appelé *culture*. Dans le cas des premières sociétés, cette information portait sur la *culture* des champs. Ce n'est donc pas par hasard si le mot *culture* a pour origine une forme de culture particulière : l'agriculture.

Nous avons comparé ces échanges d'information à ceux des neurones dans un cerveau et montré qu'il y avait formation d'un cerveau global avec émergence d'une intelligence collective. C'est vrai pour les *colonies* de bactéries ou les sociétés d'insectes, a fortiori pour les sociétés humaines. Le problème se pose alors du partage des richesses. Pour éviter tout malentendu, lorsqu'un accord est conclu, il est important de le mémoriser. C'est d'autant plus important que si un partenaire meurt, l'accord doit pouvoir s'étendre à ses descendants.

Inévitablement nos ancêtres ont dû trouver un moyen fiable de pérenniser leurs accords. Il était naturel de le faire en gravant l'information dans la pierre. L'écriture était née. La pierre se grave en frappant un coin à l'aide d'une masse, d'où les premières écritures dites *cunéiformes*. Dans le cas d'une reconnaissance de dette, il était prudent de la garder sur soi. Une petite pierre gravée faisait l'affaire. La monnaie était née. La pierre étant difficile à graver, l'usage se répandit rapidement d'utiliser l'argile. On pouvait rendre ensuite la gravure plus permanente grâce à la cuisson. C'est ce qu'on fait les Sumériens, plus de trois mille ans avant notre ère.

L'écriture a d'abord été utilisée pour la comptabilité. La nature de l'objet comptabilisé était représentée par des dessins sommaires. Ce furent les premiers idéogrammes. Peu à peu le problème se posa de représenter des mots abstraits. Inévitablement, il a fallu en venir à une représentation phonétique comme, par exemple, une combinaison de mots concrets se prononçant de

la même façon. La lecture s'apparenta à un déchiffrement de rébus. Lecture et écriture furent réservées à un petit groupe de scribes au service d'un prince ou d'un grand prêtre. Aux inégalités de richesses se sont rapidement jointes les inégalités *culturelles*. Le même phénomène s'est produit indépendamment en Chine et dans plusieurs autres pays, après la naissance de l'agriculture.

Un peu plus de mille ans avant notre ère, un progrès remarquable a été accompli avec l'adoption par les Phéniciens d'un code scriptural facile à mémoriser. Ce code purement phonétique comportait seulement 22 caractères ou lettres. Pour en faciliter la mémorisation, d'une part les lettres furent ordonnées dans une séquence fixe apprise par cœur, d'autre part le nom et la forme de la lettre étaient ceux de l'objet dont le premier son est celui de la lettre. C'est ainsi que la première lettre, aleph, désignait le son « a » et était représentée par une tête de bœuf (aleph en phénicien). Aleph a donné la lettre grecque alpha, puis notre lettre A. On reconnaît toujours, dans notre A majuscule, le museau du bœuf pointant vers le haut et les deux cornes pointant vers le bas. La seconde lettre, beth (la maison en phénicien) a donné bêta en grec, puis notre lettre B. La suite alpha bêta a donné le mot « alphabet ». La troisième lettre phénicienne guimel ou gamel (*camel* en anglais, qui a donné chameau en français) est devenue gamma en grec. Plus tard, les romains en feront deux lettres C et G, afin d'en distinguer la forme sonore de la forme sourde. Les Grecs ont aussi complété l'alphabet phénicien en y ajoutant des voyelles. L'apprentissage de la lecture devenant aisé, la proportion d'individus sachant lire et écrire a fait un grand bond en avant. Il devenait possible d'échanger des messages à distance et dans le temps. Ce progrès s'est avéré décisif pour le développement de la civilisation occidentale.

Si les *gènes* permettent de transmettre l'information mémorisée par la cellule et le langage celle mémorisée par le cerveau, l'écriture permet de transmettre l'information mémorisée par la société, tout particulièrement à ses descendants. Cela suppose toutefois une bonne alphabétisation de la population. Bien qu'ayant atteint un niveau assez élevé à l'apogée de l'Empire romain, elle n'a pas résisté à son effondrement. Elle n'a repris en Europe qu'au XVI^e siècle, avec le perfectionnement de la typographie. On assiste alors, en deux siècles, à la formation d'un cerveau global reliant un ensemble d'individus alphabétisés parlant tous une langue commune : c'est le siècle des Lumières (voir Introduction).

12.3. Les règles de transmission culturelle

De même que l'évolution des espèces dépend des règles de transmission des *gènes*, de même l'évolution des sociétés humaines dépend des règles d'héritage. Celles-ci ont été étudiées par des sociologues, notamment par le français Emmanuel Todd. Elles concernent aussi bien les richesses matérielles que les richesses *culturelles*. Pour chacune des deux, la transmission peut s'effectuer de deux manières différentes.

La transmission matérielle peut être égalitaire ou inégalitaire. Elle est égalitaire lorsque l'héritage est partagé en parts égales entre tous les enfants. Dans le cas contraire (droits d'aînesse, etc.), elle est inégalitaire. La transmission *culturelle* peut être autoritaire ou libérale. Elle est autoritaire si l'un des parents (le plus souvent le père) impose sa façon de vivre à tous ses descendants. Elle est libérale dans le cas contraire.

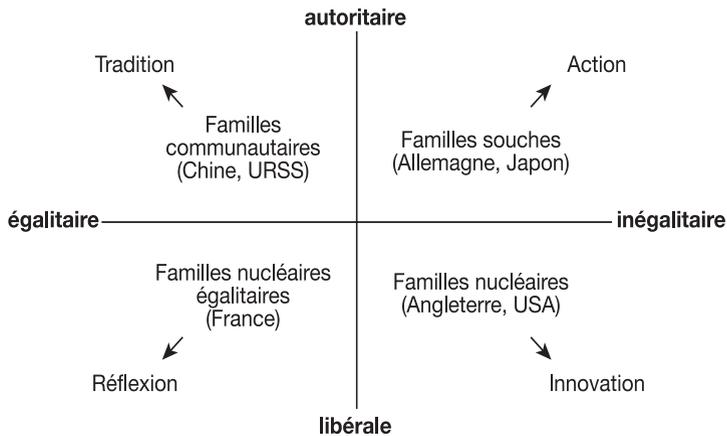


Figure 10. Les quatre types de famille (selon E. Todd).

Sur la figure 10, la manière dont une société évolue est représentée par un point ayant pour coordonnées les fréquences respectives avec lesquelles ces règles sont respectées. On distingue ainsi quatre régions correspondant à quatre types de familles :

- les familles communautaires (autoritaires-égalitaires)
- les familles souches (autoritaires-inégalitaires)
- les familles nucléaires (libérales-inégalitaires)
- les familles nucléaires égalitaires (libérales-égalitaires)

La figure 10 montre des pays où chacun de ces types de famille sont particulièrement abondants. Emmanuel Todd a étudié la distribution géographique de ces types de famille en Europe et a montré que les votes politiques des différentes régions correspondent au type de famille qui y domine. Ainsi, à chaque type de famille, correspond une idéologie politique différente. Clairement, les familles communautaires sont sensibles à l'idéologie communiste, tandis que les familles nucléaires sont sensibles à l'idéologie libérale. Historiquement, ces idéologies correspondaient à des modes de vie familiale différents. Biologiquement, elles correspondent à des stratégies de survie différentes. La stratégie n'est pas la même suivant qu'on est propriétaire de la terre ou non, fermier ou métayer.

Nous avons vu que chez l'Homme l'information *culturelle* jouait le rôle de l'information *génétique* en biologie. Il est donc tentant de comparer leurs règles de transmission respectives, c'est-à-dire le diagramme de la figure 10 avec celui de la figure 7 (section 7.4). Cela est possible moyennant deux hypothèses. La première hypothèse est que la transmission inégalitaire des richesses joue le rôle du taux de mutations. Elle favorise en effet la reconversion. Dans un pays capitaliste, un enfant qui n'hérite pas des moyens de production de ses parents doit se reconvertir, c'est-à-dire exercer un autre métier que celui des parents. La deuxième hypothèse est que la transmission autoritaire du mode de vie maintient un haut degré de *culture* commune, tandis que le libéralisme favorise la diversité *culturelle*.

Si l'on admet ces deux hypothèses, alors l'idéal des familles nucléaires correspondrait à celui de la compétition en biologie. C'est en effet le mode de fonctionnement de l'idéologie libérale, en partie inspirée par le « darwinisme social » de Herbert Spencer. L'idéal des familles communautaires correspondrait alors au processus de *symbiose* en biologie. Entre ces deux modes de fonctionnement, il y a deux intermédiaires possibles : celui des familles souches qui coopèrent en incitant les individus à s'adapter au groupe en s'identifiant à lui, et celui des familles nucléaires égalitaires qui incitent les

groupes à s'adapter aux individus en respectant les initiatives personnelles. On retrouve ces deux intermédiaires en sociologie (section 13.6).

Nous avons comparé l'évolution d'une société au fonctionnement d'un cerveau. On peut pousser l'analogie plus loin en identifiant chaque quadrant de la figure 10 à un mode de fonctionnement différent de ce cerveau, comme indiqué par les flèches. Le mode autoritaire-égalitaire maintient la tradition en l'imposant également à tous les descendants, tandis que le mode libéral-inégalitaire favorise l'innovation. Le mode autoritaire-inégalitaire favorise l'ordre et la subordination, c'est-à-dire les organisations hiérarchiques. Ce mode favorise le passage à l'action. Au contraire, le mode libéral-égalitaire laisse la voie libre à toutes les éventualités. Il favorise la réflexion.

On reconnaît dans ces différents modes la démarche de l'esprit humain. Nous réfléchissons avant de passer à l'action et nous hésitons entre faire comme tout le monde ou innover. Notre cerveau erre constamment entre ces différents modes. C'est bien là le comportement d'un *attracteur étrange* tel qu'il est décrit à la section 7.5 et modélisé par la roue de la section 18.4.

On peut de même comparer une politique gouvernementale décidée démocratiquement à la démarche d'un cerveau global dont les individus seraient les neurones. Il est clair qu'aucune de ces quatre démarches du cerveau ne peut être une fin en soi. Nous devons sans cesse passer de la réflexion à l'action et mélanger la tradition à l'innovation. De même aucune idéologie politique ne détient la vérité. Une société doit être capable, suivant les circonstances, de passer facilement d'une idéologie à une autre. C'est le rôle des changements de gouvernement. Individuellement, chacun de nous s'accroche affectivement à ses idées, comme nos neurones maintiennent leur état jusqu'à ce que des neurones voisins les fassent éventuellement changer. Mais collectivement, le « cerveau » d'une nation doit être capable d'évoluer aussi vite que l'environnement. Lorsqu'il ne le fait pas, la nation est en danger.

12.4. L'auto-organisation des sociétés humaines

Nous avons vu que le processus d'avalanches s'applique aux sciences humaines (section 3.4). Au hasard des rencontres, deux individus partagent les mêmes

préoccupations et sympathisent. C'est le point de départ d'une collaboration. Le plus souvent, dès que la collaboration apporte ses fruits, des rivalités naissent et la collaboration s'arrête, mais parfois d'autres individus se joignent au projet. Une *culture* commune se développe. On parle de *culture* d'entreprise. Des collaborations s'établissent entre les entreprises. Des relations se tissent entre les individus d'autant mieux qu'ils parlent la même langue. Ils développent une *culture* commune. Les nations européennes se sont développées ainsi. Lorsque des États différents partagent une *culture* commune, ils ont tendance à s'unir. Ainsi sont nés les États-Unis d'Amérique. Cela a conduit au prodigieux essor de l'économie américaine. De nos jours, l'anglais devient la langue des relations internationales. Il a permis aux nations européennes de s'unir afin d'améliorer leur économie.

Nous avons vu que l'évolution de l'humanité est une évolution *culturelle* (section 11.4). De même qu'une espèce animale est caractérisée par ses *gènes*, une civilisation est caractérisée par sa *culture*. Si, en biologie, la *sélection naturelle* s'applique aux *gènes*, en sociologie, elle s'applique à la *culture*. Elle favorise la ou les civilisations qui dissipent le plus d'énergie. Dans un environnement stable, ces civilisations se développent et grossissent. Comme toutes les *structures dissipatives*, elles s'auto-organisent en s'adaptant à leur environnement pour maximiser la production d'*entropie*. En physique, le processus correspond à la formation de *domaines d'Ising* de plus en plus grands. En biologie, ce processus porte le nom de sélection K (section 6.4). Il correspond à l'apparition de grands arbres, de grands dinosaures ou de mammoths. En Histoire ancienne, un bon exemple est la formation de l'Empire romain. En Histoire moderne, on peut citer la formation des grands empires coloniaux ou celle de l'Union soviétique.

Une société dans cet état se caractérise par l'extension de sa *culture*. Elle s'étend aux pays voisins. Les immigrants tendent à adopter la *culture* du pays d'accueil et à se fondre dans la société. Les différences *culturelles* s'estompent. Nous avons vu que les insectes qui ont des *gènes* communs développent un comportement *altruiste* (section 7.1). Il en est de même des individus qui ont une *culture* commune. À la manière des abeilles ou des fourmis, ils coopèrent entre eux. Ils sont fiers de leur *culture* et la transmettent à leurs enfants. Ils sont prêts à sacrifier leur vie pour la défendre. C'est le patriotisme.

La biologie nous apprend que les espèces qui prolifèrent sont rapidement soumises à l'effet de la *reine rouge* (section 6.1). Plus une espèce dissipe d'énergie, plus vite son environnement évolue et plus vite elle doit se réadapter. Pour les sociétés humaines, l'évolution de l'environnement se traduit généralement par l'épuisement des ressources naturelles et la pollution. Historiquement, elle s'est traduite par l'épuisement des sols et la déforestation suivie d'érosion. De nos jours on s'inquiète de l'épuisement des *énergies fossiles* et des ressources minières, mais aussi de l'évolution du climat³⁴ et de la perte de biodiversité³⁵. On doit bien entendu inclure également l'évolution des autres sociétés humaines avec lesquelles la société considérée est en compétition. Il est important de noter que cette évolution de l'environnement est en grande partie imprévisible, car liée à des processus d'auto-organisation qui sont eux-mêmes difficiles à anticiper (section 2.5).

Les structures dissipatives soumises à l'effet de la *reine rouge* atteignent rapidement un état dit *critique* de production maximale d'*entropie*. La vitesse à laquelle une structure dissipative s'adapte étant finie, l'adaptation aux changements de l'environnement devient de plus en plus difficile. L'auto-organisation se poursuit, mais elle a de plus en plus de difficultés à s'adapter aux changements de l'environnement. Les économistes parlent de rendements décroissants. La production d'*énergie libre* devient de plus en plus difficile. Dans le cas d'une société humaine, l'économie commence à stagner. Nous verrons (section 13.3) que les inégalités de richesses suivent alors une loi de puissance (la loi de Pareto). Les classes dirigeantes ne peuvent conserver leur statut économique et social qu'en essayant de maintenir la croissance économique, mais celle-ci accélère l'évolution de l'environnement. Les investissements ne sont plus productifs. La société s'endette. Les grosses entreprises font faillite. La classe moyenne s'effondre. Les crises sociales, économiques et financières se succèdent. La société devient instable (les physiciens diraient que son évolution devient chaotique).

Une société dans cet état perd peu à peu sa cohésion. La compétition à court terme l'emporte sur la coopération à long terme. Cherchant à s'adapter aux

34. Pour l'effet de l'évolution du climat sur les sociétés humaines, lire « *Les guerres du climat* » de Harald Welzer, Gallimard, 2009.

35. Franz Broschimmer et Jean-Pierre Berlan parlent d'écocide, c'est-à-dire d'assassinat des espèces biologiques.

changements de l'environnement, les comportements s'individualisent. Les cultures se diversifient. Au lieu de se fondre, elles s'isolent les unes des autres. C'est le phénomène de « ghettoïsation » des cités ou des banlieues. Les sectes religieuses prolifèrent. Le biologiste Konrad Lorenz avait remarqué que lorsqu'une espèce animale s'était abondamment développée, les animaux n'éduquent plus leurs enfants. Il en est de même des sociétés humaines. Dans une société d'abondance, l'éducation n'apparaît plus comme nécessaire. La tendance est au « laisser-faire ». Peu éduqués, les enfants développent un comportement narcissique qui les pousse à la compétition. La *sélection naturelle* favorisera les plus aptes à survivre dans le nouvel environnement.

Une *structure dissipative* au *point critique* est très sensible à son environnement. La moindre fluctuation de ce dernier peut déclencher une cascade plus ou moins importante d'événements (avalanches) qui la ramène sans cesse au *point critique*. C'est le processus de *criticalité auto-organisée*. Ces « avalanches » conduisent à des restructurations de sociétés comme les séismes conduisent à une restructuration de la croûte terrestre. Leur ampleur est inversement proportionnelle à leur fréquence. Dans le cas des sociétés humaines, on observe souvent des restructurations mineures sous la forme de nouvelles régulations. Leur coût économique rend généralement caduque l'amélioration de l'économie qu'elles procurent. Elles maintiennent la production d'*énergie libre*, sans l'améliorer notablement. Imposant sans grand effet de nouvelles contraintes aux individus, ces ajustements bureaucratiques sont souvent de plus en plus mal perçus. Des « tensions sociales » se développent. Ces tensions provoquent souvent des événements plus importants, comme des changements de gouvernement. Occasionnellement, des révoltes entraînent des changements de régime. Exceptionnellement on assiste à des révolutions ou à des guerres, entraînant une remise en cause des sociétés existantes avec parfois des destructions plus ou moins importantes. Encore plus rarement, c'est toute une civilisation qui disparaît. On parle alors d'effondrement.

Très souvent, la remise en cause d'une société se traduit par des scissions. L'Empire romain et, plus récemment, les empires coloniaux ou l'URSS ont été remplacés par des structures plus petites, chacune autonome. C'est ce qu'en physique nous avons appelé le « *recuit* » (section 4.5). Il permet à la

production d'*entropie* d'échapper à un optimum secondaire pour partir à la recherche d'un optimum supérieur. En biologie, ce processus porte le nom de sélection r (section 6.4). On l'observe lorsque les grands arbres sont remplacés par la savane, ou les dinosaures par de petits mammifères. Parmi ces nouvelles structures, certaines vont s'étendre à leur tour en dissipant encore plus efficacement l'énergie.

Cette alternance entre des périodes de croissance économique et des périodes de stagnation rappelle le phénomène des *équilibres ponctués* de Jay Gould (section 6.3). On l'observe tout le long de l'« *Histoire humaine* » (chapitre 14). Nombreux sont les historiens et anthropologues qui ont cherché à en comprendre l'origine. Parmi les auteurs modernes, on peut citer les plus connus : Arnold J. Toynbee (« *A study of History* »), Joseph A. Tainter (« *The collapse of complex societies* ») et, plus récemment, Jared Diamond (« *Collapse* »). La biologie en donne une explication. Le phénomène est de même nature que l'alternance entre les périodes de macro-évolution (sélection K) et les périodes de micro-évolution (sélection r) observées en biologie. À travers la biologie, on peut remonter à l'origine physique du phénomène : c'est le processus de *criticalité auto-organisée*, un processus naturel de dissipation d'énergie grâce auquel l'univers lui-même s'auto-organise. Les différents aspects de ce processus sont résumés sur le tableau 1.

Thermodynamiquement, ce processus a deux aspects. Le premier est informationnel. Il est lié à la diminution d'*entropie*, c'est-à-dire à la manière dont une société s'auto-organise. En sciences humaines, cet aspect est l'objet d'étude de la sociologie. Le second aspect est énergétique. Il est lié à la production d'*énergie libre*. En sciences humaines, cet aspect est l'objet d'étude de l'économie. Le lecteur aura compris qu'économie et sociologie sont en fait des branches de la thermodynamique ou *mécanique statistique*. Si elles ne sont pas encore perçues comme telles, inéluctablement elles le seront un jour. Au chapitre suivant, nous nous proposons d'étudier les relations entre ces disciplines.

Général	Physique	Biologie	Sociologie
Macroévolution lente.	Formation de grosses structures ordonnées (ordre).	<i>Sélection K</i> : Grands organismes. Efficience.	Solidarité, coopération. Intégration <i>culturelle</i> . Adaptation.
<i>Point critique</i> : Invariance par <i>changement d'échelle</i> . Distributions en lois de puissance.			
Microévolution rapide.	Décomposition en petites structures désordonnées (chaos).	<i>Sélection r</i> : Petits organismes. Résilience.	Individualisme, compétition. Ségrégation <i>culturelle</i> . Adaptabilité.

Tableau 1. Alternance de part et d'autre du *point critique*.

13. Thermodynamique et sciences sociales

L'économie suit les lois de la thermodynamique.

Les flux monétaires sont des flux d'information.

Ils représentent, au signe près, des flux *d'entropie* dans une société. L'économie de marché suit un processus de *criticalité auto-organisée*. Au *point critique* la distribution des richesses est invariante par *changement d'échelle*. Au-delà, les richesses se condensent en deux phases avec apparition de crises économiques et financières. Les lois de la *mécanique statistique* s'appliquent également à la sociologie. Les deux formes de solidarité de Durkheim correspondent aux deux formes biologiques de la *symbiose*.

13.1. Thermodynamique et économie

Le chimiste Frederick Soddy³⁶ semble avoir été le premier à lier les lois de la thermodynamique à l'économie. Dans son livre « *Wealth, Virtual Wealth and Debt* », écrit en 1926, il explique que la monnaie n'est qu'une richesse virtuelle. La véritable richesse est la quantité d'énergie dont on dispose chaque jour, c'est-à-dire la puissance qu'on peut dissiper. Il propose d'abandonner l'étalon or et de lier la monnaie à la dissipation d'énergie en calculant un indice des prix à la consommation. Il explique que tant que les investissements sont rentables, la dissipation d'énergie s'accroît et la société s'enrichit. Lorsqu'ils cessent d'être rentables, la société s'endette. Soddy prédit ainsi la crise de 1929.

Kenneth Boulding³⁷ fut sans doute le premier à attirer l'attention des économistes sur le fait que les ressources naturelles sont limitées. Il est connu pour sa phrase célèbre :

« Celui qui croit qu'une croissance *exponentielle* peut continuer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou soit un économiste ».

36. Frederick Soddy, « *Wealth, Virtual Wealth and Debt* », George Allen & Unwin (1926).

37. Kenneth Boulding, « *The Economics of the Coming Spaceship Earth* » (1966).

C'est cependant Nicholas Georgescu Roegen³⁸ qui a le premier étudié les conséquences du fait que toute dissipation d'énergie entraîne une production d'*entropie*, c'est-à-dire une dégradation des ressources naturelles. Dans son livre intitulé « *The Entropy Law and the Economic Process* », il proclame : « La thermodynamique et la biologie sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique. »

J'espère que le lecteur en est maintenant convaincu. Malheureusement, son ouvrage, écrit en 1971, repose entièrement sur la thermodynamique du XIX^e siècle exposée au premier chapitre. Bien qu'apparemment au courant des travaux de Prigogine et de la relation entre l'information et l'*entropie*, il ne semble pas en avoir apprécié la portée.

De nos jours, quelques économistes comme Robert U. Ayres³⁹ ou Reiner Kummel⁴⁰ continuent à proclamer l'importance des concepts de la thermodynamique en économie, mais la majorité d'entre eux⁴¹ ignorent les travaux de Per Bak ainsi que la loi de production maximale d'*entropie* (appelée ici troisième loi de la thermodynamique) et ses avancées récentes. Nous avons vu que cette loi permet de comprendre l'évolution biologique. Elle me paraît cruciale pour comprendre l'économie.

Celle-ci cherche en effet à optimiser le fonctionnement de la société, mais les économistes ignorent la grandeur à optimiser. Certains ont proposé l'utilité, c'est-à-dire le profit pour le producteur et le bien-être pour le consommateur, mais on ne sait mesurer ni l'utilité ni le bien-être. La modélisation du comportement humain a toujours été la pierre d'achoppement de l'économie. La troisième loi de la thermodynamique résout ce problème. Elle nous apprend que les sociétés humaines s'auto-organisent pour maximiser leur taux de production d'*énergie libre*. Elle permet donc de bâtir une véritable science économique. Un tel travail sort bien entendu du cadre de ce livre. Je me contenterai d'émettre quelques suggestions qui pourraient servir de point de départ.

38. Nicholas Georgescu Roegen, « *The Entropy law and the Economic Process* » (1971).

39. Robert U. Ayres, « *Information, Entropy, and Progress* », *A New Evolutionary Paradigm*, AIP (1994).

40. Reiner Kummel, « *The Second Law of Economics: Energy, Entropy, and the Origins of Wealth* », Springer (2011).

41. Tout récemment un économiste Bernard Lietaer a proposé un modèle économique fondé sur une approche comparable à celle de la thermodynamique des écosystèmes.

13.2. La monnaie

La première remarque concerne la monnaie. Bien que rarement considérée comme telle, la monnaie est une information. C'est une des formes d'information dont l'humanité dispose pour s'auto-organiser. Si l'on suit les conseils de Georgescu Roegen, il est tentant de mettre en parallèle les différents supports d'information d'une société humaine avec ceux utilisés par les organismes vivants, et de comparer leurs rôles respectifs. Je propose l'équivalence suivante :

- ADN : la *culture*. Ensemble des informations mémorisées dans les livres et transmises de génération en génération.
- ARN : le *savoir*. Information *culturelle* mémorisée dans les cerveaux⁴².
- ARN messenger : l'*instruction générale*. Savoir transmis par l'enseignement.
- ARN ribosomique : le *savoir-faire*. Permet d'appliquer le savoir à des besoins particuliers.
- ARN de transfert : l'*instruction technique*. Transmission du savoir-faire.
- Hormone : *média*. Information diffusée à toute la société.
- Enzyme : *investissement monétaire*. Il catalyse la production. Comme tout *catalyseur*, la monnaie empruntée au départ est rendue au prêteur à la fin du contrat. Une structure *autocatalytique* génère son propre financement.
- ATP : *monnaie étalon*. Les biologistes comparent eux-mêmes l'*ATP* à de la monnaie. Dans chaque cellule l'*ATP* est générée par les *mitochondries* qui jouent le rôle des banques.

L'analogie entre les organismes vivants et les sociétés humaines est frappante. Tous les organismes vivants utilisent le même type de « monnaie », l'adénosine triphosphate ou *ATP*, générée par le mécanisme dit de « respiration cellulaire ». La quantité de combustible (sucres) que nos cellules peuvent brûler pour générer l'*ATP* est régulée par une *hormone*, l'insuline, qui agit en fonction des besoins de l'organisme. La production d'*ATP* est donc liée au *métabolisme* de l'organisme, c'est-à-dire au taux d'*énergie libre* que nous produisons. La « monnaie » *ATP* est bien indexée sur la consommation de l'organisme, comme l'a suggéré Soddy pour les sociétés humaines.

42. De même que l'information a été mémorisée dans les cerveaux avant l'apparition de l'écriture, elle a vraisemblablement été mémorisée dans l'ARN avant l'apparition de l'ADN.

13.3. L'auto-organisation de l'économie

Nous avons vu (section 12.1) que la coopération repose sur la confiance. La confiance dans la monnaie est le point de départ de la coopération dans la société. La monnaie est garantie par la société. Elle facilite la division du travail en permettant de coopérer avec des gens qu'on ne connaît pas. Une coopération à grande échelle peut ainsi s'établir grâce aux échanges monétaires. C'est le mécanisme d'auto-organisation de la société décrit par Adam Smith comme étant l'effet d'une main invisible.

Nous avons vu que c'est un processus d'auto-organisation de *structure dissipative*. Il conduit les sociétés humaines à maximiser leur dissipation d'énergie. Chacun d'entre nous y contribue. L'argent que nous dépensons mesure statistiquement notre contribution. Celui que nous dépensons pour notre nourriture mesure les calories qui nous maintiennent en vie. Celui que nous dépensons pour nos notes de gaz, d'électricité ou d'essence, mesure les autres formes d'énergie que nous utilisons. C'est vrai en fait de tout l'argent que nous dépensons, car nous payons le travail de ceux qui ont contribué à la réalisation de ce que nous achetons. Nous leur permettons de vivre, donc de dissiper eux aussi de l'énergie.

Si la valeur monétaire d'une denrée est déterminée par la loi de l'offre et de la demande, la valeur de la monnaie est déterminée statistiquement par l'ensemble de toutes les transactions qui sont faites. La monnaie est donc bien une grandeur statistique. Elle mesure (au signe opposé près) les flux d'*entropie* produits par la société (section 17.10). Pour produire, une société a besoin d'un capital. Ce capital lui permet de s'auto-organiser, c'est-à-dire de diminuer son *entropie* interne. Cette diminution lui permet de produire de l'*énergie libre* et d'engendrer du profit. Elle peut ainsi régénérer le capital investi comme un cycle catalytique régénère ses *enzymes*. En réinvestissant l'excédent de profit, une société minimise son *entropie* interne de façon à maximiser sa production d'*énergie libre*, donc le flux d'*entropie* qu'elle produit. Le PNB (Produit national brut) d'un pays est une mesure approximative du flux d'*entropie* de ses habitants.

Dans une économie de marché, un capital permet d'investir. Lorsqu'un investissement est rentable, il améliore le profit. On peut alors investir davantage,

ce qui peut conduire à de nouveaux profits, et ainsi de suite. C'est bien un processus d'avalanches. Les avalanches s'arrêtent lorsque les investissements ne sont plus rentables. L'économie tend ainsi vers un état *critique* pour lequel la croissance économique est maximale. C'est clairement un processus de *criticalité auto-organisée*.

Une caractéristique de ce processus est de produire des fluctuations dites en $1/f$, dont l'amplitude est inversement proportionnelle à la fréquence f . Il y a beaucoup de petites avalanches, de temps en temps des plus grosses, exceptionnellement des très grosses. Ce comportement des fluctuations économiques a été mis en évidence en 1962 par le mathématicien Benoît Mandelbrot dans son analyse bien connue du prix du coton. Aujourd'hui, il est encore ignoré par les économistes parce qu'il engendre des fluctuations dont la variance est infinie, et celles-ci se prêtent mal aux analyses classiques des marchés.

13.4. Les crises économiques et financières

Un des problèmes liés à ce processus est qu'il est sujet à l'effet de la *reine rouge*. Initialement un environnement stable favorise la croissance économique avec formation de grosses entreprises. À cause d'une *économie d'échelle*, ces entreprises deviennent de plus en plus productives. Elles maximisent l'efficacité de l'économie. Plus elles produisent, plus vite elles affectent leur environnement, par exemple en suscitant la concurrence ou en saturant le marché. Elles subissent la loi des rendements décroissants de David Ricardo. Ces entreprises sont alors contraintes d'évoluer et de s'adapter aux changements.

Plus vite elles se réadaptent, plus vite l'environnement va changer et plus vite elles devront à nouveau évoluer. Ayant du mal à s'adapter à un environnement qui évolue de plus en plus vite, les grosses entreprises tendent à se diviser en entreprises plus petites et plus adaptables. Celles-ci n'optimisent plus leur efficacité économique, mais leur résilience, c'est-à-dire leur faculté d'adaptation. L'économie ralentit. Cela permet à certaines de ces entreprises de grossir à nouveau et de devenir plus efficaces. L'économie oscille ainsi constamment autour d'un *point critique* pour lequel la taille des structures est distribuée suivant une loi de puissance (invariante par *changement d'échelle*).

Ces oscillations sont constatées depuis longtemps par les économistes. Le français Clément Juglar fut un des premiers à les mettre en évidence en 1852. Les statistiques économiques étant encore récentes, il n'a pu mettre en évidence que des périodes courtes (8 à 10 ans). Un peu plus tard Nikolai Kondratief a pu mettre en évidence des oscillations de périodes plus longues (40 à 60 ans). Clairement, ces oscillations sont la conséquence du processus de *criticalité auto-organisée*. Elles n'ont en vérité aucun caractère périodique. Pour un physicien, elles ont les caractéristiques d'un « bruit en $1/f$ », c'est-à-dire de fluctuations aléatoires dont l'amplitude est inversement proportionnelle à la fréquence. Cela signifie que l'économie de marché est, de façon inhérente, instable. Des fluctuations de très grande amplitude peuvent occasionnellement se produire. Lorsqu'une telle fluctuation se produit, elle affecte l'ensemble de la société. Un fort ralentissement de l'économie est perçu comme une crise. Les crises économiques sont une conséquence du processus de *criticalité auto-organisée*.

Il y a alors « condensation » de l'économie en deux phases avec formation de deux économies distinctes, une économie de production et une économie financière.

L'économie de production est celle des travailleurs, ceux qui dissipent physiquement l'énergie. Ils empruntent de l'argent afin d'investir pour produire. Mais, l'environnement changeant rapidement, un investissement qui paraissait rentable à un moment donné, peut ne plus l'être lorsque le produit est terminé. Un exemple caractéristique est celui en France d'un paysan qui investit en plantant des vignobles. À un moment donné, la demande mondiale est favorable au Chardonnay. Notre paysan va donc investir en plantant du Chardonnay. Un tel investissement n'est rentable qu'au bout de 7 ans. La demande évoluant de plus en plus vite, son investissement risque alors de ne plus être rentable. Il arrive un moment où le producteur ne sait plus comment investir. Les faillites se multiplient. Lorsque cela se produit souvent, on parle de crise économique.

L'économie financière est celle des rentiers. Ceux-là ne travaillent pas physiquement. Ils sont assis devant un ordinateur. D'un clic de souris, ils redirigent sans cesse leur argent vers les investissements les plus rentables. Il est donc facile pour eux de s'adapter à une évolution de plus en plus rapide. Ils

continuent pendant un certain temps à s'enrichir. Une discontinuité se crée entre les travailleurs et les rentiers. C'est l'effondrement de la classe moyenne. L'enrichissement des rentiers n'est cependant pas non plus sans risque. Étant de moins en moins capables de faire avancer l'économie, leurs investissements deviennent de moins en moins rentables jusqu'à l'effondrement, celui de la bourse. On parle alors de crise financière. Ces phénomènes, largement observés aujourd'hui, montrent qu'on a dépassé depuis longtemps l'état *critique* où la production d'*énergie libre* est optimale.

13.5. Les inégalités de richesses

Si l'énergie se dissipe en avalanches de biens matériels, la monnaie suit le chemin inverse. Elle se concentre sur un nombre d'individus de plus en plus réduit. C'est le phénomène de condensation au *point critique*. Il implique que la plupart des gens restent plutôt pauvres, certains deviennent aisés (la classe moyenne) et quelques-uns deviennent très riches. Dans une économie de marché, la croissance économique engendre automatiquement des inégalités de richesse.

Le processus de *criticalité auto-organisée* implique qu'au *point critique* la distribution des richesses est invariante par *changement d'échelle*. Elle suit une loi de puissance. C'est bien ce qu'on observe. Mise en évidence au XIX^e siècle par l'économiste italien Vilfredo Pareto, cette loi est connue sous le nom loi de Pareto ou loi 80-20. Elle implique qu'environ 80 % des richesses sont possédées par 20 % de la population.

Au-delà du *point critique*, il y a séparation des richesses en deux phases : une phase « gazeuse » constituée d'un petit nombre d'individus très riches, et une phase « liquide » dans laquelle se concentre un grand nombre de gens pauvres. Comme les molécules d'un gaz, les riches jouissent d'une grande liberté et disposent de beaucoup d'énergie. Prisonniers dans leur phase liquide, les pauvres ont perdu toute liberté d'action. Entre les deux, la classe moyenne s'est effondrée.

Le phénomène de « condensation » des richesses n'est pas limité aux richesses monétaires. Il s'étend aux richesses *culturelles*. L'éducation est un investissement.

Apprendre à lire ouvre la voie à des études qui elles-mêmes ouvriront la voie à de nouvelles études. Lorsque l'économie est en panne, on ne sait plus dans quelles études investir. C'est l'effondrement de la transmission *culturelle* ou crise de l'éducation avec apparition d'inégalités *culturelles* de plus en plus prononcées. Ceux qui savent en savent plus qu'autrefois, tandis que l'analphabétisme se répand. On le constate largement aujourd'hui.

Notons que ces inégalités du savoir contredisent les théories économiques qui reposent sur l'idée que les prix reflètent à chaque instant toute l'information disponible.

13.6. Thermodynamique et sociologie

Peu de sociologues sont conscients que la sociologie a un rapport quelconque avec la thermodynamique. Pourtant des sociologues comme Émile Durkheim s'en sont largement inspirés. Considéré comme le père de la sociologie française et l'un des fondateurs de la sociologie humaine, Durkheim a écrit la majeure partie de son œuvre entre 1890 et 1900. Boltzmann venait alors de jeter les bases de la *mécanique statistique*. Adeptes du positivisme, Durkheim est convaincu que l'étude des sociétés humaines peut devenir une science « positive » au même titre que la physique et la chimie. Il s'en inspire en prenant la physique statistique comme modèle.

Pour lui la sociologie est l'étude des « faits sociaux ». Il définit les faits sociaux comme des entités objectives, mesurables, indépendantes des individus. Pour les mettre en évidence, il utilise les statistiques qui permettent de neutraliser les variations entre individus et finalement d'étudier une moyenne. C'est exactement ce que fait un thermodynamicien lorsqu'il définit la pression ou la température d'un gaz comme une moyenne effectuée sur un ensemble de molécules.

Pour Durkheim, le fait social exerce une contrainte sur les individus. On parle en effet de pression sociale, par analogie avec la contrainte exercée par la pression d'un gaz sur le comportement de ses molécules. J'ai montré l'analogie entre les retournements de *spin* en physique et la propagation des

croyances. Un individu a, comme un *spin*, tendance à imiter ses voisins⁴³. C'est le holisme sociologique qui est aussi de nature statistique. Comme toute *structure dissipative*, un individu s'adapte continuellement à son environnement. Il est conditionné par son environnement. Il s'adapte donc à la société qui l'entoure. C'est le processus de socialisation.

Durkheim a remarqué que les sociétés industrielles ont tendance à se différencier à cause de la division du travail. C'est bien ce que fait une casserole d'eau sur le feu. Des courants organisés apparaissent qui différencient les molécules. Certaines montent alors que d'autres descendent. L'auto-organisation des sociétés est de même nature que l'auto-organisation des courants de *convection* dans une casserole d'eau. Chaque individu d'une société dépend de tous les autres. De même le mouvement moyen de chaque molécule d'eau dépend du mouvement de toutes les autres molécules. Durkheim avait intuitivement découvert l'universalité des lois statistiques (section 3.1). Plus récemment, des sociologues comme Michel Forsé⁴⁴ se sont clairement inspirés de la *mécanique statistique*, mais leur modèle reste celui de Boltzmann. Ils ont été très peu suivis.

13.7. La solidarité en sociologie

Nous avons vu (section 12.3) qu'il y a deux façons possibles de passer de la compétition à la coopération, c'est-à-dire de l'individualisme à la solidarité : soit les individus s'adaptent au groupe, soit le groupe s'adapte aux individus. En biologie, le premier cas correspond à la *sélection de parentèle*. C'est ce que nous avons appelé la *coopération altruiste*, dans laquelle les individus n'existent que pour la survie du groupe. Le second cas s'applique à ce que nous avons appelé la *coopération symbiotique*, où le groupe n'existe que pour la survie des individus (figure 7).

Durkheim distingue de même, deux types de solidarités qu'il nomme respectivement « mécanique » et « organique ». En parlant de la première,

43. On dit populairement qu'influencé par son entourage quelqu'un peut « retourner sa veste ». L'analogie avec les retournements de *spin* devient alors directe.

44. Michel Forsé, « *L'ordre improbable. Entropie et processus sociaux* », Paris, PUF, 1989.

il dit⁴⁵ : « La solidarité qui dérive des ressemblances est à son maximum quand la conscience collective recouvre exactement notre conscience totale et coïncide de tous points avec elle : mais, à ce moment, notre individualité est nulle »... « Au moment où cette solidarité exerce son action, notre personnalité s'évanouit, peut-on dire, par définition ; car nous ne sommes plus nous-mêmes, mais l'être collectif. Les molécules sociales qui ne seraient cohérentes que de cette seule manière ne pourraient donc se mouvoir avec ensemble que dans la mesure où elles n'ont pas de mouvements propres... » On reconnaît bien dans cette description le processus de *sélection de parentèle* que l'on pourrait qualifier de fraternité *culturelle*. Il conduit à une coopération de type *altruiste*.

En parlant de la deuxième, il dit : « Il en est tout autrement de la solidarité que produit la division du travail. Tandis que la précédente implique que les individus se ressemblent, celle-ci suppose qu'ils diffèrent les uns des autres. La première n'est possible que dans la mesure où la personnalité individuelle est absorbée dans la personnalité collective ; la seconde n'est possible que si chacun a une sphère d'action qui lui est propre, par conséquent une personnalité. » Il s'agit bien ici d'une coopération de type symbiotique où des individus différents se complètent mutuellement. Ce dernier type de solidarité admet et respecte les différences entre les individus. Il est particulièrement fréquent dans les familles nucléaires-égalitaires. En France, où les familles de ce type sont nombreuses, il correspond à l'idéal de laïcité.

Historiquement, la nation française s'est d'abord construite sur un modèle de *coopération altruiste*. En 1429, avec Jeanne d'Arc, une nation prenait naissance, la France, avec le sacre de Charles VII. *Culturellement*, elle est née par la volonté de Dieu, contre les Anglais. Sous François I^{er}, elle adopte une langue officielle grâce à l'ordonnance de Villers-Cotterêts (1539). Le rôle des langues régionales ne cessera ensuite de décroître. Mais la religion qui avec Jeanne d'Arc l'unifiait va la diviser. Suivront près de deux siècles de guerres de religion. Si les querelles cessent en 1598 grâce à l'édit de Nantes, celui-ci sera révoqué en 1685 par Louis XIV. Il faut attendre la Révolution française pour que les protestants aient droit à l'égalité juridique. En 1789, la Déclaration des

45. Durkheim, E., « *De la division du travail social* », livre I, chap. IV (1893).

droits de l'homme et du citoyen introduira l'idée que le groupe doit respecter la liberté de conscience des individus. D'*altruiste* la coopération est devenue *symbiotique*. Si la première requiert la fraternité, la seconde requiert la liberté. Une *symbiose* complète nécessite la conciliation des deux.

14. L'évolution culturelle en Occident

L'évolution des civilisations occidentales est décrite ici aussi bien en termes de thermodynamique (*point critique, domaines d'Ising*) qu'en termes de biologie (*sélection r et K, sélection de parentèle, symbiose*). Des *domaines d'Ising culturels* se forment et se désagrègent pour se reformer sans cesse différemment, selon un algorithme de *recuit simulé*. Ce sont successivement : l'Empire romain, l'Europe du Moyen Âge, les États-nations, les empires coloniaux, puis l'affrontement entre l'atlantisme et le bloc soviétique. L'effondrement de ce dernier tend à créer une *culture mondiale unique*. Celle-ci va-t-elle à son tour s'effondrer ?

14.1. L'Antiquité méditerranéenne

14.1.1. Les premiers agriculteurs

Nous avons vu (section 11.3) que la révolution *néolithique* a débuté au Moyen-Orient. Elle s'est reproduite ensuite indépendamment en Orient, puis en Amérique et en Afrique, créant chaque fois des civilisations nouvelles. Nous nous contenterons ici de décrire la première vague qui, partie du Moyen-Orient, s'est étendue vers l'Égypte puis sur toute l'Europe, donnant aux civilisations européennes une longueur d'avance sur toutes les autres.

Dans son livre « *Guns, Germs and Steel* », Jared Diamond pose la question de savoir pourquoi les premières civilisations se sont développées au Moyen-Orient. Le développement d'une civilisation étant un processus d'auto-organisation, les propriétés de ces processus décrites au chapitre 3 nous aident à comprendre ce qui s'est passé.

Nous avons vu que l'auto-organisation se fait par avalanches dont l'amplitude est inversement proportionnelle à la fréquence. Cela implique qu'il

y a vraisemblablement eu beaucoup d'essais d'agriculture au hasard dans le monde, partout où l'*Homo sapiens* avait mis les pieds, mais avec des développements généralement très limités. La question n'est donc pas de savoir si les premiers essais d'agriculture ont eu lieu au Moyen-Orient, mais pour quelles raisons ceux-ci ont déclenché l'avalanche d'événements qui a conduit au développement des civilisations méditerranéennes.

Il semble qu'il y ait à cela trois raisons environnementales : le climat méditerranéen, la présence des fleuves du croissant fertile, et celle d'une mer intérieure, la Méditerranée. Chacune de ces trois raisons correspond à une des trois phases successives de ce développement.

La première phase a été facilitée par le climat méditerranéen, tempéré et humide. À cette époque, le sol était fertile sur le flanc des hauteurs du Moyen-Orient à cause de l'humus provenant des arbres, et de l'humidité provenant de la Méditerranée. De plus, un certain nombre de plantes étaient aisément domesticables. C'est la première raison du développement.

Cependant les sols cultivés s'épuisent. La terre devient moins fertile. Après avoir prospéré un certain temps au même endroit et fait évoluer son environnement, une communauté doit tôt ou tard déménager vers des lieux plus propices. C'est encore l'effet de la *reine rouge* ou processus de *criticalité auto-organisée*. Il implique une évolution démographique « en 1/f », c'est-à-dire faite de pics dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence.

Une telle évolution a effectivement été mise en évidence par les archéologues. La figure 11, extraite du livre de Stephen Shennan (*Genes, Memes and Human History*) montre l'évolution du nombre de villages, non pas au Moyen-Orient, mais dans un site du Jura (Chalain/Clairvaux) entre 4000 et 1600 avant J.-C. Le peuplement n'y est jamais continu. On observe assez souvent un village, parfois plusieurs, exceptionnellement un grand nombre. C'est bien le comportement caractéristique d'un processus de *criticalité auto-organisée*.

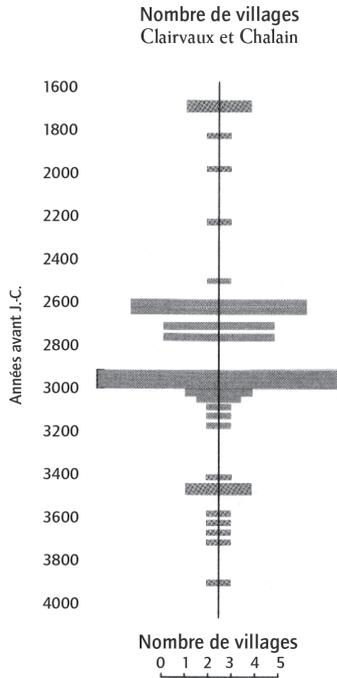


Figure 11. Évolution du nombre de villages dans un site du Jura (d'après S. Shennan).

14.1.2. Les civilisations du croissant fertile

La pluie entraîne l'humus dans les rivières vers les vallées. Il était donc naturel que l'agriculture suive. Le problème est alors la sécheresse l'été. Après avoir appris à s'organiser pour cultiver la terre, les agriculteurs ont appris à construire des canaux d'irrigation. Ils étaient alors prêts pour la deuxième phase de cette évolution, l'expansion à l'intérieur du croissant fertile.

La présence exceptionnelle de trois grands fleuves, le Tigre et l'Euphrate à l'est, le Nil à l'ouest formant ce qu'on appelle le croissant fertile est la deuxième raison de l'expansion de la civilisation. L'humus y étant constamment renouvelé grâce aux fleuves riches en alluvions, l'environnement était devenu stable.

En 3 500 avant J.-C. apparaissent les premières civilisations, sumériennes à l'est et égyptiennes à l'ouest.

On attribue aux Sumériens l'invention de l'écriture et de la monnaie (section 12.2). La population se condense alors dans des villes. Celles-ci se munissent d'un gouvernement et d'une administration. Ce sont des villes États. En Égypte, il y a formation d'un gouvernement central. Vers 3 000 avant J.-C., Memphis devient la capitale de l'Égypte. Cinq cents ans plus tard, ils construisent les pyramides.

En termes de biologie, la première phase de l'évolution est clairement une phase de sélection r. L'environnement instable a favorisé la formation d'un grand nombre de petits groupes d'agriculteurs capables de se reproduire *culturellement* et de se disperser rapidement. La deuxième phase est clairement une phase de sélection K. La stabilité de l'environnement a favorisé le développement de sociétés de plus en plus grandes et dissipatrices d'énergie, mais de moins en moins adaptables, donc de plus en plus fragiles.

Au début Sumer n'avait pas de gouvernement central. Vers 2 300 avant J.-C., Akkad englobe Sumer, créant un vaste *domaine d'Ising culturel* contrôlé par une administration centrale. La classe dirigeante s'attache à maintenir la croissance économique. Le bois étant indispensable, le déboisement se poursuit en amont des grands fleuves, facilitant l'érosion. Celle-ci entraîne la terre vers la vallée. Bientôt la boue envahit les canaux d'irrigation. L'état *critique* est franchi. L'évolution de la région devient chaotique. Fragilisée, la civilisation sumérienne est de moins en moins capable de résister aux envahisseurs⁴⁶. On assiste à une série d'invasions destructrices entrecoupées de renaissances spectaculaires.

Plus dispersées et beaucoup plus lointaines, les sources du Nil n'ont pas été victimes du déboisement. Cette particularité a permis à la civilisation égyptienne de se maintenir bien plus longtemps que la sumérienne. Envahie par les Hyksos vers 1 700 avant J.-C., les Égyptiens s'en débarrassent en moins d'un siècle. Vers 1 500 avant J.-C., ils forment un vaste empire s'étendant jusqu'à la

46. Voir : Vernon Gill Carter, Tom Dale, « *Topsoil and civilization* », U. of Oklahoma Press (1955, 1974).

Syrie. Cette fois, l'état *critique* est définitivement atteint. La puissance de son agriculture et de son administration permet à l'Égypte de dominer ces régions pendant quelques siècles, mais, fragilisée, elle résiste de plus en plus difficilement aux agresseurs. Après avoir absorbé des envahisseurs venant de Libye et d'Éthiopie, elle est définitivement envahie par les Assyriens (600 avant J.-C.) puis par les Perses (525 avant J.-C.).

14.1.3. L'expansion des civilisations méditerranéennes

La présence de la Méditerranée est la troisième raison de l'expansion de la civilisation. En raison de la loi de Le Chatelier (section 9.1), la dissipation d'énergie tend à diminuer les gradients de concentration de matière première. C'est pourquoi tout développement économique nécessite des moyens de transport. Sur terre, les transports sont lents à cause du relief. Ils nécessitent l'entretien de voies d'accès. Sur mer, ils sont beaucoup plus faciles. Étant une mer intérieure, la Méditerranée offrait un moyen de communication exceptionnel. C'est la raison pour laquelle la civilisation va se développer sur son pourtour.

Vers 2 000 avant J.-C., les Égyptiens développent le commerce maritime. Celui-ci s'étend vers la Crète et tout le long de la côte est de la Méditerranée, de la Syrie à la Palestine actuelle. Grâce à ces échanges, la civilisation minoenne se développe en Crète. Celle des Phéniciens se développe à la hauteur du Liban actuel.

On assiste alors à une nouvelle phase d'évolution dominée par la sélection r. Ne pouvant vivre d'agriculture, les Phéniciens vivent du commerce. Ils construisent des bateaux pour exporter leur bois. Ne pouvant se développer sur leur terre d'origine, ils vont coloniser les côtes peu peuplées d'Afrique du Nord, fondant notamment Carthage. Ils s'installent en Sardaigne, en Sicile et même sur la côte espagnole. Ils essaient ainsi leur civilisation sur tout le tour de la Méditerranée sans jamais former d'empire. Selon Hérodote, certains d'entre eux auraient même fait le tour de l'Afrique.

Grâce au commerce, des centres de civilisations se développent dans les îles et autour de la mer Égée. La civilisation mycénienne va prendre la suite de la minoenne, mais les Mycéniens seront bientôt envahis par les Ioniens,

les Éoliens puis les Doriens. On assiste alors à un mélange de civilisations, véritable « melting pot », d'où naîtra la civilisation grecque.

Jusqu'à là les civilisations s'étaient développées comme les sociétés d'insectes. De même que les abeilles ont une reine, les sociétés avaient un roi. C'est le même processus que celui de la *sélection de parentèle* en biologie. De même que la reine des abeilles est porteuse des *gènes* de la communauté, de même le roi était porteur de la *culture* commune. En Grèce allait apparaître une nouvelle espèce de civilisation faite d'individus de cultures différentes. Au lieu que les individus s'adaptent à la société, la société allait s'adapter aux individus, en respectant leur liberté.

En 750 avant J.-C. Athènes était formée par l'union de plusieurs villages d'origines *culturelles* variées. Deux siècles et demi plus tard, la première démocratie s'instaurait. Afin que chacun puisse assumer ses responsabilités dans la construction de la société, il fallait s'instruire. Ayant adopté l'alphabet phénicien (section 12.2), la population va s'alphabétiser. Apparaît alors la civilisation hellénique, *symbiose* des civilisations qui l'ont précédé. Grâce à l'écriture, elle va avoir une influence considérable sur toutes les civilisations ultérieures.

Vers 600 avant J.-C. l'agriculture grecque devenait de moins en moins capable de maintenir une population croissante. Pendant un certain temps, les Grecs vont vivre du commerce et fonder des *colonies*, transportant leur civilisation à l'ouest de la Méditerranée. Ils font rapidement concurrence à la civilisation phénicienne à laquelle ils mettent fin. Vers 450 avant J.-C., leurs réserves en bois sont épuisées et la terre fortement érodée. La rivalité commerciale entre les cités grecques s'accroît. C'est la guerre du Péloponnèse. La civilisation grecque s'en trouve affaiblie.

Pendant ce temps, grâce à des terres encore fertiles, une civilisation plus tardive se développait au nord de la Grèce. Éduqué à Thèbes puis revenu dans son pays, Philippe II de Macédoine innove militairement. Il développe une longue lance, la sarisse, puis recrute des guerriers et des chevaux macédoniens afin de prendre le contrôle de la Grèce. En 338 avant J.-C., il prend Thèbes et Athènes. Son fils Alexandre dit « le Grand » lui succède. En 10 ans il prend le contrôle de la Perse, répandant la *culture* grecque dans tout le Moyen-Orient jusqu'en Égypte et au bord de l'Indus.

14.2. Le monde romain

14.2.1. La République romaine

Suivant la tradition, Rome a été fondé en 753 avant J.-C., à la frontière entre deux cultures, la *culture* latine et la *culture* étrusque. C'est encore une monarchie. La république dite des « Patriciens » ne sera créée qu'en 509 avant J.-C.. Soumise à des luttes incessantes entre les patriciens et les plébéiens, elle va peu à peu se démocratiser. Cette démocratisation conduira à la formation d'une aristocratie « patricio-plébéienne ».

Située dans une région fertile proche de la mer, la République romaine va vivre à la fois de l'agriculture et du commerce. Confinée initialement au Latium, elle va progressivement s'étendre. En 260 avant J.-C., elle s'étend sur presque toute la péninsule italienne. Les Romains vont alors procéder à de vastes travaux d'adduction d'eau et de construction de routes qui permettront de maintenir la croissance économique. La société s'adaptant aux individus, les individus vont aussi s'adapter à la société. De *symbiotique* la coopération devient *altruiste*. Une *culture* commune se développe. Être citoyen romain devient un honneur, mais tous n'ont pas le droit de vote.

La population augmente alors rapidement, mais, en accroissant ses besoins, elle affecte son environnement. La *culture* romaine entre en conflit avec une autre *culture* qui, partie de Carthage, s'étend à l'Afrique du Nord et à l'Espagne. Occupant la Sicile, les Carthaginois menacent les Romains qui s'y approvisionnent en céréales. C'est le début des guerres puniques. Grâce à la cohésion de leur société, les Romains en sortent vainqueurs. En 146 avant J.-C. Carthage est détruite. Les Romains deviennent maîtres de tout l'Ouest méditerranéen. Mais leur économie est déstabilisée. Ils ne pourront subsister qu'en réalisant sans cesse de nouvelles conquêtes territoriales.

Le déclin d'une civilisation se mesure au statut de son économie, et ce statut est lié au degré de condensation de ses richesses matérielles et *culturelles* (section 13.4). On peut considérer la population romaine comme divisée en trois classes : les patriciens, la plèbe et les esclaves. Tant que l'économie est prospère, la plèbe se développe au point de former une aristocratie plébéienne. Très touchée par les guerres puniques, la plèbe ne s'en remet pas.

Classe moyenne, elle va peu à peu s'effondrer.

Après la conquête de la péninsule italienne, les terres romaines sont devenues moins fertiles et les collines plus déboisées. Pendant les guerres puniques, la construction de bateaux a accru le déboisement. Beaucoup de terres sont alors abandonnées par les paysans partis en guerre. À la fin des guerres puniques, les Romains importent leurs céréales à bas prix en provenance des pays conquis : la Sicile, l'Afrique du Nord, mais aussi la Sardaigne et l'Espagne et même l'Égypte. N'étant plus compétitive, l'agriculture romaine s'effondre. La plupart des terres sont alors plantées de vignes ou d'oliviers.

Les richesses se concentrent dans les mains de l'aristocratie. Celle-ci achète les terres à bas prix et les fait cultiver par les esclaves de plus en plus nombreux. La classe moyenne s'effondre au profit d'une poignée de grands propriétaires terriens et de spéculateurs qui investissent dans des activités maritimes et bancaires. Il s'ensuit une crise sociale majeure.

14.2.2. La crise et l'Empire

En 133 avant J.-C., le tribun de la plèbe Tiberius Sempronius Gracchus essaie, mais sans succès, de rétablir la classe moyenne en limitant la taille des exploitations. Il est assassiné avec 300 de ses partisans. Son frère Caius Gracchus réussit à faire adopter une sorte de RMI sous forme de distribution de blé à bas prix, voire gratuit. Pourchassé par ses ennemis, il se suicide en 120 avant J.-C.

L'année 73 avant J.-C. est celle de la révolte des esclaves dirigée par Spartacus. Au siècle suivant Juvénal décrit les Romains affamés et au chômage et résume leurs désirs à « du pain et des jeux ». Le luxe côtoie la pauvreté. La guerre civile est inévitable. Revenu de Gaule, César prend le pouvoir. En 44 avant J.-C. il est nommé dictateur à vie. La République romaine devient une dictature militaire puis un empire. Cet empire ne pourra se maintenir économiquement qu'en s'étendant sans cesse grâce à une avalanche de conquêtes territoriales. À son apogée, en 360 après J.-C., il s'étendra de l'Angleterre à l'Égypte.

La croissance de l'Empire romain peut être considérée comme la formation, par avalanches successives, d'un immense « *domaine d'Ising* » *culturel*. Formellement le processus est le même. Chaque étape entraîne la suivante.

Le processus s'arrête lorsqu'il n'est plus assez alimenté énergétiquement. L'annexion d'une province permet de faire face au coût d'entretien du corps principal, mais le coût d'entretien du tout s'accroît à chaque étape, nécessitant toujours plus d'annexions. C'est l'effet de la *reine rouge*. L'Empire romain va y succomber.

On retrouve le processus d'optimisation par *recuit simulé* décrit à la section 4.5. Bloqué dans un optimum secondaire d'où il ne peut pas sortir, l'algorithme de maximisation de la dissipation d'énergie produit l'équivalent d'un « réchauffement ». Comme un *domaine d'Ising* dont on augmente la température, l'Empire romain se décomposera en petits morceaux sous l'influence des domaines voisins de *culture* dite « barbare ». Rappelons qu'au temps des Grecs et des Romains le mot « barbare » n'a pas de connotation négative. Cette onomatopée désigne les peuples dont on ne comprend pas la langue, c'est-à-dire dont la *culture* est différente.

14.3. Naissance de la chrétienté

14.3.1. Du polythéisme au monothéisme

Comme tout animal, l'Homme doit se procurer de la nourriture. Pour le faire efficacement, il doit être capable de prédire le résultat de ses actions. Cela est possible dans la mesure où ce résultat est reproductible. Dans certains cas, il l'est parfaitement : si on lâche une pierre, elle tombe. Peu à peu, l'Homme s'est rendu compte qu'un certain nombre d'événements étaient parfaitement reproductibles, donc prévisibles. C'est le cas, par exemple, de la plupart des événements astronomiques. Sous nos latitudes, le Soleil se couche tous les soirs et se lève tous les matins. L'Homme a étudié le mouvement apparent du Soleil et a appris ainsi à déterminer les saisons. Cette détermination s'est avérée importante pour les progrès de l'agriculture, donc pour sa survie.

Malheureusement, beaucoup d'événements sont peu reproductibles. Nous avons vu que c'est le cas de tous les systèmes qui s'auto-organisent (section 2.5) : la pluie ou l'orage sont difficiles à prévoir. Les événements les plus difficiles à prévoir sont sans doute les réactions des êtres humains. L'Homme a été ainsi amené à distinguer le corps, objet visible, de l'âme invisible qui dicte

nos actions. D'où l'idée que tous les événements imprévisibles sont dictés par une âme. C'est l'idée de base des religions primitives dites animistes. Elle a conduit au polythéisme.

Si la pluie est dictée par une âme, alors il existe un dieu de la pluie dont l'âme décide de la pluie et du beau temps. Une telle conception implique que les dieux se comportent entre eux comme les humains : ils peuvent se quereller, ou avoir des enfants. C'est ce que font effectivement les dieux de l'Antiquité. La différence essentielle avec les êtres humains est qu'ils sont immortels. D'où l'idée que, comme le pensait Platon, l'âme est immortelle, idée qui offre un soulagement devant la perspective de la mort.

Chacun sait que pour modifier le comportement d'un chef en sa faveur, il faut lui plaire. Un enfant apprend à plaire à ses parents en leur obéissant. Il apprend ainsi les règles de la vie en société qui permettent de plaire aux autres. Il en est de même des dieux. Pour s'attirer la faveur des dieux, il faut leur plaire en suivant les traditions religieuses établies. C'est ce que font les Grecs et les Romains.

Ces traditions sont transmises par la société et, plus particulièrement, par les parents. On arrive ainsi à l'idée que, pour plaire aux parents, il faut plaire aux dieux en suivant les traditions établies. Dans les sociétés dites patriarcales, les traditions sont transmises par le père qui, autoritaire, les impose à ses descendants. C'était le cas chez les Hébreux. Il fallait plaire aux dieux pour plaire au père. C'est sans doute ainsi que l'idée s'est peu à peu forgée chez eux d'un dieu unique, autoritaire, semblable au père. C'est le dieu d'Abraham et de Moïse, celui de l'Ancien Testament.

14.3.2. Les débuts de la chrétienté

La *culture* monothéiste des Hébreux ne pouvait que s'opposer aux cultures polythéistes gréco-romaines. Après avoir affronté les invasions grecques, elle doit affronter l'invasion romaine. En 63 avant J.-C. le général romain Pompée prend Jérusalem, la première ville de Judée. À cette époque, plusieurs tendances religieuses s'affrontent. Les pharisiens tendent à se protéger des étrangers. En renforçant les préceptes religieux, la tendance pharisienne donnera naissance au judaïsme actuel.

Plus ouverte, la tendance prêchée par Jésus Christ énonçait qu'un père aime ses enfants même si, autoritaire, il les fustige. La souffrance n'est qu'une punition imposée à la suite d'une désobéissance antérieure : le péché originel. Étant tous enfants de Dieu, nous devons nous aimer les uns les autres d'un amour fraternel. La *culture* gréco-romaine avait mis l'accent sur la liberté, mais elle ignorait la pitié. Le christianisme allait s'étendre en prêchant la fraternité.

Alors que la civilisation romaine se développe en Méditerranée, les populations se mélangent et s'alphabétisent. Naît un cosmopolitisme méditerranéen. Originaire d'une famille juive de Tarse, un intellectuel connu sous le nom de saint Paul parle couramment grec et hébreu. Il acquiert la citoyenneté romaine. Éduqué par un pharisien, il participe aux persécutions des premiers chrétiens, puis se convertit au christianisme. Par ses voyages et ses relations épistolaires, il sera un des plus grands propagateurs de la religion chrétienne.

Rappelons que l'adjectif « épistolaire » vient du mot latin « *epistola* » (lettre) qui a donné « épître » en français. Recopiées maintes fois, les épîtres de saint Paul deviendront un des fondements de la religion chrétienne. Grâce à la possibilité d'échanges de correspondance, un cerveau global méditerranéen se forme dans lequel s'affrontent des *domaines d'Ising* de cultures différentes.

Les crises sociales et guerres civiles qui avaient mis fin à la République romaine avaient fait douter du modèle *culturel* romain. Ils avaient permis au christianisme de s'infiltrer. L'anarchie militaire et la crise monétaire du III^e siècle donnent à penser aux Romains qu'ils ont été abandonnés par leurs dieux. On accuse le christianisme en pleine expansion. Les Romains tentent de restaurer leurs cultes traditionnels. Soupçonnés de miner l'ordre social, les chrétiens sont régulièrement persécutés.

Cependant, ouverte aux idées nouvelles, l'élite romaine peut difficilement s'opposer de front aux idées chrétiennes. Celles-ci sont particulièrement répandues en Orient. En 313, l'empereur Constantin I^{er} donne la faveur au christianisme. Ce dernier a alors libre cours de poursuivre son extension. Peu à peu l'Empire romain, ou du moins ce qu'il en restait, devient chrétien.

14.4. Les temps barbares

14.4.1. L'effondrement de l'Empire romain

Dès la conquête de l'Italie, l'économie romaine atteint le *point critique* au-delà duquel elle ne peut se maintenir que par avalanches de restructurations successives. Le processus de condensation au *point critique* conduit à une concentration croissante des richesses monétaires, c'est-à-dire à un effondrement des classes moyennes. Nous avons vu (section 13.4) que ce processus s'applique également aux richesses *culturelles*. Le bassin méditerranéen étant devenu un pot-pourri de cultures différentes, les Romains commencent à douter de leur propre *culture*. La montée du christianisme n'en est qu'une des conséquences. Avant de s'effondrer physiquement, l'Empire romain va s'effondrer *culturellement*.

Un signe de ce déclin est la montée de l'analphabétisme. Les graffitis sur les murs de Pompéi attestent qu'au premier siècle après J.-C. une large fraction de la population était alphabétisée. À cette époque, de nombreux timbres, sceaux et autres documents écrits à usages commerciaux, administratifs ou militaires, apportent la preuve d'un usage permanent de l'écriture. Jules César est non seulement un général et un grand chef politique, il est aussi un écrivain. Il parle et écrit couramment le latin et le grec. Au III^e siècle après J.-C., on se moque de l'empereur Maximin I^{er} le Thrace parce que, venant des Balkans, il écrit mal le latin et ne connaît pas le grec.

En 410 après J.-C., Rome est envahie par les barbares. La partie ouest de l'Empire romain s'effondre. À partir de cette date, les documents écrits y disparaissent presque entièrement. Les noms et autres inscriptions, qui étaient largement répandus sur les objets courants, disparaissent également. Bien qu'elle se soit maintenue, la partie est de l'Empire souffre aussi *culturellement*. En 518 après J.-C., l'empereur byzantin Justin I^{er} prend le pouvoir. Il ne sait ni lire ni écrire. Quelques siècles plus tard, conscient de l'importance de l'éducation, mais déjà âgé, Charlemagne allait lui-même essayer d'apprendre à lire et à écrire, mais sans grand succès.

14.4.2. Le cerveau global en sommeil

Nous avons montré (section 9.4) que le modèle du cerveau de Per Bak s'applique au « cerveau global » que forme une population d'individus échangeant de l'information. Les « seuils » représentent la résistance d'une population aux cultures étrangères, « l'intensité des connexions » représente l'intensité des échanges *culturels*, les « cacahuètes » représentent le succès de l'économie. On peut appliquer ce modèle à l'Empire romain.

À son début, la *culture* romaine représente un « *domaine d'Ising* » d'importance croissante. L'économie étant florissante, les échanges *culturels* ne cessent de s'accroître. La *culture* romaine s'étend et devient la *culture* dominante. Face à ce développement, les cultures étrangères vont réagir. Certaines vont renforcer leurs seuils, d'autres vont évoluer. De nouvelles cultures apparaissent. C'est le cas du christianisme destiné à prendre de l'ampleur.

Dans une première étape, ces cultures étrangères sont refoulées par la *culture* romaine. Le processus de refoulement est bien connu en psychanalyse. Mais peu à peu les progrès économiques deviennent plus rares. Ils jouent le rôle des cacahuètes de Per Bak. Perturbé, le cerveau global ne sait plus comment réagir. Il traverse des crises.

La deuxième étape est l'assimilation. Le cerveau global va alors chercher à assimiler les cultures étrangères en formant un *domaine d'Ising* encore plus grand, mais sans se remettre en cause. C'est l'assimilation du christianisme par l'empereur Constantin. Les réponses du cerveau global restant inchangées, l'économie ne progresse pas. À terme, l'effondrement est inévitable.

En 410 après J.-C., la partie ouest de l'Empire romain est physiquement et *culturellement* envahie, provoquant une chute brutale de l'économie. C'est la pénurie complète de « cacahuètes ». Nous avons vu (section 9.3) qu'une telle pénurie provoque immédiatement une baisse de l'intensité des échanges. Le cerveau global se retrouve alors constellé de petits domaines matériellement et *culturellement* isolés. La richesse *culturelle* n'est pas perdue, mais elle s'est condensée chez un petit nombre d'intellectuels. À cette époque, ce sont les moines. De même que les graines conservent l'information *génétique* en

attendant que l'environnement leur soit favorable, de même les couvents conservent l'information *culturelle*.

Dans ces conditions, plus aucune percolation ne se produit. Pendant plusieurs siècles le cerveau global va dormir. À ce sommeil *culturel* correspond un sommeil économique. N'étant plus suffisamment alimenté le peuple souffre de famines. La densité de la population diminue. On estime qu'en Gaule, elle a chuté d'un facteur 2 ou 3. Nous avons vu (section 9.3) que le sommeil est nécessaire à la restructuration du cerveau. Dans un cerveau en sommeil, les seuils s'abaissent peu à peu jusqu'à apparition de nouvelles percolations. C'est alors le réveil.

14.4.3. Le réveil

Le réveil d'une société est un processus de percolation idéologique. De nouvelles structures idéologiques apparaissent jusqu'à ce que l'une d'entre elles déclenche la reprise de l'économie. L'information étant aux mains du clergé, ces nouvelles structures ne pouvaient venir que de l'Église.

Thermodynamiquement, le pouvoir temporel contrôle la dissipation d'énergie et le pouvoir spirituel contrôle l'information, c'est-à-dire la diminution d'*entropie*. Sans diminution d'*entropie*, il n'y a pas de production d'*énergie libre*. À cette époque le pouvoir temporel était entre les mains d'une multitude de seigneurs locaux en compétition les uns avec les autres, tandis que le pouvoir spirituel était aux mains d'un seul chef, le pape. La diminution d'*entropie*, c'est-à-dire l'organisation de la société, était entre ses mains.

Contrôlant les esprits, l'Église va contrôler et éduquer les chefs. Pour régner sur la Gaule, Clovis doit se soumettre à l'Église catholique. Les seigneurs locaux reçoivent une éducation pour devenir chevaliers. Réciproquement les chefs guerriers protègent l'Église. Sous l'influence de cette dernière, une nouvelle civilisation se développe, mais son centre de gravité se trouve déplacé vers l'ouest de l'Europe.

Éduquer des chefs barbares était une entreprise de longue haleine. Les succès ayant été mitigés avec les Mérovingiens, au VIII^e siècle l'Église encourage la prise de pouvoir de Pépin le Bref, fils de Charles Martel, qui venait de

repousser la *culture* islamique. En l'an 800, le pape Léon III fait venir à Rome son successeur, Charlemagne, pour le couronner empereur, selon le modèle des empereurs romains. L'empire de Charlemagne sera cependant de courte durée. En 843, il est partagé entre trois de ses petits-fils. De nouveau divisé, l'Occident va se rendormir encore quelques siècles.

À l'est, le Saint-Empire romain germanique d'Otton I^{er} va maintenir un certain temps cette ancienne *culture*, mais, peu adaptable, il ne résistera pas à l'évolution de l'ouest.

14.5. Du Moyen Âge à nos jours

14.5.1. Le Moyen Âge

Ce ne sera qu'un demi-sommeil. Tout en dormant, ce cerveau continue à s'activer. Sous l'influence d'érudits venus de toute l'Europe, un vaste programme d'éducation avait été mis en route par Charlemagne. Grâce à l'apprentissage du latin, langue qui avait été oubliée, l'information circule.

En 877, son petit fils Charles le Chauve privatise les terres seigneuriales en les rendant héréditaires. Un nouveau système d'organisation de la société prend naissance : la féodalité. En 987, ce système « percole » avec l'arrivée au pouvoir d'Hughes Capet, roi des Francs. La civilisation occidentale se réveille. La paix revenue, le commerce se développe. La croissance économique et démographique reprend.

Ce réveil va être dominé par l'influence de l'Église. Des papes comme Grégoire VII et Innocent III avaient déjà compris que, pour rénover la société, il faut penser globalement, mais agir localement. Grâce aux échanges, une littérature médiévale se développe. Grâce au progrès économique, une architecture nouvelle apparaît. Bâties à la gloire de Dieu, les cathédrales reflètent la fraternité du compagnonnage.

La prospérité économique redonne du poids au pouvoir temporel. Des dissensions apparaissent que l'Église n'a plus le pouvoir d'arbitrer. Avec la guerre de Cent Ans, puis le grand schisme religieux suivi de la montée du protes-

tantisme, l'unité *culturelle* du Moyen Âge s'effondre. Les guerres de religion et les apports culturels de la Renaissance déstabilisent la société. L'évolution devient à nouveau chaotique. L'algorithme de *recuit simulé* part à la recherche d'un nouvel optimum de croissance économique⁴⁷.

14.5.2. Les temps modernes

Le « refroidissement » qui suit cristallise l'Occident sous la forme d'États-nations. L'unité *culturelle* n'est plus assurée par l'Église, mais par un ensemble de monarchies. Le sentiment d'appartenance à une même nation se développe, mais les monarchies dites « de droit divin » tendent vers l'absolutisme. Imposée par la chrétienté, la fraternité *culturelle* a fait oublier la liberté de pensée. La *culture* gréco-romaine a été complètement perdue de vue.

Pendant ce temps, l'invention de la typographie et la montée subséquente de l'alphabétisation conduisent à un extraordinaire éveil de la conscience collective (voir introduction). En 1649 les Anglais sont les premiers à décapiter leur roi. En 1689, ils réimposent des libertés en établissant une monarchie constitutionnelle. En France, Louis XIV maintient toujours une monarchie absolue, mais c'est le siècle des Lumières. Louis XVI sera décapité en 1793. Issu du siècle des Lumières, l'idéal de la Révolution française sera de concilier liberté, égalité et fraternité.

Cet éveil se traduit par une accumulation croissante de connaissances. En mémorisant ces informations, c'est-à-dire en diminuant son *entropie*, la société occidentale va accroître considérablement sa production d'*énergie libre*. C'est d'abord l'invention de la boussole et les progrès de la navigation, provoquant un apport considérable de main d'œuvre et de richesses. C'est ensuite la découverte de sources d'*énergies fossiles* (houille, gaz et pétrole) et leur utilisation industrielle. Contre toute attente, la poussée démographique qui avait effrayé Malthus se poursuit sans interruption jusqu'à nos jours. En quelques siècles, l'humanité épuise près d'un milliard d'années d'énergie solaire lentement accumulée par les plantes.

47. Le lecteur littéraire ne manquera pas de faire un rapprochement entre ce processus évolutif et le mythe de Sisyphé. La croissance économique correspond à l'ascension de Sisyphé et de son rocher. De même que le rocher tend sans cesse à redescendre la pente, l'économie s'effondre régulièrement et il faut recommencer. La dissipation d'énergie atteint cependant chaque fois des sommets toujours plus élevés.

14.5.3. L'époque contemporaine

La croissance économique et démographique des États-nations entraîne l'expansion de leurs *domaines d'Ising culturels* sous la forme d'empires coloniaux. En compétition entre eux, ces empires vont s'affronter. L'effet de la *reine rouge* provoque leur effondrement après deux guerres mondiales. L'algorithme de *recuit simulé* cristallise alors l'ensemble des nations en deux blocs idéologiques opposés. À l'est domine l'idéologie autoritaire-égalitaire des pays communistes ; à l'ouest domine l'idéologie libérale-inégalitaire issue des pays anglo-saxons (voir figure 10). La guerre froide s'instaure entre un communisme autoritaire, oublieux des libertés, et un capitalisme inégalitaire, oublieux de la fraternité.

Sous la houlette de son gouvernement central, l'URSS va rapidement marquer des points. Si les États-Unis sont les premiers à faire éclater une bombe H en 1952, l'URSS en fait autant seulement un an après. En 1957, elle lance le premier satellite artificiel. En 1961, elle met le premier homme en orbite. Les États-Unis s'inquiètent et s'organisent pour faire face à la compétition.

Bien adaptée à la reconstruction d'une société d'après-guerre, la structure économique de l'URSS s'avère beaucoup moins adaptable que celle des États-Unis. La bureaucratie soviétique freine son évolution. La *sélection naturelle* va favoriser la *culture* libérale, parce que c'est l'*espèce culturelle* la plus adaptable aux changements. En favorisant la compétition et les inégalités, elle facilite l'adaptation de la société à un progrès technique de plus en plus rapide. Inexorablement le « modèle américain » l'emporte.

Prenant modèle sur les États-Unis, le projet d'Union européenne prend forme. Au début, la croissance économique est rapide. En France, on parle des « trente glorieuses ». Mais, suite au choc pétrolier de 1973 lié à la guerre du Kippour, la croissance économique s'infléchit. Face à la puissance de l'Union soviétique, Ronald Reagan aux États-Unis et Margaret Thatcher en Angleterre décident d'intervenir en supprimant tout ce qui peut entraver les possibilités d'adaptation d'une société : c'est la dérégulation ou le « néo-libéralisme ».

Parce que moins adaptable, l'*espèce culturelle* représentée par le régime communiste de l'Union soviétique n'arrive plus à suivre. Une restructuration

économique s'impose : c'est la « pérestroïka ». Arrivé trop tard, le remède déstabilise l'Union soviétique qui s'effondre. Les Russes eux-mêmes reconnaissent la cause de cet effondrement, un manque de « glasnost », c'est-à-dire de liberté d'expression. On retrouve encore ici l'importance thermodynamique de l'information dans la formation d'une *structure dissipative* et son adaptation à l'environnement. L'effondrement de l'Union soviétique entraîne une chute rapide de son idéologie « autoritaire-égalitaire » représentée par le communisme.

Certains, comme Francis Fukumaya, en concluent un peu naïvement à une fin de l'histoire. Biologiquement, cela rappelle ce qui s'est passé au paléolithique où l'espèce *génétique Homo sapiens* l'a emporté sur les autres espèces du genre *Homo* parce qu'elle était la plus adaptable. On sait que, peu de temps après, l'espèce *Homo sapiens* a failli s'éteindre. Elle n'a survécu que grâce à la révolution *néolithique*. En sera-t-il de même de l'espèce *culturelle* maintenant dominante ? Jacques Blamont qualifie le XXI^e siècle de siècle des menaces. Notre *culture* actuelle est-elle menacée ?

15. Le siècle des menaces

Les deux derniers siècles sont caractérisés par un accroissement de la population mondiale et une croissance économique sans précédent. Cela se traduit par un épuisement rapide des ressources naturelles et par une pollution grandissante, allant jusqu'à un réchauffement climatique.

L'humanité ne pourra subsister qu'en maîtrisant et en restructurant son économie, mais elle ne peut le faire que collectivement.

Un effondrement de civilisations paraît inéluctable.

15.1. Peut-on prédire l'avenir ?

15.1.1. Les limites de la connaissance

Nous avons vu (section 2.5) qu'un système thermodynamique qui s'auto-organise a une évolution largement imprévisible. C'est le cas de l'humanité. Essayer de prédire son évolution est donc une entreprise hasardeuse.

Lorsqu'on cherche à prédire l'évolution de l'humanité, l'intuition est de peu d'utilité. Elle est même contre-productive. Le cerveau humain a évolué pour faire des prédictions à court terme, typiquement une année (les saisons), tout au plus à l'échelle d'une vie humaine. Il a beaucoup de mal à imaginer ce qui va se passer à l'échelle d'un siècle ou plus. L'expérience quotidienne ne nous est d'aucun secours. Nous avons en particulier tendance à rejeter tout ce qui s'avère désagréable ou non conforme à ce que nous ressentons.

L'opinion générale est qu'une bonne connaissance de l'histoire de l'humanité aide à comprendre son évolution. Les historiens ont constaté depuis longtemps que les phénomènes historiques ont tendance à se répéter. Aux périodes de croissance économique rapide succèdent régulièrement des périodes de stagnation. Nous en avons donné une explication. D'une manière générale, l'Histoire ne se répète jamais de la même façon. À elle seule, elle ne nous permet pas de comprendre où nous allons.

Dans les chapitres précédents, nous avons montré que l'évolution de l'Homme fait partie de l'évolution biologique et que ses périodes de stagnation sont de même nature que celles des *équilibres ponctués* en biologie. L'évolution de l'Homme n'est que la dernière phase de l'évolution biologique. La vie a explosé il y a environ un milliard d'années. La population humaine a commencé à dominer il y a seulement dix mille ans. Juger de l'évolution future de la vie sur Terre en ne regardant que l'Histoire de l'humanité revient à juger de l'évolution d'une année en ne regardant que la dernière seconde.

Pour prédire l'évolution future de l'humanité, il est nécessaire de prendre en compte toute l'évolution biologique. La thèse de ce livre est que celle-ci suit des lois de la thermodynamique. Ces lois sont de nature statistique. Elles ne permettent pas de faire des prédictions déterministes, mais permettent des estimations statistiques. Le problème est semblable à celui des prévisions météorologiques et climatiques. Il faut distinguer les prévisions à court terme des prévisions à long terme.

Les prévisions météorologiques sont des prévisions à court terme. Nous sommes tous habitués à regarder les prévisions météo tout en sachant qu'elles peuvent être mises en défaut. Dans le cas de l'humanité, c'est encore plus difficile, car la connaissance de ces prévisions peut influencer sur son évolution. Cela n'empêche pas les économistes de faire eux aussi des prévisions à court terme, même si celles-ci sont souvent erronées.

Contrairement aux exemples ci-dessus, nous ne chercherons pas à établir des prévisions détaillées à court terme, mais plutôt des prévisions générales à long terme, semblables aux prévisions climatiques. Dans ce cas la connaissance des lois de l'évolution s'avère plus contraignante. Si la loi de Gutenberg-Richter ne permet pas de prédire un seul tremblement de terre, elle permet de prédire avec précision la statistique des tremblements de terre futurs. C'est dans cette perspective que nous allons essayer de tracer l'évolution future de l'humanité.

Nous nous contenterons de décrire les événements les plus probables auxquels on peut s'attendre même si nous ne pourrions en prédire ni la date ni le cheminement exact. En cela nous serons aidés non seulement par la connaissance du processus général qui régit ces événements, mais aussi par les nombreux exemples d'application que nous offre la nature tant en biologie

que dans la partie déjà vécue de l'Histoire de l'humanité. Nous commencerons en rappelant le processus général de l'évolution.

15.1.2. Le processus d'évolution

La figure 4 (section 4.2) montre l'évolution du taux de dissipation d'énergie dans l'Univers. On constate que ce taux s'accroît de plus en vite. Nous avons vu que ce processus n'est pas continu, mais formé d'avalanches successives, chacune étant déclenchée par l'avalanche précédente. On peut donc considérer cette évolution de l'Univers comme une immense avalanche d'événements.

Chaque partie de cette immense avalanche est elle-même une avalanche. Ainsi l'évolution de la vie sur Terre est elle-même une avalanche constituée d'autres avalanches plus petites : avalanches de *procaryotes*, puis d'*eucaryotes*, et enfin d'organismes multicellulaires. Cette dernière comprend elle-même une avalanche d'animaux supérieurs ayant conduit aux grands singes puis à l'Homme. L'évolution de l'Homme est elle-même une avalanche faite de nombreuses avalanches plus petites dont nous avons esquissé l'Histoire. Nous vivons actuellement la fin de cette dernière appelée révolution industrielle. Elle-même fut entrecoupée de nombreuses avalanches encore plus petites et ainsi de suite. On reconnaît l'invariance par *changement d'échelle* du processus d'auto-organisation. Une caractéristique de ce processus est que dans chacune de ces avalanches l'efficacité avec laquelle l'énergie se dissipe s'accroît à chaque étape. Tout se passe comme si l'évolution allait de plus en plus vite. C'est l'effet de la *reine rouge* (section 6.1).

Il ne faut pas perdre de vue que ces avalanches ont les propriétés des tremblements de terre. Bien que les sismographes en enregistrent régulièrement, pour nous la grande majorité d'entre eux est imperceptible. De même la grande majorité des avalanches sont insignifiantes et passent inaperçues. C'est pourquoi l'évolution biologique est essentiellement faite de « stase » pendant lesquelles rien ne semble se passer. Occasionnellement apparaissent quelques changements mineurs. Parfois cependant toute la vie sur Terre s'en trouve transformée. Un bon exemple est celui des dinosaures. La population des dinosaures s'est maintenue de façon stable pendant 160 millions d'années, sans évolution notable. Il a fallu une perturbation importante (météore) pour faire basculer l'évolution en faveur des mammifères, encore plus dissipatifs d'énergie. C'est ce phénomène que le biologiste Jay Gould a décrit sous

le nom d'*équilibres ponctués*. Les périodes dites d'équilibre ou de stase sont « ponctuées » par de courtes périodes d'évolution très rapide.

J'ai dit plus haut qu'on ne pouvait pas prédire l'évolution de l'humanité en ne tenant compte que de son Histoire, car ce serait comme juger de l'évolution d'une année à partir de la dernière seconde. La thèse de ce livre est que le *néolithique* représente un changement majeur du mode de reproduction et de transmission de l'information biologique : c'est le passage de l'évolution *génétique* à l'évolution *culturelle*. L'équivalent le plus proche dans l'évolution antérieure est l'apparition d'organismes multicellulaires est de la reproduction par *méiose*. Cette apparition a entraîné ce qu'on appelle l'explosion du *Cambrien*. Il est donc tout à fait normal que la révolution *néolithique* ait entraîné elle aussi une explosion de la population et de la dissipation d'énergie. L'Histoire de l'humanité jusqu'à ce jour serait l'histoire de cette explosion.

Ce que l'évolution biologique nous apprend, c'est que tôt ou tard une nouvelle période de stase va s'établir et que l'évolution de l'humanité va nécessairement se stabiliser. Cela signifie que l'Histoire de l'humanité telle que nous la connaissons ne représente pas l'état « normal » de l'humanité, c'est-à-dire l'état de l'humanité lorsque son évolution sera stabilisée, mais seulement un état transitoire. Deux questions viennent alors à l'esprit. La première est : combien de temps va durer cet état transitoire ? La deuxième est : quel sera l'état de l'humanité lorsque son évolution se sera stabilisée ? Ce chapitre est une tentative de réponse à la première question. Le chapitre suivant est une tentative de réponse à la deuxième.

15.2. La fin de la croissance

15.2.1. La croissance démographique

La figure 12 montre l'évolution de la population mondiale durant les trois derniers millénaires. On y distingue clairement deux phases : une première phase de croissance lente jusqu'au XVIII^e siècle, suivie d'une phase d'expansion très rapide correspondant à ce qu'on appelle la « révolution industrielle ». Comme nous l'avons vu, la transition correspond au siècle des Lumières, véritable éveil de la conscience collective.

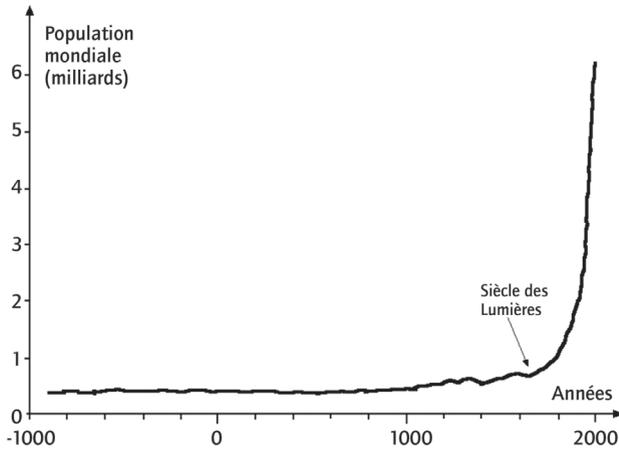


Figure 12. Évolution de la population mondiale (données Wikipedia).

En 1800, Malthus avait modélisé cette croissance rapide par une *exponentielle*, tout en reconnaissant que dans un monde fini toute croissance a des limites. Cinquante ans plus tard, inspiré par le travail de Malthus, le mathématicien belge Pierre François Verhulst propose une modélisation plus précise. Verhulst note que, chez les animaux, on observe aussi des phases de croissance rapide chaque fois qu'une nouvelle source de nourriture apparaît. Le niveau de la population s'ajuste alors en fonction de la nouvelle nourriture disponible. La modélisation de Verhulst conduit à une sigmoïde : la population croît rapidement puis se stabilise. Chez l'Homme, cette croissance serait due aux progrès des techniques agricoles. L'utilisation des *énergies fossiles*, c'est-à-dire l'industrialisation de l'agriculture, aurait permis à la croissance de se poursuivre jusqu'à nos jours.

Les démographes parlent de transition démographique. Lorsque les conditions de vie s'améliorent, le taux de mortalité infantile diminue, mais le taux de natalité se maintient, conduisant à une augmentation rapide de la population. Lorsque la population devient suffisamment nombreuse, le taux de natalité diminue et s'ajuste de façon à maintenir une population constante, mais à un niveau plus élevé que le précédent. C'est l'évolution observée dans les pays développés. Elle est en gros conforme au modèle de Verhulst.

La croissance actuelle de la population mondiale décrite par la figure 12 est due essentiellement aux pays en voie de développement qui n'ont pas encore terminé leur transition démographique notamment en Afrique. On s'attend donc à ce que la population mondiale se stabilise comme elle l'a fait dans les pays développés. La croissance s'est en effet infléchie puisque le temps de doublement de la population est passé de 30 ans en 1970 à 50 ans à l'heure actuelle.

Ceci montre que l'humanité finit de traverser une phase de croissance très rapide. L'état actuel de croissance que nous traversons, nous paraît être un état normal parce que nous l'observons depuis plusieurs générations, mais, c'est en réalité un état exceptionnel. On peut alors se demander pour quelle raison nous nous trouvons actuellement dans cet état. La réponse est très simple. Cet état de croissance a entraîné une prise de conscience par l'humanité des mécanismes qui régissent sa propre évolution (voir introduction). C'est justement parce que nous sommes dans cet état que nous prenons conscience de l'évolution.

Nous avons vu que l'existence de phases d'expansion rapide est tout à fait conforme aux lois de l'évolution et au phénomène des *équilibres ponctuels*. Elle est la conséquence du processus physique de *criticalité auto-organisée* (section 3.3). La période de croissance démographique mondiale que nous finissons de traverser n'est rien d'autre qu'une grande avalanche. Elle-même est constituée d'avalanches plus petites s'échelonnant dans le temps. La France semble avoir été un des premiers pays à stabiliser sa population. De 1850 à 1900, sa population cesse de croître, tandis que celle du reste de l'Europe fait plus que doubler. Aujourd'hui la population de l'Europe décroît. Les pays développés ont stabilisé leur population. Ce sera bientôt le tour des pays en voie de développement. Les démographes estiment que la population mondiale devrait se stabiliser aux alentours de 10 milliards d'individus vers l'an 2050.

Si l'humanité finit de traverser une phase d'expansion démographique d'ampleur exceptionnelle, des phases d'ampleur moindre se sont clairement produites dans l'Antiquité. Ainsi, l'expansion de l'Empire romain a dû être associée à une forte expansion démographique. Malheureusement les estimations sont très incertaines. La phase de stagnation qui a suivi semble être associée à une décroissance de la population. Sur le sol français, celle-ci aurait

décru d'un facteur 2 après la chute de l'Empire romain (entre 400 et 850). Comme on peut s'y attendre, le bas Moyen Âge est associé à une expansion démographique. La population y aurait cru de près d'un facteur trois (entre 850 et 1220).

Nous avons vu que ce phénomène est semblable à celui des *équilibres ponctués* en biologie (section 6.3), c'est-à-dire une évolution lente des espèces, entrecoupée de phases d'expansion rapide. Nous avons comparé l'évolution actuelle de l'humanité à l'explosion des organismes pluricellulaires au *Cambrien*. De même que le processus de reproduction de l'information *génétique* par la *méiose* serait la cause cette explosion, de même le processus de reproduction de l'information *culturelle* par les livres serait la cause de l'explosion démographique actuelle de l'humanité. Les deux processus sont bien fondamentalement de même nature.

Il est intéressant de noter que la phase d'expansion du *Cambrien* s'est terminée par une extinction de masse durant laquelle 85 % des espèces auraient disparu. Il est tentant de mettre ceci en rapport avec la chute démographique qui a suivi l'effondrement de l'Empire romain. Cela laisse augurer que notre phase d'expansion actuelle pourrait être suivie par une baisse de la population mondiale. Au lieu de se stabiliser vers 10 milliards d'individus, la population pourrait diminuer.

15.2.2. La croissance économique

La figure 13 montre l'évolution de la puissance mondiale dissipée en kW par individu durant le XX^e siècle. La droite horizontale, en bas de la figure, montre l'énergie dissipée due à notre *métabolisme*. Jusqu'au XVIII^e siècle, l'énergie musculaire était notre principale source d'énergie. L'utilisation occasionnelle de la force musculaire animale, de moulins à vent ou à eau ne fournissait qu'un petit complément d'énergie. Au XIX^e siècle, la dissipation d'énergie extrasomatique (c'est-à-dire en dehors du corps humain) a commencé à devenir de plus en plus importante. La courbe de la figure 13 montre son évolution au cours du XX^e siècle.

Il est important de noter que les chiffres indiqués ici sont une moyenne étendue à tous les individus de la planète. La loi de Pareto s'appliquant aussi à la dissipation d'énergie, 80 % de la puissance indiquée ici est dissipée par

20 % de la population mondiale, celle des pays développés. Typiquement un Européen dissipe aujourd'hui 7kWh tandis qu'aux États-Unis un Américain dissipe plus de 10kWh.

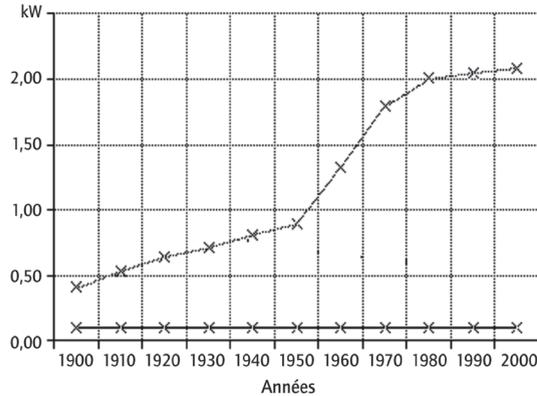


Figure 13. Évolution de la puissance dissipée par individu dans le monde⁴⁸.

On remarque l'accroissement important du taux de dissipation d'énergie à la fin de la Seconde Guerre mondiale dû à une réorganisation majeure des sociétés favorisant le commerce et le développement des moyens de transport. Cette avalanche à l'échelle mondiale est elle-même constituée de plus petites avalanches échelonnées dans le temps et dans l'espace sur tout le globe.

La figure 13 montre que la dissipation mondiale d'énergie tend maintenant à stagner de nouveau. Ceci est dû à la stagnation de l'économie dans les pays développés, la croissance actuelle étant principalement due à des pays en développement comme la Chine. L'ensemble de la courbe est consistant avec le modèle de *criticalité auto-organisée*, la phase d'expansion rapide située entre 1950 et 1970 étant encadrée par des phases d'expansion beaucoup plus faible.

Alors que les démographes pensent que la population mondiale va se stabiliser au cours du XXI^e siècle, la majorité des économistes pensent que la croissance

48. Voir par exemple le site de Jean-Marc Jancovici : <http://www.manicore.com/documentation/serre/consommation.html> et les données de l'IEA (International Energy Agency) : <http://www.iea.org>.

économique mondiale va se poursuivre. Une objection vient immédiatement à l'esprit : la croissance actuelle étant due aux *énergies fossiles*, l'épuisement de ces ressources va nécessairement entraîner un arrêt de la croissance. À cela les économistes répondent : on trouvera autre chose. Que nous disent les lois de la thermodynamique ?

Elles donnent aux économistes à la fois tort et raison. Elles leur donnent raison en ce sens que les sources d'énergie ne manquent pas. Depuis Einstein on sait que la matière elle-même est une forme d'énergie. Quelques tonnes de matière suffiraient actuellement à alimenter en énergie l'humanité entière pendant un an. Elles leur donnent tort en ce sens que ce n'est pas de l'*énergie libre*. La production d'énergie actuelle par fission nucléaire n'aurait pas été possible sans les progrès dus au pétrole. La construction de nouvelles usines nucléaires ou simplement l'entretien de celles qui existent actuellement sera difficile dans une économie pétrolière en déclin. Quant à la production d'énergie par fusion nucléaire, elle est d'une telle difficulté que seule une communauté internationale de pays développés peut se permettre de financer une étude comme celle du projet ITER⁴⁹ de Cadarache. On retrouve la loi des rendements décroissants que beaucoup d'économistes semblent oublier ou mettre en doute. Nous avons vu qu'elle conduit à des effondrements de civilisations (section 13.4).

Si l'interprétation de la figure 13 en termes de *criticalité auto-organisée* est correcte, alors il n'y aura pas de reprise économique sans rupture suivie d'une restructuration de nos sociétés. Il semble opportun de rappeler ici les études menées au MIT à l'initiative du *club de Rome* dont les résultats ont été publiés en 1972 dans un rapport intitulé « *The limits of growth* » (Les limites de la croissance), rapport connu aussi sous le nom de rapport Meadows. La conclusion de ce rapport est que la croissance actuelle ne peut pas se poursuivre sans un effondrement du monde qui nous entoure. Si l'on ne fait rien pour l'éviter (scénario standard), l'effondrement sera déclenché par l'épuisement des ressources pétrolières. Avec les ressources évaluées actuellement, il aura lieu d'ici peu.

Le rapport envisage aussi d'autres scénarios. Si l'on suppose les réserves de pétrole inépuisables, alors l'effondrement sera dû à la pollution (on sait ce

49. International Thermonuclear Experimental Reactor.

qu'il en est aujourd'hui des gaz à effet de serre). Si l'on suppose que la pollution puisse être contrôlée, alors l'effondrement sera dû à l'insuffisance de la production agricole. Si l'on suppose enfin que celle-ci puisse être accrue, l'effondrement sera dû à l'étendue insuffisante des terres cultivables.

Ce rapport très pessimiste a été critiqué par les économistes parce que non conforme aux lois qu'ils ont établies. Encore de nos jours, l'opinion générale est que, puisqu'aucun effondrement ne s'est produit depuis la publication du rapport il y a 38 ans, ses prédictions étaient fausses. La figure 14 montre cependant que les prédictions numériques du scénario standard (standard run) sont tout à fait conformes à l'évolution mondiale telle qu'on l'a observée jusqu'à tout récemment (*observed data*). Elles sont donc plus que jamais d'actualité. Il est intéressant de noter que, dans son scénario standard, le rapport Meadows prévoit une chute de la population qui redescendrait à 4 ou 5 milliards d'individus à la fin du XXI^e siècle.

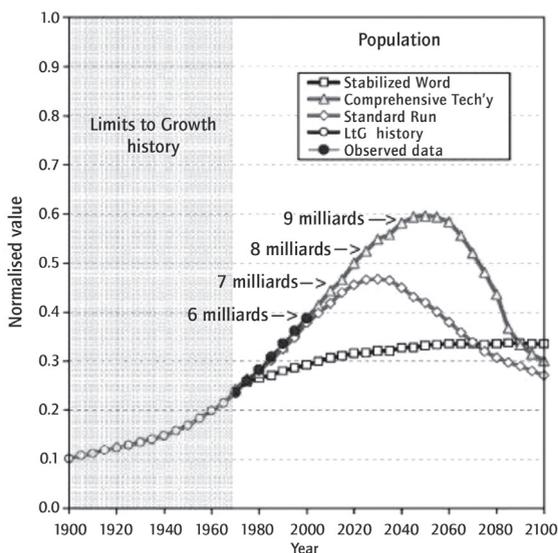


Figure 14. Évolution de la population mondiale (rapport Meadows) d'après Turner⁵⁰.

50. Graham Turner, « A comparison of the limits to growth with thirty years of reality », CSIRO paper (2008).

Le lecteur aura reconnu que les conclusions de ce rapport sont aussi conformes aux lois de la thermodynamique que nous avons décrites. Comme l'a rappelé Georgescu Roegen, en dissipant de l'énergie l'humanité modifie nécessairement son environnement. On sait maintenant que plus elle modifie son environnement, plus vite elle doit se réadapter. La figure 14 montre qu'elle n'est déjà plus capable de se réadapter assez vite pour éviter un effondrement de la population vers 2030. C'est bien l'effet de la *reine rouge* en biologie ou le processus de *criticalité auto-organisée* en physique.

Ce processus est mis clairement en évidence par les simulations numériques du rapport Meadows. On le retrouve localement tout au long de l'histoire de l'humanité, non seulement en occident (chapitre 14), mais aussi sur le continent américain avec l'exemple des civilisations Anasazi et Maya. Le cas d'effondrement le plus spectaculaire est sans doute celui de l'île de Pâques (Rapa Nui) dans l'océan Pacifique. Pour la description de ces événements, je réfère le lecteur à la littérature sur ces sujets⁵¹. Dans tous les cas il semble qu'une classe dirigeante ait cherché à maintenir la croissance économique, entraînant des modifications irréversibles de l'environnement fatales pour la civilisation concernée⁵².

Au vu de ces exemples, l'effondrement de nos civilisations actuelles paraît hautement probable, cette fois à l'échelle du globe tout entier.

15.2.3. La croissance de l'information

Thermodynamiquement, la croissance mondiale de la dissipation d'énergie, c'est-à-dire la croissance démographique et économique, est liée à l'auto-organisation de l'humanité. Cette auto-organisation est rendue possible par la croissance continue des échanges d'information entre individus. Le tableau 2 montre la progression de plus en plus rapide des techniques d'information et de communication. Là encore, il s'agit bien d'une avalanche, chaque progrès scientifique et technique entraînant d'autres qui vont eux-mêmes en entraîner d'autres. Comme toute avalanche, elle ne s'arrêtera

51. Voir les livres de Jared Diamond et de Franz Broschwimmer cités dans la bibliographie.

52. Franz Broschwimmer, « Une brève histoire de l'extinction des espèces », Agone, 2010.

que lorsque le processus ne sera plus assez alimenté en énergie, c'est-à-dire avec l'effondrement de nos sociétés.

On assiste actuellement à la formation d'un extraordinaire cerveau global. Alors qu'un neurone mémorise un bit d'information, un individu mémorise des gigabits. Tandis qu'une poignée de connexions s'établissent entre les neurones de notre cerveau, chaque individu de la société peut maintenant se connecter quasi instantanément avec n'importe quel autre parmi des milliards d'individus sur toute la planète. Contrairement à ce qui se passe dans notre cerveau, ces connexions sont à double sens et évoluent constamment au cours du temps.

Parmi les nouveaux moyens de communication, la radio et la télévision jouent un rôle particulier. La transmission est à sens unique et va d'un très petit nombre d'individus à un très grand nombre. Ces moyens de communication jouent donc un rôle équivalent à celui du cerveau hormonal. On sait que celui-ci sécrète des *hormones* qui conditionnent les réactions d'ensemble du cerveau, en particulier son état d'éveil ou de sommeil.

La partie droite du tableau 2 montre la progression des techniques de mémorisation de l'information. On sait que depuis 40 ans leurs performances croissent *exponentiellement*. C'est la loi empirique dite de Moore⁵³. La mise en réseau des ordinateurs conduit à un phénomène remarquable, la création d'un cerveau mondial extrasomatique. On assiste actuellement à une mise en mémoire frénétique des connaissances de l'humanité de façon à les rendre accessibles sur le Web. Nous verrons comment cette mise en mémoire va accélérer l'évolution de l'humanité.

53. Du nom de l'informaticien américain Gordon Moore.

Date	Technique	Date	Technique
	feux	-3300	écriture
	courrier	-1300	alphabet
	pigeons voyageurs	600	imprimerie
1791	sémaphore	1440	typographie
1837	télégraphe	1839	photographie
1876	téléphone	1877	phonographe
1895	radio	1888	magnétophone
1926	télévision	1953	tores de ferrite
1971	arpanet	1956	disque dur RAM
1981	minitel	1970	puces de mémoire
1982	internet	1982	CD-ROM
1991	web	1995	DVD

Tableau 2. Progression des principaux moyens de transmission (à gauche) et de mémorisation (à droite) de l'information.

Un certain nombre de spécialistes en intelligence artificielle, comme Ray Kurzweil, ont spéculé sur ce qui se passera au moment où l'intelligence artificielle des cerveaux extrasomatiques dépassera celle des cerveaux humains, moment baptisé « singularité ». Je rassure tout de suite le lecteur. Il ne se passera rien de plus qu'au moment où la dissipation d'énergie extrasomatique a dépassé celle de l'énergie musculaire, moment qu'on pourrait baptiser « singularité énergétique ». De même que la singularité énergétique a conduit à une croissance rapide de la dissipation d'énergie, de même la « singularité informatique » conduira à une croissance rapide de la prise de conscience de l'Homme de son destin (section 16.3).

15.3. Vers un effondrement

15.3.1. La mondialisation

Nous avons vu qu'on peut interpréter l'évolution *culturelle* de l'humanité en termes de formation d'un cerveau global (section 14.4.2). On assiste à la formation et à l'extension de *domaines d'Ising culturels*. Nous avons vu que, grâce à la division du travail, plus un *domaine d'Ising* est grand, plus il dissipe

efficacement l'énergie. La tendance est donc à la formation de *domaines d'Ising* de plus en plus grands. Mais plus un domaine dissipe d'énergie, plus vite il fait évoluer son environnement et plus vite il s'effondre. Ainsi deux tendances opposées s'affrontent :

- l'expansion des *domaines d'Ising culturels* (macroévolution) ;
- la fragmentation de ces domaines due à l'effet de la *reine rouge* (microévolution).

C'est le processus de maximisation de la production d'*entropie* par *recuit simulé* que nous avons pu suivre tout au long de l'évolution de l'humanité au chapitre 14. Nous en avons vu de nombreux exemples comme la croissance et l'effondrement de l'Empire romain ou, à l'époque contemporaine, la croissance et l'effondrement des empires coloniaux. Plus récemment nous avons assisté à la formation et à l'effondrement du « bloc soviétique ».

Les progrès actuels de la communication sont tels qu'ils engendrent une mondialisation des connaissances. Ce qui s'était passé en Europe au siècle des Lumières se passe aujourd'hui à l'échelle de la planète tout entière. L'humanité prend globalement conscience de son évolution. Sa dissipation d'énergie est dominée par un ensemble de pays d'idéologie dite néo-libérale. Née aux États-Unis cette idéologie s'est étendue à tous les pays anglo-saxons puis à l'Europe. On parle de mondialisation néo-libérale et de « pensée unique ». La *culture* américaine se répand partout dans le monde. La langue américaine tend à devenir un code *mémétique* universel. La « biodiversité » *culturelle* est menacée. Il est clair que si un effondrement doit se produire, ce sera un effondrement de cette *culture* actuellement dominante. Elle s'effondrera comme se sont effondrées la *culture* gréco-romaine, la chrétienté du Moyen Âge, ou les monarchies absolues.

On peut essayer d'estimer la date de cet effondrement en comparant les durées de vie des divers *domaines d'Ising* que nous avons mentionné. On est à nouveau frappé par l'extraordinaire accélération de la vitesse d'évolution. Entre la fondation de la République romaine et la fin de l'Empire romain se sont écoulés 900 ans. De Charlemagne à la guerre de Cent Ans, la phase de croissance du Moyen Âge a duré 500 ans. Les empires coloniaux ont duré typiquement 100 à 200 ans. L'Union soviétique n'aura duré que 70 ans. Cela laisse à penser que l'idéologie actuelle s'effondrera d'ici peu.

Nous avons mentionné (section 15.1) que l'Homme a beaucoup de mal à imaginer ce qui va se passer à l'échelle d'un siècle ou plus. Lorsque la durée de vie des idéologies devient du même ordre de grandeur que la durée de vie humaine, alors l'Homme devient plus conscient des processus d'évolution. Le XXI^e siècle sera un siècle de prise de conscience de l'humanité des règles qui régissent son évolution. L'Homme se retrouvera alors face à son destin. Ce sera à lui de le prendre en charge.

15.3.2. De la sélection K à la sélection r

Nous avons expliqué que les effondrements sont dus à l'effet de la *reine rouge* (section 12.4). Une espèce animale disparaît lorsque ses *gènes* n'ont plus le temps d'évoluer. De même, une civilisation disparaît lorsque sa *culture* n'a plus le temps d'évoluer. C'est la crise de la *culture* décrite par Hannah Arendt⁵⁴. On ne sait plus quel savoir transmettre. Le système scolaire s'effondre. Les jeunes sont au chômage. Il n'y a pas si longtemps on exerçait toute sa vie le même métier. Aujourd'hui, un ingénieur change de patron en moyenne tous les trois ans. Il doit constamment se recycler. Ceux qui ont la chance d'avoir encore un emploi courent toujours plus vite pour rester sur place. Alors que le progrès technique devrait nous permettre de gagner du temps, nous en avons de moins en moins.

Ce phénomène d'accélération est connu depuis longtemps. En 1872, l'historien Jules Michelet écrivait déjà⁵⁵ : « Un des faits les plus graves, et les moins remarqués, c'est que l'allure du temps a tout à fait changé. Il a doublé le pas d'une manière étrange. Dans une simple vie d'homme (ordinaire de soixante-douze ans), j'ai vu deux grandes révolutions qui autrefois auraient peut-être mis entre elles deux mille ans d'intervalle ». De nos jours, un spécialiste de vulgarisation scientifique, le journaliste américain James Gleick publie « *Toujours plus vite. De l'accélération de tout ou presque.* » Bien plus, un sociologue allemand Hartmut Rosa⁵⁶ publie une thèse sur ce sujet. Selon lui : « À cause de la rapidité de l'économie ou des progrès technologiques,

54. Hannah Arendt, « *La crise de la culture* », Gallimard (1972).

55. Jules Michelet, « *Histoire du XIX^e siècle* » (Introduction) (1872).

56. Hartmut Rosa, « *Accélération, La Découverte* » (2010). Une des manifestations modernes de cette accélération est l'engouement des jeunes pour les restaurants « fast food ».

les lois qui exigent un certain de temps de réflexion, de débat, de préparation deviennent obsolètes avant d'être effectives ».

Ainsi, la société passe plus de temps à se restructurer qu'à progresser. Il en est de même des entreprises. Pour subsister, elles doivent constamment se restructurer et innover. On peut les diviser en trois catégories. Celles qui cherchent à éviter les risques et périssent peu à peu. Celles qui prennent des risques et font faillite. Celles qui prennent des risques et amassent des fortunes. Être chef d'entreprise devient un exercice de haute voltige. On conçoit qu'on leur offre des parachutes dorés. Les inégalités de richesses ne cessent de croître. La classe moyenne s'effondre. La croissance économique stagne.

Reprenons l'exemple du paysan qui investit en plantant des vignobles (section 13.4). Lorsque la demande évolue rapidement, notre paysan va chercher à éviter les risques en diversifiant ses cultures. Il perd alors l'avantage de l'*économie d'échelle*. Il sait que de toute façon une partie de son investissement ne sera pas rentabilisée. L'essentiel est que le gain sur la partie qui s'avérera rentable compense suffisamment les pertes sur la partie qui ne l'aura pas été. Dans tous les cas son gain sera inférieur à ce qu'il aurait pu être, avec un peu de chance, s'il n'avait pas diversifié, mais il a pris moins de risques. Il a sacrifié l'adaptation en faveur de l'adaptabilité.

On reconnaît ici la stratégie favorisée en biologie par la sélection r (section 6.4). Celle-ci favorise la multiplication des petits organismes se reproduisant rapidement, c'est-à-dire la diversification. Dans nos sociétés actuelles, elle favorise une multiplication de petites entreprises à courte durée de vie. Pour éviter la faillite, les grosses entreprises sous-traitent tout ce qui peut l'être à des entreprises plus petites.

De même que la sélection r favorise la multiplication de petits organismes, elle favorise la contestation. D'un côté les riches font tout pour maintenir l'idéologie qui, en les enrichissant, leur a permis de saisir le pouvoir. Ayant monopolisé les médias, ils inondent la population d'*hormones* du sommeil. Endormie, la majorité de la population s'accroche à l'idéologie ambiante. D'un autre côté, on assiste à la naissance d'une multitude de mouvements contestataires, en compétition les uns avec les autres.

Les mouvements en faveur des droits de l'Homme et de la laïcité défendent la « biodiversité » *culturelle*. Les mouvements sociaux luttent contre le capitalisme, sans savoir par quoi le remplacer. Les mouvements écologiques luttent pour la protection de l'environnement, sans en mesurer les implications. Des mouvements apparaissent qui s'opposent à la croissance sans arriver à se mettre d'accord sur la stratégie à adopter. Bref, on ne sait plus à quel saint se vouer, d'où une montée des sectes religieuses qui rappelle l'apparition du protestantisme à la fin du Moyen Âge.

La sélection r se manifeste également dans la transmission des connaissances. La nation française s'était dotée d'un système d'éducation nationale reflétant son idéologie républicaine et laïque. Alors que la *culture* française se dissout dans une *culture* américano-européenne, son système éducatif se délite en faveur d'une multitude d'écoles privées de toutes confessions.

15.3.3. Du rejet à la récupération

Dans un premier temps les idées non conformes à l'idéologie dominante sont rejetées. Au temps des Romains, les premiers chrétiens sont persécutés. À la fin du Moyen Âge, les hérétiques sont poursuivis. En 1972, la publication du rapport Meadows fait aussi l'objet d'un large rejet. Les premiers partis politiques écologistes apparaissent comme des partis d'opposition. Ils font toutefois prendre conscience aux individus de leur dépendance de l'environnement.

Peu de temps après, on découvre l'apparition d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique. On sait que sans ozone pour arrêter le rayonnement ultraviolet du Soleil, aucune vie n'est possible sur Terre. En 1985, l'alerte est donnée. Pour la première fois, des dispositions internationales de protection de l'environnement sont prises. Le protocole de Montréal est signé en 1987. Il est ratifié en 2009 par 196 pays. C'est le premier traité environnemental à atteindre ce statut. Ce succès a été possible parce que les mesures prises n'affectaient pas sensiblement l'économie des pays concernés.

Dans les années 80, un autre problème préoccupe les scientifiques, celui des gaz à effet de serre. En 1988, un groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat (GIEC) est créé. Il publie un rapport tous les 5 ans.

D'année en année, les craintes deviennent des quasi-certitudes : depuis le début du ^{xx}e siècle, la température moyenne de notre planète s'accroît à une vitesse sans précédent dans l'histoire du globe. Un accroissement aussi rapide ne peut vraisemblablement être attribué qu'aux gaz à effet de serre émis par l'industrialisation. Fin 1997, des négociations internationales ont lieu à Kyoto. Mais cette fois, les mesures à prendre affectent sérieusement l'économie de tous les pays. Les États-Unis refusent de ratifier le protocole de Kyoto.

Certains rejettent encore la réalité. La majorité affecte de croire que la protection de l'environnement est compatible avec le mode actuel de croissance économique. On parle de « développement durable » et on se contente de créer des permis d'émissions négociables. Rappelées en 1979 par Georgescu Roegen, les lois de la thermodynamique sont ignorées. Cela ressemble à l'attitude des Romains qui ont mis le Dieu des chrétiens dans leur Panthéon, temple dédié à tous les dieux. Comme si un Dieu monothéiste était compatible avec une religion polythéiste. On est passé du rejet à la récupération idéologique. S'opposant à l'idée de « développement durable », de petits groupes osent affirmer que la protection de l'environnement est incompatible avec la croissance actuelle. Ce sont les « objecteurs de croissance ». Ils sont encore très minoritaires.

La montée de l'opinion en faveur des mouvements écologistes s'accompagne d'une montée en faveur d'une agriculture paysanne, plus respectueuse de l'environnement. L'homologation des semences et surtout la production industrielle d'organismes *génétiquement* modifiés (OGMs) engendrent une levée de boucliers. Des associations se développent pour le maintien de l'agriculture paysanne (AMAPs). Elles offrent une alternative aux grandes surfaces. L'usage intensif des engrais chimiques et des pesticides est de plus en plus critiqué. Nombreux sont ceux qui préfèrent l'agriculture biologique. Mais elle aussi s'industrialise. Elle est récupérée par les grandes surfaces.

15.3.4. Un problème sans issue

En 1989, le mur de Berlin est démoli. C'est la victoire de l'Occident. Le bloc soviétique s'effondre. L'idéologie communiste est définitivement rejetée. Ceux qui sont restés communistes n'osent plus dire qu'ils le sont. Divisés entre eux, les partis de gauche continuent cependant leur lutte alimentée par

la montée des inégalités sociales. Persuadée que la croissance économique est compatible avec une réduction des inégalités sociales, l'idéologie socialiste continue à rallier des suffrages. Hélas, nous avons vu qu'elles sont incompatibles (section 13.5).

Peu à peu l'Homme découvre la dure réalité. Nous ne pouvons ni réduire les inégalités sociales ni protéger notre environnement sans ralentir notre croissance économique. Or nous sommes tous en compétition pour maximiser la dissipation d'énergie. Pour un pays, ralentir sa croissance signifie perdre sa compétitivité. Il faut donc courir le plus vite possible. Pour paraphraser Margaret Thatcher, il n'y a pas d'alternative⁵⁷. On retrouve bien là l'effet de la *reine rouge*. Il conduit tout droit à l'effondrement de nos sociétés.

N'y a-t-il vraiment aucun moyen de s'en sortir ? C'est impossible individuellement. Le premier qui se met à courir moins vite se fait doubler par les autres. Il est aussitôt éliminé de la course par la *sélection naturelle*. La seule solution serait de se mettre tous d'accord pour ralentir collectivement notre croissance économique. C'est le fameux dilemme du prisonnier. Cela n'est possible que si une coopération étroite s'établit entre tous les pays du monde. Établir une telle coopération demande un effort de longue haleine. C'est la stratégie du donnant-donnant (section 12.1). Nous le voyons à la difficulté de maintenir les accords de Kyoto. En biologie, les exemples que j'ai décrits concernant les bactéries, les amibes ou les chauves-souris vampires, montrent qu'un tel effort n'est consenti qu'en période de vaches maigres, lorsque tout va mal.

Aujourd'hui, même si les richesses sont très inégalement réparties, nous sommes en période d'abondance et de surproduction. Nous sommes pris dans un cercle vicieux où seul le maintien de la croissance économique permet de maintenir notre niveau de vie actuel. On comprend qu'aucun gouvernement ne veuille prendre le risque de ralentir la croissance de son pays. Il ne le fera que si tous les autres gouvernements du monde le font, et si aucun n'a la possibilité de tricher. Cela implique une remise en question complète des fondements actuels de l'économie. On conçoit aisément que

57. Expression restée sous la forme du sigle « TINA » (*There is no alternative*).

cela ne se produira pas, sauf si tout va mal. Endormi par les *hormones* des médias (section 15.2.3), le cerveau global de nos sociétés ne se réveillera que lorsque les « cacahuètes » économiques cesseront totalement d'arriver (section 14.4.2). Malheureusement, quand cela se produira, il sera trop tard. L'effondrement de nos sociétés paraît inéluctable.

16. L'avenir de l'humanité

Les exemples de la physique et de la biologie nous aident à comprendre comment nos sociétés actuelles évoluent : nous modifions notre environnement plus vite que nous ne pouvons nous y adapter. Cela nous entraîne vers un effondrement général de l'économie suivi d'une restructuration.

La thèse proposée ici est que l'humanité évolue vers la formation d'un organisme planétaire unique constitué de régions indépendantes, mais solidaires. Elle prendra de plus en plus conscience de la nécessité de contrôler collectivement son environnement. Devenue plus efficace et plus résiliente, l'économie tendra alors progressivement vers un état stationnaire de longue durée.

16.1. L'effondrement

Nous entrons maintenant dans le domaine de la spéculation. Connaissant le mécanisme des effondrements, nous pouvons cependant essayer d'imaginer ce qui va se passer. Nous savons qu'il s'agit d'un processus d'avalanches, c'est-à-dire d'une suite accélérée de crises diverses (financières, sociales, etc.) et de gravité croissante. On ne peut prévoir ni la date ni l'ampleur des avalanches, mais les montagnards savent quand il y a danger d'avalanche. Ils le voient à l'état de la neige.

Il en est de même pour les sociétés humaines. Il y a danger lorsque la vitesse d'évolution d'une société devient incompatible avec son temps d'adaptation. C'est le cas de toutes les sociétés qui subissent un développement rapide, qu'elles soient avancées ou non. On le constate au niveau des entreprises qui ne trouvent plus de débouchés compatibles avec leurs investissements et font faillite. On le constate au niveau des jeunes qui ne trouvent plus d'emploi compatible avec leurs études et se droguent ou se suicident. Une telle société est instable. Le moindre événement peut en créer une avalanche d'autres.

16.1.1. Exemples d'effondrement

Pour décrire le phénomène, on peut s'inspirer aussi bien de modèles physiques ou biologiques (tremblements de terre, feux de forêt, extinction des dinosaures) que de modèles humains (effondrements historiques des sociétés du passé).

Prenons celui de la végétation dans un écosystème. Tant que l'environnement est stable, des végétaux de plus en plus grands apparaissent. Une forêt se développe. Créant de l'ombre, elle limite le développement de la végétation basse. Mais les arbres se reproduisent lentement. Lorsque le climat change, ils périssent, tandis que la végétation basse se renouvelle et prend de l'essor. Peu à peu le bois mort s'accumule. À la première sécheresse, c'est l'incendie de forêt. La végétation basse prend alors le dessus, créant un nouvel écosystème.

Ce modèle est bien adapté à la situation du monde à la fin du XIX^e siècle. À cette époque les peuples différaient par leur *culture*, comme les plantes d'un écosystème différent par leurs *génomés*. La population était encore jeune et le pétrole devenait une source abondante d'énergie. Au XX^e siècle l'incendie a pris la forme de deux guerres mondiales. Après avoir couvé encore un moment sous la forme d'une guerre froide, le feu a fini par s'apaiser. Des cendres est née une Europe libérale (section 14.5.3).

Aujourd'hui l'uniformisation des cultures, le vieillissement des peuples riches et le coût croissant de l'énergie rendent la situation moins inflammable. Le modèle des dinosaures semble plus approprié. Après 165 millions d'années d'existence, leur *génomé* devenait de moins en moins adapté à leur environnement. Il semble qu'un météore ait provoqué un refroidissement temporaire de la planète, peut-être accentué par des éruptions volcaniques. Les dinosaures se seraient éteints faute de nourriture. Nos démocraties libérales pourraient s'éteindre faute de pétrole.

Parmi les modèles historiques, le mieux adapté est certainement celui de la fin de l'Empire romain. La République romaine a d'abord engendré de fortes inégalités sociales, créant des insurrections comme celle de Spartacus. Elle n'a pu maintenir sa croissance économique qu'en formant un empire tout autour

du bassin méditerranéen, phénomène tout à fait analogue à la mondialisation actuelle. Au III^e siècle, c'est le chômage et la crise monétaire. Nous connaissons cela aussi. Le monde romain protège ses frontières de l'immigration. Actuellement l'Europe et les États-Unis en font tout autant. Les Romains ont cessé de protéger leurs frontières parce qu'ils n'en avaient plus les moyens économiques.

Finirons-nous envahis comme eux ? Sans doute pas militairement envahis, mais physiquement remplacés. Avec le progrès des communications, la culture occidentale étend son influence partout dans le monde. Alors que le niveau moyen d'éducation baisse dans les pays développés, il augmente dans les pays en voie de développement. Il n'y a plus de hordes barbares, mais des pays qui, pour éviter d'être éliminés par la *sélection naturelle*, cherchent par tous les moyens à atteindre notre niveau de dissipation d'énergie. Malheureusement, plus un pays essaye de se développer vite, plus il a de chances de s'effondrer. C'est toujours l'effet de la *reine rouge*.

À l'échelle locale, les exemples d'effondrements abondent, notamment aux États-Unis. Sujet à des développements rapides, ce pays est connu pour ses villes fantômes. De nos jours, l'exemple le plus spectaculaire est sans doute la ville de Détroit. Large comme Manhattan, Boston et San Francisco réunis, cette ville hébergeait en 1950 deux millions d'habitants. Aujourd'hui elle ne contient plus que sept cent mille habitants sous forme de communautés indépendantes dispersées dans un vaste champ de ruines. Cet exemple fascine, car il donne un avant-goût de ce qui risque de se produire à très grande échelle.

Il montre l'aspect essentiel du processus : un changement d'environnement économique provoque l'effondrement d'une communauté organisée à grande échelle. Celle-ci est remplacée par une constellation de petites communautés indépendantes les unes des autres. Si l'on veut prévoir ce qui va se passer, il nous faut analyser l'évolution de notre environnement et déterminer les aspects auxquels notre société est le plus sensible. Quant à la cause initiale qui déclenchera l'avalanche, nous savons qu'il s'agit d'une fluctuation aléatoire. C'est le clou du fer à cheval de Benjamin Franklin (section 3.4.2). Cette cause ne peut être déterminée à l'avance.

16.1.2. L'évolution de l'environnement

On parle de plus en plus de problèmes d'environnement. Nos ressources minérales et énergétiques s'épuisent. La biodiversité diminue. L'air, la terre, l'eau sont de plus en plus pollués, le climat se réchauffe. Une éruption volcanique ou un tremblement de terre, qui autrefois n'auraient causé que des dégâts locaux, deviennent de nos jours une catastrophe internationale⁵⁸. Adaptés à un environnement donné, nous sommes devenus de moins en moins adaptables.

Comme toute *structure dissipative*, nous sommes principalement adaptés à nos sources d'énergie. Depuis deux siècles nos sociétés dévorent des carburants fossiles. De nos jours 85 % de l'énergie que nous dissipons en provient, dont un tiers est le pétrole. C'est le talon d'Achille de nos sociétés. Le rapport Meadows a largement confirmé ce point de vue. Jusqu'ici le ralentissement économique des nations a été compensé par une ouverture croissante de leur économie vers l'extérieur, c'est-à-dire par un flux croissant de biens et services. Ces flux reposent sur des moyens de transport, notamment les transports routiers et surtout aériens, et ceux-ci reposent sur nos réserves pétrolières.

La plupart des experts s'accordent pour dire qu'actuellement la production pétrolière mondiale plafonne. Lorsque la demande commence à excéder la production, on parle de pic pétrolier. Ce sera vraisemblablement plutôt un plateau. Ce plateau semble avoir été atteint dès 2008. Le prix du pétrole a augmenté, provoquant la crise économique que l'on sait. La ruée des États-Unis sur leurs schistes bitumineux confirme que c'est bien là l'origine véritable de la crise. Ce qui s'est passé en 2008 peut se reproduire à tout moment. D'une fragilité croissante, notre économie est de plus en plus sensible à la moindre hausse des prix. Une telle hausse peut provoquer un effondrement général de l'économie. On parlera d'un nouveau choc pétrolier. Il pourrait être fatal aux sociétés occidentales.

Notre agriculture est devenue particulièrement dépendante du pétrole. Elle en dépend non seulement pour alimenter les tracteurs, mais aussi pour

58. Citons comme exemple les événements récents au Japon qui affectent la production automobile en Europe.

l'irrigation et pour la fabrication des engrais chimiques et des pesticides. Elle en dépend aussi pour le transport. Nos produits agricoles viennent de régions souvent lointaines où la main-d'œuvre est bon marché. Dans les pays développés, des terres cultivables proches des villes sont chaque jour bétonnées. On prévoit 9 milliards d'individus sur Terre au milieu de ce siècle. Sans pétrole, on serait ramené à l'agriculture du début du xx^e siècle. Elle alimentait 5 fois moins d'individus. 7,2 milliards d'individus vont-ils mourir de faim ?

Jugeant d'après l'évolution passée, une grande majorité d'économistes pensent que nous trouverons des solutions techniques à la plupart de nos problèmes. Des efforts sont déjà faits pour développer des sources d'énergies renouvelables comme les éoliennes. On trouvera tout aussi bien des substituts au pétrole. On fabrique déjà des biocarburants (voir compléments sur l'énergie). Le problème est que ces développements nouveaux demandent du temps.

Il y a plus grave. Le rapport Meadows a montré que, même si l'approvisionnement en pétrole était résolu, un autre problème surgirait. Dans ce cas, la pollution serait la cause de l'effondrement. L'exploitation des schistes bitumineux provoque déjà des catastrophes écologiques. Le problème majeur sera alors l'insuffisance d'eau potable. En créant des zones désertiques, le réchauffement climatique pourrait l'aggraver. En supposant même que la pollution soit contrôlée, la production agricole risquera alors de devenir insuffisante.

Le véritable problème est que nous faisons évoluer notre environnement à une vitesse supérieure à celle à laquelle nous sommes capables de nous y adapter. C'est cela l'effet de la *reine rouge*. Faute de temps pour développer des solutions à long terme, nous nous efforçons de maintenir coûte que coûte nos structures actuelles en développant des solutions à court terme qui ne font qu'aggraver les problèmes. Prenons comme exemple l'industrie automobile. Celle-ci est de plus en plus endettée. Pour maintenir l'économie et aider à sa reconversion, elle reçoit des aides. Le nombre de véhicules ne cesse de progresser. Mais plus le nombre de véhicules croît, plus on gaspille de pétrole dans les embouteillages et plus on tourne en rond pour pouvoir se garer. On élargit les autoroutes, mais plus on les élargit plus nombreux sont les usagers

qui les prennent, paralysant à nouveau rapidement la circulation⁵⁹. Il s'agit bien d'un cercle vicieux auquel on ne peut échapper que par un changement radical de nos modes de transport.

16.1.3. Le cauchemar

Il est utopique d'essayer de prévoir exactement ce qui va se produire. Ce qui est clair, c'est que des crises importantes vont affecter l'humanité tout entière. Parce que les plus développés, les États-Unis et l'Europe seront les premiers affectés. Les autres pays seront d'autant plus rapidement affectés que leur économie sera plus avancée. Encore endormi et peu conscient des réalités, le cerveau global de l'humanité va inéluctablement traverser une période de cauchemars.

L'épuisement des ressources minières et pétrolières fait qu'il sera de plus en plus difficile de maintenir en état les structures complexes de nos sociétés actuelles. Les classes dirigeantes feront tout pour maintenir leur niveau de vie. Dans beaucoup de pays, un nombre de plus en plus restreint de gens de plus en plus riches vont accaparer tous les pouvoirs, appauvrissant la population. Les soulèvements sociaux vont se multiplier. Ils seront réprimés par des gouvernements de moins en moins démocratiques, voire totalitaires. Les chefs d'État seront de plus en plus déconsidérés.

Les pays riches, ou sur la voie de l'enrichissement, vont se serrer les coudes et former des coalitions, créant de multiples conflits. De nouvelles guerres aussi brèves que dévastatrices peuvent surgir. D'un côté les États-Unis et l'Union européenne parlent de former une alliance atlantique. D'un autre côté, le Brésil, la Russie, l'Inde, la Chine et même l'Afrique du Sud (BRICS) envisagent des accords communs. Ces deux côtés entreront-ils en conflit ?

En supposant que les guerres puissent être évitées, un scénario plausible pourrait être le suivant. Supposons qu'une alliance atlantique se forme. Face à une économie stagnante et un endettement croissant, l'alliance décide de se doter d'une monnaie unique l'Euro-dollar. Après un bref répit et faute d'autres

59. Rappelons que les embouteillages sont un processus de criticalité auto-organisée.

mesures, la situation continue à se détériorer. Certains États de l'alliance décident alors de reprendre leur indépendance, provoquant des scissions en chaîne aussi bien en Europe qu'aux États-Unis. Le retour au protectionnisme entraîne une réduction des transports aériens et routiers, d'autant plus rapide que le coût du pétrole ne cesse d'augmenter. Les industries de l'automobile et de l'aéronautique font faillite. L'économie est en chute libre. C'est l'effondrement. Économiquement dépendants de l'alliance, les pays du BRICS, notamment la Chine, sont à leur tour en difficultés. Les chefs d'État se réunissent. Le libéralisme économique est remis en question. Un organisme mondial unique est chargé de créer et de contrôler la monnaie. Il essaye de résoudre la crise devenue mondiale.

Deux tendances opposées s'affrontent alors : la mondialisation de l'économie avec la création d'une monnaie mondiale unique et sa régionalisation avec la création de monnaies régionales. D'une économie internationale, on revient à une multitude d'économies locales, chacune cherchant son indépendance. On reconnaît là la caractéristique des processus d'effondrement. Les grandes structures sont remplacées par des petites. Les grands arbres sont remplacés par une végétation basse, les dinosaures par des petits mammifères. C'est la phase de refonte de l'algorithme de *recuit simulé* à la recherche d'un nouvel optimum pour dissiper l'énergie toujours plus efficacement.

16.2. La restructuration

Il n'est plus question de directives, ni de Bruxelles ni de Washington. Déconsidérés, les chefs de gouvernement sont bannis. Les possibilités d'échanges de biens étant limitées, il devient nécessaire de produire localement ce que l'on ne peut plus se procurer ailleurs. Fini le chômage. Les initiatives régionales se multiplient. Beaucoup ont alors un sentiment de liberté, comparable à celui qui régnait à la fin de la dernière guerre mondiale où tout était à reconstruire.

Devenues autonomes, les régions développent des solutions locales, adaptées à chaque région, afin de résoudre un problème global commun à l'ensemble de l'humanité. De fait, la plupart de ces solutions locales existent déjà ou sont en cours d'expérimentation. De même que les petits mammifères se

sont développés avant l'extinction des dinosaures, ou que la végétation basse se développe avant la mort des grands arbres, les modes de vie de la société future sont déjà là, mais dans un stade embryonnaire. Ils se développent avec la vie associative. C'est l'agriculture paysanne face à l'agriculture industrielle, les marchés locaux face aux grandes surfaces, les coopératives face aux multinationales, les éoliennes face aux usines nucléaires, ou même les monnaies locales face aux monnaies nationales ou multinationales. Après l'effondrement, ces solutions locales se mettent d'un seul coup à proliférer.

La principale préoccupation est l'énergie. Les accidents se multipliant, l'énergie nucléaire finit par être abandonnée (section 19). C'est la pénurie d'énergie. Celle-ci est rationnée. Plus de gaspillage. Chacun utilise l'énergie avec parcimonie. Les économistes définissent l'intensité énergétique comme étant la quantité d'énergie qu'il faut utiliser pour produire une quantité de richesse donnée. Celle-ci ne cesse de décroître. Un même bien matériel est produit avec de moins en moins d'énergie. Le travail manuel est remis en valeur. L'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée croît peu à peu de façon à retrouver le niveau de vie passé. La priorité est donnée aux sources d'énergies renouvelables.

Nous avons vu qu'en période de pénurie les bactéries, les amibes ou les animaux supérieurs collaborent. On doit donc s'attendre à ce que, pris par un grand élan de solidarité, chacun participe à la reconstruction de la société. Contrairement à ce qui s'est passé à la fin de l'Empire romain, l'information reste accessible. L'internet fonctionne toujours bien qu'avec des performances amoindries. On sait que l'ablation d'une partie du réseau affecte peu le fonctionnement de l'ensemble (section 9.4). Confrontés partout aux mêmes problèmes, les hommes s'entraident grâce aux communications. Les solutions originales développées localement profitent au monde entier. Toujours bien vivant, mais tirailé par la faim, le cerveau global de l'humanité sort peu à peu de son cauchemar. Il se réveille. L'humanité tout entière se réorganise.

Le résultat sera vraisemblablement l'apparition d'une *culture* commune planétaire. Le processus de *sélection de parentèle* engendrera progressivement un comportement « fraternel » à l'échelle planétaire⁶⁰. Cette solidarité planétaire

60. Les désastres écologiques auront fait prendre conscience à l'Homme que nous sommes tous dans le même bateau, la Terre, un vaisseau spatial dont il nous faut prendre soin.

pourra se manifester par la mise en commun au niveau mondial de l'énergie électrique produite localement et par l'utilisation d'une monnaie mondiale. Chargée de créer une monnaie mondiale, la nouvelle Banque mondiale n'aura plus pour mission la croissance économique, mais la préservation de l'environnement. D'emblée, elle favorisera les régions les moins développées et la production locale d'énergies renouvelables. Partout on plantera des arbres pour les générations à venir.

Le lecteur jugera sans doute totalement utopique la situation que je viens de décrire. Il me faut donc apporter quelques justifications théoriques.

16.2.1. Une analogie physique

Nous avons vu (section 13.5) que l'universalité des lois de la *mécanique statistique* permet de justifier l'approche sociologique de Durkheim. En s'inspirant de son travail, on peut reprendre l'analogie entre une population d'individus et une population de particules et comparer le flux d'énergie à travers une société à un flux de particules dans un tuyau.

On sait que lorsque la vitesse d'écoulement dans un tuyau dépasse un certain seuil, l'écoulement prend un caractère chaotique. De laminaire, il devient turbulent. Les physiciens caractérisent cette transition par un nombre R appelé nombre de Reynolds. Je ne donnerai qu'une seule formule dans ce livre, mais elle est compréhensible par tous : $R = u \cdot L / \nu$. L'écoulement devient turbulent lorsque R augmente, c'est-à-dire lorsqu'on augmente la vitesse u d'écoulement ou la largeur L du tuyau, ou encore lorsqu'on diminue la viscosité cinématique ν du fluide, c'est-à-dire la cohésion des particules.

On peut supposer que, comme en dynamique des fluides, il existe un nombre de Reynolds en dynamique des populations. L'évolution deviendrait chaotique lorsqu'on augmente le flux u d'énergie ou l'étendue L des échanges, ou encore lorsqu'on diminue la cohésion ν des individus. C'est exactement ce qui s'est passé durant ces deux derniers siècles. Le flux u d'énergie n'a cessé d'augmenter (figure 13). La mondialisation a fait croître L aux dimensions de la planète. Le libéralisme a diminué la cohésion ν de la société, en remplaçant la solidarité par la compétition. Il paraît donc naturel que cette évolution nous ait conduits au chaos.

Nous avons vu que l'effondrement de nos sociétés aura pour effet de diminuer le flux u d'énergie et de limiter L aux dimensions des régions. Il aura aussi pour effet d'augmenter la solidarité, c'est-à-dire la cohésion v des populations. On peut donc conjecturer que, de « turbulente », la dissipation d'énergie de la société deviendra « laminaire », éliminant du coup les fluctuations chaotiques liées au processus de *criticalité auto-organisée*. En l'absence de compétition à l'intérieur des régions comme entre les régions, l'effet de la *reine rouge* ne se produira plus.

On sait que deux régimes existent effectivement pour les flux d'énergie. L'équivalent du régime « laminaire » est le régime linéaire d'Onsager, du nom du physicien norvégien Lars Onsager. Le transport de chaleur par *conduction* fait partie du régime linéaire d'Onsager parce que le flux de chaleur croît linéairement comme la différence de température. Le transport de chaleur par *convection* n'en fait pas partie, car le flux de chaleur croît comme le carré de la différence de température (section 5.3). La transition entre la *conduction* et la *convection* est un *point critique*.

Avec un nombre de Reynolds faible, la reconstruction de la société se fera en dessous du *point critique*. L'augmentation de L et de u sera compensée par une augmentation simultanée de la cohésion v de la société. On restera donc dans un régime sous-*critique* non chaotique. L'économie étant maintenue en deçà du *point critique*, les inégalités de richesses disparaîtront tout naturellement sans qu'il soit besoin d'intervenir (section 13.3). L'accroissement d'efficacité dû à une très forte coopération permettra à l'économie de reprendre, mais les flux de matière et d'énergie resteront limités. L'économie tendra alors progressivement vers un régime stationnaire (section 19.7). Rejetée par la majorité des économistes actuels, l'idée que l'économie puisse tendre vers un régime stationnaire n'est cependant pas nouvelle⁶¹. Je me contenterai ici de reproduire ce qu'en a dit John Stuart Mill en 1848⁶² :

« Les économistes n'ont pas manqué de voir plus ou moins distinctement que l'accroissement de la richesse n'est pas illimité ; qu'à la fin de ce qu'on

61. Voir par exemple : Herman E. Daly, « *Steady State Economics* » (1977).

62. John S. Mill, « *Principles of Political Economy* » Book IV, chapter VI (1848). Traduction parue dans « *l'Écologiste* » N° 26, Vol. 9 - N° 2 (été 2008).

nomme l'état progressif, se trouve l'état stationnaire. » Un peu plus loin, il ajoute : « Je ne puis éprouver pour l'état stationnaire des capitaux et des richesses cette aversion sincère qui se manifeste dans les écrits des économistes de la vieille école. J'en suis porté à croire qu'en somme il serait bien préférable à notre situation actuelle. J'avoue que je ne suis pas enchanté de l'idéal de vie que nous présentent ceux qui croient que l'état normal de l'homme est de lutter sans fin pour se tirer d'affaire, que cette mêlée où l'on se foule aux pieds, où l'on se coudoie, où l'on s'écrase, où l'on se marche sur les talons et qui est le type de société actuelle, soit la destinée la plus désirable pour l'humanité, au lieu d'être simplement une des phases désagréables du progrès industriel. Le résultat est que la vie de tout un sexe est employée à courir après les dollars, et la vie de l'autre à élever les chasseurs de dollars. »

16.2.2. Le modèle biologique

Nous avons vu qu'avec l'humanité l'évolution est passée de la forme *génétique* à la forme *culturelle*. Ce changement fondamental de paradigme a entraîné l'explosion démographique de ces derniers siècles. Alors que la population mondiale se stabilise, l'humanité doit se restructurer pour passer d'un régime de croissance rapide à un régime stationnaire (section 15.1.2). L'hypothèse qui est faite ici est que l'évolution *culturelle* passe par les mêmes étapes que l'évolution *génétique*, mais beaucoup plus rapidement.

Le début de cette évolution *culturelle* a été décrit au chapitre 14. Nous l'avons comparée à celle, *génétique*, des bactéries ou *procaryotes* (section 11.4). De même que les bactéries d'une même souche forment des *colonies*, de même les êtres humains appartenant à une même civilisation forment des sociétés. Ces sociétés se sont condensées en formant des villes États. De même, les *procaryotes* se sont condensés pour former, par *symbiose*, les premières cellules à noyau dites *eucaryotes*. Nous avons montré l'analogie entre l'organisation des villes et celle des cellules *eucaryotes* (section 8.4). Nous avons vu que ces cellules ont expérimenté toutes sortes possibles d'organisation sous la forme de *protoctistes* (section 8.5). Il en est de même des sociétés humaines avec la formation d'États-nations. Finalement les cellules *eucaryotes* se sont condensées pour former des organismes multicellulaires. Le corps humain

est un conglomérat d'agrégats de bactéries⁶³. On peut donc s'attendre à ce que l'humanité se condense en un organisme vivant unique, un conglomérat d'agrégats d'individus⁶⁴. Comme tous les organismes vivants, elle atteindra un état que les biologistes qualifient d'*homéostasie*, c'est-à-dire un état stationnaire.

Clairement l'évolution procède par *symbioses* successives, des *procarvotés* aux *eucaryotes*, puis aux organismes multicellulaires. Logiquement, l'étape suivante est une symbiose d'individus formant un organisme vivant unique. C'est aussi l'étape finale d'un algorithme de *recuit* : la formation d'un « cristal » unique à l'échelle de la planète. Comme le cristal parfait minimise son énergie interne, la *symbiose* parfaite d'un ensemble d'individus en un seul organisme vivant maximise l'efficacité avec laquelle cet ensemble dissipe l'énergie. Les agrégats d'individus sont les régions qui se seront réorganisées matériellement pour survivre à l'effondrement. De même que nous sommes des organismes multicellulaires, l'humanité sera un organisme multirégional. Le même problème de survie se posant dans le monde entier, chacune des régions partagera et accumulera une expérience commune, reposant sur l'ensemble des connaissances accumulées par toute l'humanité, l'équivalent du *génom*e commun de toutes nos cellules. Ce partage commun de l'information lorsqu'il y a pénurie d'énergie est parfaitement illustré par le comportement de l'amibe du terreau (*dictyostelium discoideum*) décrit à la section 7.2. Lorsque leur nourriture devient rare, elles mettent leurs *génom*es en commun. Ce mécanisme est considéré comme précurseur de la formation des organismes multicellulaires.

On sait que, bien que disposant d'un *génom*e commun, les cellules de notre corps, se formant dans des environnements différents, sont différenciées. De même, parce qu'elles se seront développées dans des environnements différents, les diverses régions de l'humanité seront différenciées. Techniquement, elles n'utiliseront qu'une partie des connaissances communes à toute l'humanité, mais la « vision du monde » des individus sera la même sur toute la

63. Nous avons conservé leur caractéristique principale : la production et l'échange de phéromones que nous appelons « parfums ». La plus grande fortune de France s'est faite grâce à eux.

64. La biologie offre de nombreux exemples de sociétés de sociétés. Bien plus, chez certains termites (*Mastotermes darwiniensis*) chaque individu de la colonie héberge dans son tube digestif une colonie de protoctistes (*Mixotricha paradoxa*), chacun desquels héberge lui-même des colonies de bactéries.

Terre, parce que tous auront subi les mêmes épreuves et échangé les mêmes expériences. Le processus de *sélection de parentèle culturelle* engendrera alors une fraternité humaine universelle. Comme les cellules de notre corps, les individus seront soumis à des contraintes. Celles de respecter leur environnement. Mais, comme dans toute *symbiose* réussie, l'optimum du tout sera devenu aussi celui des parties. L'intérêt de chacun coïncidant avec l'intérêt général, et chacun en ayant conscience, il ne sera plus nécessaire de restreindre les libertés. Pour la première fois, un concept, né en France au siècle des Lumières et gravé sous forme de devise sur nos écoles et nos mairies, deviendra une réalité : Liberté, Égalité, Fraternité.

16.3. L'humanité future

Au ^{xx}e siècle, la science a fait un prodigieux bond en avant, créant des connaissances nouvelles et de puissants moyens d'information et de communication. Au ^{xxi}e siècle, ces moyens mettent ces connaissances nouvelles à la portée de tous. Ils permettent à l'humanité d'évoluer rapidement. Le cerveau global de l'humanité se forme. Il s'éveille et prend conscience des réalités de l'évolution⁶⁵. De même que, lorsque la conscience d'un enfant s'éveille, il se sent concerné par sa survie individuelle, de même, devenant consciente d'elle-même, l'humanité se sent de plus en plus concernée par sa survie à long terme. Nourrie jusqu'ici par les *énergies fossiles*, sorte de lait maternel fourni par la Terre qui l'a engendrée, l'humanité a pu se développer. C'est bientôt l'épreuve du sevrage. Devenue adulte⁶⁶, elle va devoir apprendre à se nourrir par elle-même. L'humanité réalisera alors que, seule, l'énergie solaire peut assurer sa survie à long terme.

Imaginons maintenant que nous sommes au ^{xxii}e siècle. Les économistes ont enfin compris que l'économie suit les lois de la thermodynamique. Ils ont compris qu'un système isolé tend vers l'équilibre thermodynamique, c'est-

65. On peut comparer cette prise de conscience collective à la formation d'une « noosphère » telle que l'a décrite par Pierre Teilhard de Chardin.

66. Devenu adulte, un être vivant tend à se reproduire c'est-à-dire à transmettre de l'information sur lui-même au monde extérieur. L'envoi dans l'espace interstellaire de plaques contenant de l'information sur l'Homme par les sondes Pionner 10 et 11 représente le premier acte de ce type de l'humanité.

à-dire vers la mort, et que si l'humanité veut survivre, elle n'a pas d'autre solution que d'utiliser une source d'énergie extérieure, le Soleil. Toute autre forme d'énergie – notamment nucléaire – est exclue, car, en augmentant irréversiblement son *entropie*, elle entraîne nécessairement l'humanité à sa perte (section 19.6). D'une façon générale, les économistes ont compris les lois de l'évolution et ses conséquences en biologie. On peut les résumer comme suit.

Après une période de tâtonnements contrôlés par la *sélection naturelle*, des *procaryotes* se sont un jour unis pour former des cellules *eucaryotes* capables de maintenir en leur sein un environnement continuellement adapté à eux. Ce faisant, ils ont accru l'efficacité avec laquelle ils dissipaient l'énergie. L'environnement extérieur n'étant toujours pas maîtrisé, la *sélection naturelle* a repris en agissant alors sur les cellules *eucaryotes*. Celles-ci ont fini par s'unir pour former des organismes multicellulaires capables de maintenir en leur sein un environnement continuellement adapté à elles. L'efficacité avec laquelle ils dissipaient l'énergie s'en est trouvée à son tour accrue. L'environnement extérieur n'étant toujours pas maîtrisé, la *sélection naturelle* a de nouveau repris en agissant maintenant sur les organismes multicellulaires. Sont apparus successivement les vertébrés, les mammifères, puis l'Homme. Ces derniers ont formé des sociétés. La *sélection naturelle* a continué à agir, favorisant les sociétés les plus dissipatrices d'énergie. Peu à peu celles-ci se sont unies pour former une société unique à l'échelle planétaire, mettant fin à la compétition entre les sociétés. Un cerveau global planétaire s'est formé. En s'éveillant, ce cerveau réalise que c'est maintenant son rôle de maintenir un environnement adapté à la vie. C'est nécessaire pour sa survie.

Pour ce faire, l'humanité doit constamment évacuer l'*entropie* qu'elle produit. Dans un moteur thermique, la combustion de l'essence permet de pousser le piston et de produire du travail mécanique, opération qui produit de l'*entropie*. Les ingénieurs ont vite compris que pour pouvoir continuer, il faut ramener le piston dans son état initial et évacuer l'*entropie* produite sous forme de chaleur rendue à une source froide. Cette *entropie* ne peut être totalement évacuée que si toutes les opérations sont réversibles.

Nous découvrons maintenant qu'il en est de même pour l'humanité. Durant ces derniers siècles, l'humanité s'est régalée à produire du travail mécanique tout en augmentant l'*entropie* de la planète. Elle réalise maintenant que pour le

faire durablement, il lui faut évacuer l'*entropie* produite et revenir à l'état initial, c'est-à-dire recycler. C'est déjà ce que fait en partie la *biosphère*. Pour produire durablement de l'*énergie libre*, elle a évolué de façon à recycler. L'humanité n'a pas d'autre choix que de faire de même. Il lui faut suivre la recette de Carnot, celle des cycles réversibles (section 1.4).

Pour cela, il lui faut un apport extérieur de chaleur provenant d'une source chaude. Le Soleil la lui procure sous forme de rayonnement centré sur le domaine visible. Il le fera pendant encore quelques milliards d'années. L'humanité doit nécessairement rendre une partie de cette chaleur à une source froide. Là encore l'Univers la lui procure. Le fond diffus cosmologique à 3 °K peut l'absorber sans s'échauffer notablement. L'humanité a donc les moyens essentiels de subsister sans faire évoluer son environnement. Mais elle ne peut le faire qu'en coopérant de façon à éviter tout gaspillage de matière et d'énergie et en recyclant. La production d'*énergie libre* est maximale lorsque toutes les opérations effectuées sont réversibles. Tout physicien sait qu'une transformation est d'autant plus proche de la réversibilité qu'elle est effectuée lentement. Il nous faut donc ralentir la vitesse des cycles, c'est-à-dire augmenter la durée de vie de tous les produits que nous fabriquons.

Nous faisons actuellement tout le contraire. Si nous ne changeons pas nos habitudes, alors notre environnement évoluera et la société planétaire que nous construisons s'effondrera. Elle se fragmentera de nouveau en sociétés plus petites en compétition les unes avec les autres. La *sélection naturelle* se chargera alors à nouveau, non sans douleur, de nous rappeler ce que nous devons faire, jusqu'à ce que tout reparte. Ainsi, tôt ou tard, l'humanité sera amenée à former une société unique d'individus capables de contrôler collectivement leur environnement. L'humanité devra inventorier tous les éléments atomiques dont elle dispose et s'assurer qu'ils sont bien recyclés. La composition chimique de l'air, de l'eau et du sol devra rester constamment optimale pour son épanouissement. Là encore, elle aura les moyens de le faire. Les moyens informatiques dont elle disposera trouveront leur plein emploi. Dotée d'un puissant cerveau exosomatique, l'humanité sera en mesure de contrôler son destin.

Il est intéressant de constater que notre propre cerveau a évolué de façon semblable. Peinant à s'adapter aux caprices de l'environnement, notre cerveau

intérieur, appelé reptilien, s'est doublé d'un cerveau affectif, dit limbique, l'ensemble formant un cerveau autonome. Celui-ci n'étant pas encore assez puissant, le cerveau des primates s'est entouré d'un cerveau extérieur encore plus puissant, le néocortex, auquel le cerveau intérieur fait appel pour résoudre ses problèmes. Le cerveau global de l'humanité en fait simplement tout autant⁶⁷. Il se dote actuellement d'un cerveau exosomatique plus puissant que lui, le réseau de tous les ordinateurs du monde.

L'humanité sera ainsi chargée de maintenir en état non seulement elle-même, mais aussi toute la *structure dissipative* complexe dont elle fait partie. Se nourrissant du rayonnement solaire et rejetant un rayonnement infrarouge, cette structure comprend non seulement tous les autres êtres vivants (la *biosphère*), mais aussi la terre, l'eau, l'atmosphère et son climat, ensemble qu'avec James Lovelock beaucoup appellent maintenant *Gaïa*. Peu à peu l'humanité apprendra à contrôler *Gaïa*. Dawkins a montré qu'un organisme vivant est un « véhicule » contrôlé par ses *gènes* pour assurer leur survie. De même *Gaïa* deviendra un « véhicule » contrôlé par des organismes vivants pour assurer leur survie.

Comme un cristal parfait minimise son énergie interne, une *symbiose* parfaite maximise l'efficacité avec laquelle l'énergie se dissipe. C'est pourquoi, conformément à la troisième loi de la thermodynamique, l'humanité va nécessairement former peu à peu une *symbiose* de tous les êtres humains, comme notre corps forme une *symbiose* de toutes nos cellules. État extrémal, donc stationnaire, une *symbiose* parfaite est à croissance nulle. La société planétaire en gestation aura atteint sa maturité, c'est-à-dire l'*homéostasie*. Ce n'est pas par hasard si l'alliance « liberté, égalité, fraternité » est une de nos aspirations. Celle-ci deviendra une réalité. L'humanité aura enfin atteint l'âge de raison.

L'humanité future ne pourra, bien sûr, jamais tout contrôler. Il lui sera par exemple difficile de contrôler les tremblements de terre, les éruptions volcaniques ou les chutes de météores. Elle sera cependant moins sensible que l'humanité actuelle aux désastres naturels. Constituée de régions largement

67. Le développement de la culture antique correspondrait à la formation d'un premier cerveau global instinctif. La naissance de Jésus-Christ et le développement de la culture médiévale, à celle d'un cerveau global affectif. Le siècle des Lumières et le développement de la culture moderne, à celle d'un cerveau global rationnel.

autonomes, un désastre affectant une de ses régions affectera peu les autres. Bien plus, éprise d'une grande fraternité, l'humanité entière viendra immédiatement au secours de la région affectée. Une des qualités essentielles de l'humanité future sera sa « résilience », c'est-à-dire sa capacité à se remettre d'un traumatisme, semblable à celle du corps humain. Imaginez une usine nucléaire unique alimentant toute la planète en électricité. À la première panne, c'est la catastrophe. Au contraire, si chacun produit son électricité dans la mesure de ses moyens (panneaux solaires, éoliennes, hydroélectricité) et que tous la mettent à la disposition de tous, alors, quoiqu'il arrive, il y aura toujours de l'électricité pour tous⁶⁸.

Un bon nombre de lecteurs jugeront que je suis trop optimiste et que tout ceci est une utopie. Je leur adresserai deux réponses. La première est que depuis que l'Homme existe, sa vie n'a cessé de s'améliorer. Aux temps préhistoriques l'espérance de vie n'était que de 30 ans. Depuis, elle a plus que doublé. Avec les progrès de la médecine, elle continue à augmenter. On ne connaît aucune limite stricte à la durée de vie humaine. La mort des individus est la façon dont les espèces s'adaptent aux changements de l'environnement, grâce à la sélection naturelle. Lorsque l'humanité aura totalement pris en charge son environnement, la mort n'aura plus les mêmes raisons d'être. À cause de l'*effet Baldwin*, la *sélection naturelle* continuera encore à agir sur les *gènes*. Elle favorisera la longévité. Celle-ci continuera donc à augmenter régulièrement.

Ma deuxième réponse est qu'il existe un précédent à la situation décrite ci-dessus. En Colombie, sur un haut plateau des Andes, à plus de 6 000 m d'altitude, vit une tribu descendant des Mayas : la tribu des Koguis. Terriblement menacée par notre propre civilisation, celle des Koguis a pu se maintenir grâce à leur isolement. Ils ont évolué *génétiquement* pour mener une vie normale à très haute altitude, ce que nous ne pouvons pas faire. Pratiquement isolée du monde extérieur comme la Terre l'est dans l'espace, la civilisation des Koguis s'est maintenue ininterrompue depuis 4 000 ans. Ils ont probablement battu tous les records de durée de vie d'une civilisation. Comment ont-ils fait ? Leur civilisation a trois particularités :

68. Voir : Jeremy Rifkin, « *La troisième révolution industrielle* », LLL (2011).

- la première est l'absence de toute compétition. Ils ont le souci constant de maintenir entre eux une communication étroite et une grande fraternité. Leur communauté est un bon exemple d'organisme vivant unique où chaque individu a sa place et joue son rôle ;
- la seconde est leur attachement à l'environnement. Ils ont le souci constant de maintenir et de préserver l'environnement tel qu'il a été transmis par leurs ancêtres ;
- la troisième est le maintien des traditions. Ils ont le souci constant de mémoriser et de transmettre leurs traditions ancestrales.

La civilisation des Koguis est un parfait exemple d'économie en régime stationnaire. En l'absence de croissance, il n'y a pas chez eux d'inégalités.

N'ayant pas, comme nous, de senseurs ultrasensibles pour détecter l'évolution de leur environnement, les Koguis ont imaginé une solution intéressante. Ils bandent jusqu'à l'adolescence les yeux de l'enfant qui sera leur futur « shaman ». Cela a pour effet de développer tous ses autres sens. Il devient particulièrement sensible au moindre changement dans le cri des oiseaux ou le parfum des plantes et peut ainsi alerter la communauté.

Pour les Koguis, notre civilisation paraît incompréhensible. Ils s'enquêtent pourquoi nous creusons des tunnels dans les montagnes. Quand on leur explique que c'est pour aller plus vite, ils demandent : « Pourquoi voulez-vous aller plus vite ? » L'humanité future sera un peu comme celle des Koguis. Elle trouvera l'humanité actuelle bien étrange.

Dans leur livre Roger Bonnet et Lodewijk Woltjer posent la question : « Peut-on survivre encore mille siècles ? » Nous avons vu qu'il faut distinguer l'Homme, caractérisé par ses *gènes*, des civilisations humaines, caractérisées par leur *culture*. Si, malgré le peu de moyens et de connaissances dont ils disposent, les Koguis ont su préserver leur culture pendant quarante siècles, on ne voit pas pourquoi, plus instruite, notre future civilisation planétaire ne ferait pas beaucoup mieux. L'Homme sera pour la première fois en mesure de faire des investissements à long terme pour sa survie. Quant à nos *gènes*, ils persisteront certainement beaucoup plus longtemps. Ils n'évolueront que dans la mesure où nos cultures futures ne parviendront pas à maîtriser totalement l'évolution de l'environnement.

V

Compléments

17. Compléments sur l'entropie

Bref exposé historique sur la notion d'*entropie* et ses expressions mathématiques successives. Il est suivi d'une discussion sur son caractère subjectif et les paradoxes qui en découlent.

On montre sa relation avec la monnaie.

17.1. Les cycles de Carnot

Toute machine thermique (machine à vapeur ou moteur de voiture) produit du travail mécanique en effectuant des cycles d'opérations. Au bout de chacun de ces cycles, elle revient à son état initial et recommence. Pour ce faire, elle est en contact avec ce qu'on appelle des sources de chaleur, c'est-à-dire des objets capables de fournir ou d'absorber de la chaleur sans que cela modifie leur température.

Au cours d'un cycle, la machine reçoit une certaine quantité de chaleur Q_1 d'une source chaude, mais, pour revenir à l'état initial, elle doit nécessairement céder une quantité de chaleur Q_2 à une source froide. Seule la différence $W = Q_1 - Q_2$ est convertie en travail mécanique. Dans cette expression, le travail mécanique W est exprimé avec la même unité d'énergie que les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 , le plus souvent en calories ou en joules (une calorie vaut 4,18 joules).

Le rendement du moteur est le rapport $r = W/Q_1$ du travail fourni à la chaleur reçue. Il est nécessairement inférieur à l'unité. Carnot a montré que ce rendement est maximal lorsque toutes les opérations effectuées sont réversibles. Une machine thermique idéale dont toutes les opérations seraient réversibles est appelée « machine de Carnot ». Les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 y sont proportionnelles aux *températures absolues* T_1 et T_2 des sources. Le rendement de cette machine idéale ne dépend que de la température des sources et vaut $r = W/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1$.

La *biosphère* fonctionne comme une machine thermique. Elle reçoit de la chaleur du Soleil. Celui-ci se comporte comme une source chaude à une *température absolue* proche de 6 000 °K. Le ciel nocturne se comporte comme une source froide à une *température absolue* proche de 3 °K. La *biosphère* peut ainsi produire du travail mécanique avec un rendement atteignant presque 100 %. Elle le fait en partie grâce à l'intermédiaire de cycles de réactions chimiques.

17.2. L'entropie de Clausius

Dans une machine de Carnot $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$. Clausius a montré que de façon générale, au cours de transformations réversibles, la quantité Q/T se conserve. Il a proposé d'appeler cette quantité « *entropie* ». Lorsqu'un système thermodynamique effectue un cycle de transformations réversibles, il reçoit autant d'*entropie* qu'il en fournit. On peut dire que son *entropie* interne se conserve. Lorsqu'il effectue un cycle de transformations irréversibles, son *entropie* interne augmente. D'une manière générale, l'*entropie* d'un système isolé ne peut qu'augmenter. S'il ne subit que des transformations réversibles, elle reste constante. L'augmentation d'*entropie* est donc une caractéristique de l'irréversibilité des *transformations*.

L'approche de Clausius permet de définir l'*entropie* à une constante additive près. Seules les variations d'*entropie* sont définies.

17.3. L'entropie de Boltzmann

Boltzmann est considéré comme le fondateur de la *mécanique statistique*. Il a montré qu'il est possible de retrouver les lois de la thermodynamique en appliquant les lois de la mécanique aux molécules qui constituent la matière. Il a en particulier montré que, dans un gaz à l'équilibre thermodynamique, l'énergie *cinétique* moyenne des molécules est égale à $kT/2$ par degré de liberté (paramètre du mouvement). Dans cette expression T est la *température absolue* du gaz et k une constante appelée « constante de Boltzmann ».

La température d'un gaz est ainsi une mesure de l'énergie *cinétique* de ses molécules. Lorsqu'une quantité de chaleur Q se dissipe, elle se répartit entre tous les

degrés de liberté de ses molécules. À l'équilibre, elle est également répartie. Le nombre de degrés de liberté entre lesquels elle est distribuée est alors $2Q/kT$. On reconnaît ici l'expression de l'entropie au facteur constant $2/k$ près. Ainsi l'entropie mesure le nombre de paramètres entre lesquels l'énergie est distribuée.

L'ensemble de tous ces paramètres (positions et vitesses de chaque molécule) forme un espace mathématique à un très grand nombre de dimensions, appelé l'espace des phases. Chaque point de cet espace représente un état microscopique particulier. En général, l'état macroscopique d'un système tel qu'on l'observe (pression, température, etc.) correspond à un très grand nombre d'états microscopiques possibles. Les points représentatifs de tous ces états occupent un certain volume Ω dans l'espace des phases. Plus Ω est grand, plus l'entropie S du système est élevée.

Considérons deux systèmes indépendants. L'un a un espace des phases à n_1 dimensions, l'autre à n_2 dimensions. L'état macroscopique du premier correspond à un volume Ω_1 , celui du second à un volume Ω_2 . L'espace des phases de l'ensemble des deux systèmes a pour dimensions le produit $n_1.n_2$. Dans cet espace, l'état macroscopique de l'ensemble occupe un volume $\Omega_1.\Omega_2$, mais l'entropie de l'ensemble est la somme $S_1 + S_2$ des entropies de chacun. Il s'en suit que la relation entre S et Ω est logarithmique. Boltzmann a établi que l'entropie d'un système est $S = k.\log \Omega$. Cette formule a été gravée sur sa tombe au cimetière de Vienne.

Il est à noter que l'entropie ainsi définie dépend de l'unité avec laquelle on mesure le volume Ω . Changer d'unité revient à multiplier tous les volumes par une quantité arbitraire, c'est-à-dire à ajouter à toutes les entropies une quantité arbitraire. Comme l'entropie de Clausius, l'entropie de Boltzmann est définie à une constante additive près.

La mécanique quantique a permis plus tard de définir une entropie absolue en offrant un choix naturel pour l'unité de volume dans l'espace des phases. La relation d'incertitude de Heisenberg implique en effet qu'un état microscopique y occupe un volume non nul égal à $(h/4\pi)^n$ où h est la constante de Planck et n le nombre de dimensions de l'espace des phases. Le nombre d'états microscopiques possibles est donc donné par le volume Ω mesuré en unité de $(h/4\pi)^n$.

17.4. L'entropie de Gibbs

L'expression de Boltzmann est valable à l'équilibre thermodynamique où tous les états microscopiques sont également probables. Gibbs a généralisé l'expression de Boltzmann au cas hors équilibre où les probabilités sont différentes. Si p_i est la probabilité d'un état microscopique i , alors l'entropie du système est $S = -k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$, où la somme Σ est étendue à tous les états microscopiques i . Lorsqu'on a Ω états microscopiques ayant tous la même probabilité $p_i = 1/\Omega$, on retrouve bien la formule de Boltzmann.

17.5. L'entropie de Shannon

Travaillant dans le domaine des télécommunications, Shannon chercha à mesurer la quantité d'information à transmettre. Il définit l'information élémentaire comme étant représentée par une quantité binaire, c'est-à-dire pouvant prendre l'une ou l'autre de deux valeurs suivant que l'événement annoncé a eu lieu ou non. Il appela cette quantité le bit, abréviation de l'anglais « *binary unit* ». Pour Shannon, l'information transmise est d'autant plus grande que la probabilité de l'événement annoncé est plus faible. Elle est une fonction décroissante de sa probabilité p .

On sait que la probabilité de deux événements indépendants est le produit de leurs probabilités, tandis que l'information correspondante est la somme des deux informations. Il s'en suit que la quantité d'information est nécessairement de la forme $-\log p$. Le signe moins provient du fait que la probabilité p étant comprise entre 0 et 1, la quantité $-\log p$ est positive. Les *logarithmes* de base 2 permettent d'exprimer l'information en bits. Ainsi un événement qui a une chance sur deux de se produire a une probabilité $1/2 = 2^{-1}$. L'information correspondante est de 1 bit.

Les événements annoncés étant aléatoires, l'information correspondante $-\log p$ l'est aussi. Shannon cherchait à calculer la quantité moyenne d'information transmise (espérance mathématique de l'information). Pour une suite d'événements aléatoires, la quantité moyenne d'information transmise est $-\sum p_i \cdot \log p_i$, où p_i est la probabilité de l'événement i . La somme Σ est étendue à tous les événements possibles.

Shannon reconnut, dans cette expression, la formule de Gibbs. Elle éclairait d'un jour nouveau la notion d'*entropie*. Celle-ci apparaissait comme étant la quantité moyenne d'information à fournir pour spécifier l'état microscopique d'un système thermodynamique. Plus l'*entropie* d'un système est élevée, plus il faut d'information pour spécifier son état microscopique. La dissipation d'énergie (augmentation d'*entropie*) prenait ainsi l'aspect d'une perte d'information sur le système.

Shannon cherchait à donner un nom à cette quantité moyenne d'information. On raconte que Von Neumann lui aurait suggéré de l'appeler « *entropie* » en disant : « de toute façon l'*entropie*, personne ne comprend vraiment bien ce que c'est ». À la suite de Shannon on a appelé cette quantité « *entropie* informationnelle ». L'*entropie* thermodynamique de Gibbs apparaissait alors comme un cas particulier de l'*entropie* de Shannon.

17.6. Dissipation d'énergie et perte d'information

La vitesse d'un ordinateur est fondamentalement limitée par la vitesse de propagation de l'information entre les composants du processeur, c'est-à-dire par la vitesse de la lumière. Afin de réduire le temps de propagation des signaux, les ingénieurs se sont mis à construire des processeurs de plus en plus petits. Mais plus le processeur est petit, plus il chauffe. Les physiciens se sont alors posé la question de savoir s'il existe une limite inférieure à la dissipation d'énergie dans un processeur.

Les travaux de Rolf Landauer, Charles Bennett, puis Edward Fredkin ont permis de répondre à la question. Ils ont montré que toute perte d'information entraîne une dissipation d'énergie de kT joule par bit. Celle-ci peut être évitée en effectuant des cycles de calculs réversibles au bout desquels le calculateur revient à son état initial. Un parallèle a été ainsi établi entre la thermodynamique et le calcul digital. On parle maintenant de « physique digitale ». Une conséquence de ces travaux est que l'*entropie* thermodynamique de Gibbs et l'*entropie* informationnelle de Shannon sont des concepts physiquement équivalents.

17.7. Le paradoxe de Gibbs

L'aspect informationnel de l'*entropie* entraîne l'existence de paradoxes qui ont longtemps intrigué les physiciens. Imaginons une enceinte isolée formée de deux compartiments séparés par une cloison amovible. Initialement la cloison est fermée. Les deux compartiments contiennent un gaz rare, à la même température et sous la même pression. Il y a équilibre thermodynamique. L'expérimentateur retire alors la cloison en la faisant lentement glisser parallèlement à elle-même, sans fournir aucun travail mécanique⁶⁹. Il y a toujours équilibre thermodynamique. L'état macroscopique du gaz n'a pas changé. En particulier, son *entropie* est restée la même.

Supposons que l'expérimentateur apprenne maintenant que les compartiments contenaient en fait deux gaz rares différents. L'un contenait de l'argon, l'autre du krypton. Lorsqu'il a retiré la cloison, les deux gaz se sont mélangés. Cette transformation étant irréversible, l'*entropie* du système a augmenté. Le nombre d'états microscopiques a en effet augmenté. Dans le premier cas, un échange de molécule entre les deux compartiments ne changeait pas l'état microscopique. Dans le second cas, cet échange produit un état microscopique différent. Ainsi la variation d'*entropie* dépend de notre connaissance du système. Ce fait est connu sous le nom de paradoxe de Gibbs.

Nous avons vu que toute augmentation d'*entropie* entraîne une diminution de la faculté de produire de l'*énergie libre*. C'est bien le cas de l'expérience décrite ci-dessus. À partir du moment où l'expérimentateur sait que les deux gaz sont différents, il peut concevoir une méthode pour produire de l'*énergie libre*. Il peut, par exemple, remplacer la cloison amovible par une cloison poreuse laissant passer les atomes d'argon, mais pas ceux de krypton qui sont plus gros. La pression des atomes de krypton va alors s'exercer sur la cloison. Si celle-ci peut glisser comme un piston, elle fournira du travail. Une fois les deux gaz rares mélangés, cette possibilité disparaît.

69. Les forces de pression s'exercent perpendiculairement au déplacement. On suppose qu'il y a glissement sans frottement et que les forces d'inertie sont négligeables.

17.8. Le démon de Maxwell

Dans sa correspondance, le physicien James Clerk Maxwell décrit un dispositif analogue où les deux compartiments contiennent le même gaz. Il imagine alors qu'un « un être intelligent » puisse voir les atomes de gaz et entrouvrir la cloison chaque fois qu'un atome du compartiment de gauche se présente pour aller à droite, mais la fermer lorsqu'un atome du compartiment de droite se présente pour aller à gauche. Il le fait toujours sans produire de travail mécanique. Au bout d'un certain temps une différence de pression apparaît entre les deux compartiments en contradiction avec la deuxième loi qui dit qu'un système isolé tend vers l'équilibre thermodynamique. Cette différence de pression permet d'obtenir du travail mécanique.

En sélectionnant les atomes en fonction de leur vitesse, il pourra tout aussi bien laisser passer les atomes rapides vers le compartiment de droite et les atomes lents vers le compartiment de gauche. Au bout d'un certain temps, une différence de température apparaîtra entre les deux compartiments, en contradiction aussi avec la deuxième loi de la thermodynamique. Comme précédemment, cette différence de température permet d'obtenir du travail mécanique en l'utilisant pour faire fonctionner une machine de Carnot.

L'être intelligent imaginé par Maxwell est connu dans la littérature sous le nom de « démon de Maxwell ». Il est à noter que le démon de Maxwell doit nécessairement mémoriser de l'information sur le sens ou la grandeur de la vitesse des molécules qui se présentent à lui, afin de réagir en conséquence. Le physicien français Léon Brillouin a montré que la quantité d'information mémorisée par le démon correspond exactement à la diminution d'*entropie* produite. La contradiction avec la deuxième loi n'est qu'apparente, car, pour pouvoir opérer indéfiniment, le démon doit effacer sa mémoire entre chaque opération. Ce faisant, il dissipe autant d'énergie que le système lui permet d'en produire.

17.9. L'entropie et la vie

Comme le démon de Maxwell, un organisme vivant mémorise de l'information, créant une diminution d'*entropie*. Cette diminution d'*entropie* lui permet de produire de l'*énergie libre* qu'il convertit en travail mécanique. La dissipation

de ce travail mécanique produit de l'*entropie* qui est évacuée sous forme de chaleur.

Il ne faut pas confondre l'*entropie* interne d'un être vivant, qu'il maintient faible toute sa vie, avec l'*entropie* qu'il produit qui tend à être la plus élevée possible. Un être vivant se nourrit constamment d'énergie à *entropie* faible qu'il éjecte sous forme d'énergie à *entropie* élevée. Lorsqu'il meurt, l'information mémorisée dans son cerveau s'efface, produisant une augmentation rapide de son *entropie* interne. Celle contenue dans ses *gènes* se dégrade et devient inutilisable. La production de travail mécanique cesse.

Il en est de même pour les sociétés humaines. Dans les sociétés actuelles, la recherche scientifique permet de mémoriser dans les livres ou les ordinateurs une quantité croissante d'information sur les propriétés de l'Univers qui nous entoure. L'*entropie* de la société diminue. Cette diminution d'*entropie* lui permet, grâce au progrès technique, de produire de plus en plus d'*énergie libre*. Celle-ci peut être délivrée sous forme d'électricité. Elle est alors soit dissipée sous forme de chaleur, soit convertie en travail mécanique et dissipée ensuite. Le PIB (produit intérieur brut) d'une société est une mesure de son taux de production d'*entropie*. Lorsqu'une société s'effondre, son PIB tombe en flèche tandis qu'une nouvelle société, d'organisation différente, prend le relais.

L'aspect informationnel de l'*entropie* pose un problème philosophique fondamental sur la nature de nos connaissances. L'*entropie* apparaît comme étant aussi bien une propriété de l'observateur que de l'Univers observé. Il est impossible de dissocier l'une de l'autre. On ne peut pas comprendre l'Univers sans comprendre l'Homme, ni comprendre l'Homme sans comprendre l'Univers, car l'Homme est un produit de l'évolution de l'Univers. Cela entraîne que nos connaissances sont et resteront toujours limitées, mais cela ne les empêche pas de progresser. Bien plus, la progression de nos connaissances est une conséquence des lois de l'évolution de l'Univers. J'espère avoir montré que la *mécanique statistique* permet une approche globale de ce problème. Dans ce cadre, l'interprétation bayésienne des probabilités apparaît naturelle (voir Introduction). Elle semble être la seule à permettre de progresser dans ce domaine.

17.10. L'entropie et la monnaie

Le physicien Valery Chalidze⁷⁰ semble avoir été le premier à suggérer l'existence d'une relation entre l'*entropie* et la monnaie, mais il n'a pas cherché à expliciter cette relation analytiquement. On peut le faire en considérant les probabilités de transaction, c'est-à-dire la probabilité pour qu'une transaction financière aboutisse dans un intervalle de temps donné. Considérons par exemple la mise en vente par le fabricant d'un même objet manufacturé en de nombreux exemplaires. On peut raisonnablement admettre que la probabilité p de trouver un acheteur est d'autant plus grande que le prix s proposé est plus bas. Lorsque deux de ces objets sont indépendamment mis en vente à des prix différents, la probabilité de vendre les deux objets sera le produit de leurs probabilités de vente, tandis que la rémunération du fabricant sera la somme des prix perçus. Cela implique que la relation entre le prix s_i proposé pour un objet i et sa probabilité p_i de vente est une relation *logarithmique* de la forme $s_i = -k \cdot \log p_i$, où k est ici une constante arbitraire. L'espérance de gain du fabricant est alors la somme $S = \sum p_i \cdot s_i = -k \cdot \sum p_i \cdot \log p_i$ étendue à tous les objets mis en vente. On retrouve bien l'expression de l'*entropie* de Gibbs.

Le fabricant va chercher à maximiser son profit en ajustant sa production et ses prix de façon à maximiser S . En ce sens, on peut dire qu'en maximisant son profit, le producteur maximise son taux de production d'*entropie*. Ce faisant il importe effectivement de l'information sur son environnement, ici sa clientèle. Il adapte sa production à sa clientèle.

70. Valery Chalidze, « *Entropy Demystified, Potential Order, Life and Money* », Universal Publishers (2000).

18. Compléments sur la criticalité auto-organisée

Les propriétés du processus de *criticalité auto-organisée* sont expliquées ici à l'aide de modèles hydrauliques simples d'oscillateurs non-linéaires.

18.1. Les puits de potentiel

La matière est constituée d'atomes et d'assemblages d'atomes appelés molécules. Ces assemblages sont généralement suffisamment stables pour qu'on ait le temps de les observer et d'étudier leurs propriétés. Les physiciens décrivent cette situation en disant qu'ils sont dans un puits de potentiel. On peut comparer un puits de potentiel à un creux à l'intérieur duquel une bille serait tombée. Sur une surface faite de creux et de bosses, une bille roule jusqu'au moment où elle tombe au fond d'un creux et y reste. Elle est alors dans un état d'équilibre stable.

Pour perturber cet état d'équilibre, il faut fournir à la bille une certaine énergie. L'énergie nécessaire pour vaincre la « barrière de potentiel » et faire sortir la bille du creux s'appelle l'*énergie d'activation*. Lorsque la température est suffisamment élevée, les collisions entre molécules peuvent apporter l'*énergie d'activation* nécessaire pour vaincre une barrière de potentiel et, par exemple, rompre une molécule. Lorsque la température diminue, de tels événements deviennent de plus en plus rares. C'est pourquoi la plupart des réactions chimiques cessent à basse température.

Lorsqu'une bille quitte un creux, elle va en général dissiper de l'énergie avant d'atteindre et de se stabiliser dans un creux situé plus bas. L'énergie qu'elle dissipe ainsi peut être très supérieure à l'*énergie d'activation* qui a été fournie pour la faire sortir du creux. C'est pourquoi l'apport d'une petite quantité d'énergie permet souvent d'en récolter beaucoup plus.

La notion d'*énergie d'activation* s'étend à des systèmes macroscopiques, notamment chaque fois que l'apport d'une petite quantité d'énergie en dégage une

grande quantité. Par exemple enflammer une allumette peut apporter l'énergie d'activation nécessaire au déclenchement d'un feu de forêt. Une bombe A apporte l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher une bombe H (section 19.6).

Cette notion s'étend aussi à l'Homme. Lorsqu'un homme préhistorique envoie une lance, il dépense physiquement de l'énergie. S'il tue un bison, il en récolte beaucoup plus sous forme de nourriture. Dans les sociétés modernes, l'énergie s'achète. S'il arrive qu'un apport d'énergie permette d'en dissiper davantage, alors un apport de monnaie peut conduire à s'enrichir. Dans ce cas, on dit qu'on a fait un investissement rentable.

18.2. Un analogue hydraulique

La figure 15 montre un récipient d'eau muni d'un siphon. On peut le considérer comme l'analogue hydraulique d'un puits de potentiel. L'eau représente de l'énergie. La quantité d'eau nécessaire pour remplir le siphon représente une énergie d'activation. L'eau arrive goutte à goutte et remplit le récipient. En amorçant le siphon, les dernières gouttes d'eau apportent « l'énergie d'activation » nécessaire pour vider le récipient.

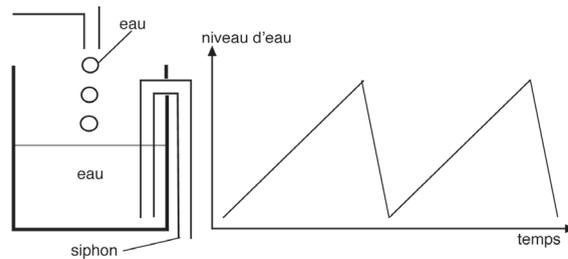


Figure 15. Oscillateur non linéaire dit de relaxation.

La figure 15 montre l'évolution dans le temps du niveau d'eau dans le récipient. C'est une évolution périodique en dents de scie. Lorsque le récipient se remplit, le niveau d'eau monte lentement jusqu'au moment où le siphon s'amorce. Le niveau d'eau redescend alors brutalement, le récipient se vide, le siphon se

désamorçage, un nouveau cycle recommence. Un tel oscillateur est qualifié de non linéaire. La période des oscillations est déterminée par le débit d'arrivée d'eau dans le récipient. Les oscillations de ce type dont la période est déterminée par un débit d'énergie portent le nom d'oscillations de relaxation⁷¹.

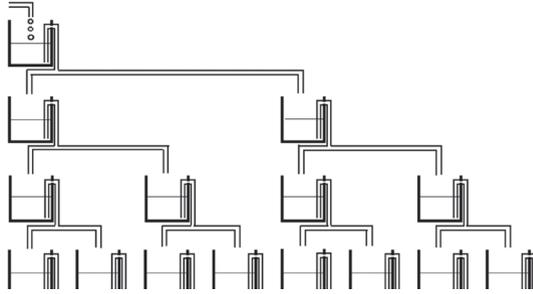


Figure 16. Réseau d'oscillateurs non linéaires

Per Bak et ses collaborateurs ont montré que le phénomène de *criticalité auto-organisée* apparaît dans les réseaux d'oscillateurs non-linéaires. La figure 16 montre une portion d'un tel réseau. Pour des raisons de simplicité, nous avons représenté un réseau régulier. Supposons qu'au départ tous les récipients soient à moitié pleins, comme indiqué sur la figure. Le récipient supérieur continue à se remplir progressivement. Lorsqu'il est plein, son siphon s'amorce. Il se vide alors d'un seul coup dans les deux récipients immédiatement en dessous. Ceux-ci étant initialement à moitié plein, sont vite remplis. Ils amorcent leurs siphons et se vident à leur tour dans les quatre récipients suivants, qui vont eux-mêmes se remplir très vite et se vider dans les huit suivants. Tous les étages vont ainsi se vider d'un seul coup produisant une grande cascade ou avalanche d'eau.

Supposons maintenant qu'il faille une minute pour remplir le récipient supérieur et un temps négligeable pour le vider. Celui-ci va se vider d'un coup toutes les minutes. Les deux récipients immédiatement en dessous vont se remplir et se vider toutes les deux minutes. Les quatre récipients suivants

71. Un cycle de Carnot peut être considéré comme une oscillation de relaxation. Sa période est déterminée par le flux d'énergie.

vont en faire autant toutes les quatre minutes, etc. On observe des cascades ou avalanches dont l'amplitude est d'autant plus grande que l'intervalle de temps qui les sépare est plus long ou que leur fréquence est plus faible. Très exactement, l'amplitude des avalanches est inversement proportionnelle à leur fréquence. C'est la caractéristique des processus de *criticalité auto-organisée*.

Dans le dispositif que nous avons décrit, le siphon s'amorce uniquement lorsque le récipient est plein. En pratique, les *énergies d'activation* interviennent au hasard. En chimie, elles sont fournies à l'occasion d'une collision. Notre réseau d'oscillateurs non linéaires est régulier. En pratique, ils sont irréguliers. Dans ces conditions, les avalanches apparaissent au hasard. On peut montrer que, statistiquement, leur amplitude est encore inversement proportionnelle à leur fréquence.

18.3. Propriétés des cascades ou avalanches

Bien qu'idéalisé, l'exemple que nous venons de décrire montre un certain nombre de propriétés du processus de *criticalité auto-organisée* :

- Les cascades ne se produisent que si le débit d'arrivée d'eau est inférieur au débit du siphon. D'une manière générale, les avalanches n'apparaissent que si le flux initial d'énergie est suffisamment faible pour occasionner un épuisement local des ressources énergétiques.
- Chaque cascade consiste en une suite de cascades dont l'amplitude croît en *progression géométrique*. D'une manière générale, dans une avalanche le flux d'énergie croît *exponentiellement* jusqu'à l'épuisement des ressources. C'est l'évolution *exponentielle* des populations animales en biologie ou la croissance *exponentielle* de l'économie en sciences humaines.
- Les cascades prennent de l'eau contenue initialement dans un même récipient pour la redistribuer dans de nombreux récipients. D'une manière générale, les avalanches prennent de l'énergie provenant initialement d'un même puits de potentiel pour la redistribuer dans de nombreux puits de potentiels. C'est le processus même de production d'*entropie*. Il redistribue l'énergie sur un nombre croissant de degrés de liberté ou de niveaux quantiques.

- Les puits de potentiel tendent à coopérer pour former localement, dans le temps et dans l'espace, des états cohérents dans lesquels les avalanches sont synchronisées. En s'auto-organisant, ces états produisent une diminution locale d'entropie.
- Tout sous-ensemble d'étages consécutifs du réseau de la figure 16 a les mêmes propriétés que l'ensemble du réseau : il produit des avalanches dont l'amplitude est inversement proportionnelle à leur fréquence. Si l'on assimile ces avalanches à des avalanches d'énergie, chacun de ces sous-ensembles a les propriétés d'une *structure dissipative*. D'une manière générale, un ensemble de *structures dissipatives* en interaction est encore une *structure dissipative*.
- Dans le modèle de la figure 16, tous les éléments sont identiques. Les propriétés de la structure qui en résulte sont invariantes par *changement d'échelle*.

18.4. Les attracteurs étranges

Le réseau régulier représenté sur la figure 16 exclut la possibilité pour l'eau de remonter dans le récipient supérieur, c'est-à-dire d'être recyclée. Or, nous avons vu que les *structures dissipatives* tendent à former des cycles de matière et d'énergie (section 8.1). La figure 17 montre un analogue hydraulique permettant le recyclage de récipients d'eau. Il a été imaginé en 1970 par Willem Malkus et Lou Howard. Dans ce modèle, les récipients fuient de façon permanente. Ils sont suspendus autour d'une roue capable de tourner librement autour de son axe.

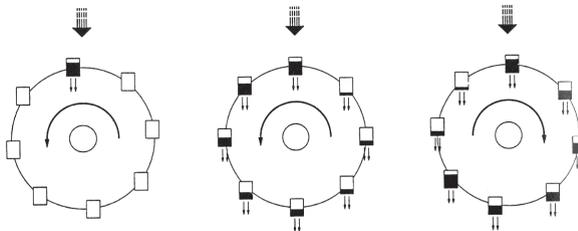


Figure 17. Roue chaotique de Malkus et Howard (d'après S. Strogatz).

L'eau qui arrive en haut commence par remplir le récipient supérieur. Lorsque le débit d'eau est suffisant, le poids de l'eau qui s'accumule met la roue en rotation dans un sens ou dans l'autre, permettant aux autres récipients de se remplir. La roue prend alors un mouvement régulier de rotation semblable à celui de la roue d'un moulin.

Lorsqu'on augmente le débit d'eau la roue se met à tourner de plus en vite. Il arrive un moment où les récipients n'ont plus le temps de se remplir en haut, ni de se vider durant la descente. Le mouvement de la roue devient alors chaotique. Il peut s'arrêter ou même s'inverser de façon imprévisible. Ce mouvement chaotique est caractéristique de ce qu'on appelle un *attracteur étrange*. On observe ce type d'évolution dans de nombreux exemples de *structures dissipatives*. Nous l'avons rencontré aux sections 7.5 et 12.3.

Imaginons maintenant que la roue soit alimentée par un réseau semblable à celui décrit à la section précédente. Tant que l'eau arrive sous la forme d'avalanches nombreuses, mais de faible amplitude, le mouvement de la roue reste régulier. Lorsqu'une grosse avalanche arrive, il devient chaotique. C'est ainsi que de nombreuses, mais petites avalanches dues aux collisions des molécules peuvent entretenir un mouvement convectif régulier. Mais, lorsque l'amplitude des avalanches augmente, le mouvement convectif régulier est remplacé par un mouvement chaotique dit turbulent. De même, de nombreuses, mais petites avalanches de profit peuvent entretenir des cycles économiques réguliers, mais lorsque de grosses avalanches se produisent, l'évolution économique devient chaotique, provoquant des crises et des récessions.

19. Compléments sur l'énergie

Discussion sur les différentes sources capables d'alimenter l'humanité en énergie.

19.1. Les unités d'énergie

Les physiciens mesurent les forces en newton (N). Le newton est la force nécessaire pour augmenter chaque seconde de un mètre par seconde la vitesse d'une masse de un kilogramme de matière. Il correspond à peu près à la force de gravitation qui tire vers le bas un poids de 102 grammes. L'unité internationale d'énergie est le joule (J). C'est le travail mécanique effectué par une force de un newton qui déplace son point d'application de un mètre. C'est donc l'énergie nécessaire pour élever un poids de 102 grammes d'une hauteur de un mètre. La quantité d'énergie nécessaire pour augmenter de 1 °C la température de 1 gramme d'eau porte le nom de calorie. Une calorie vaut 4,18 J.

La « puissance » d'une source d'énergie est caractérisée par son débit, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'elle fournit par unité de temps. Par extension tout débit d'énergie porte le nom de puissance. Les puissances se mesurent en joule par seconde (J/s) appelé watt (W). Ainsi une ampoule de 10 W dissipe chaque seconde 10 J d'énergie. Comme le kilogramme vaut mille grammes, le kilowatt (kW) vaut mille watts. L'usage veut que l'énergie électrique soit facturée en kilowatt-heure (kWh). C'est l'énergie fournie par une source de un kilowatt pendant une heure, c'est-à-dire mille joules par seconde pendant 3 600 secondes soit 3,6 millions de joules ou 3,6 Mj (mégajoule). Elle permet de hisser une tonne de matière sur une hauteur de 367 mètres soit, en gros, monter une automobile en haut de la tour Eiffel. Cette quantité d'énergie est actuellement facturée à environ dix centimes d'Euros.

On peut effectuer le même travail en escaladant une côte en voiture. Sur une route horizontale, une voiture consomme typiquement 0,06 litre d'essence

au km pour vaincre les frottements mécaniques et la résistance de l'air. Sur une pente de 4 %, à la même vitesse, elle consommera 0,10 litre d'essence au km. La différence, 0,04 litre/km, est utilisée pour vaincre la pesanteur. Pour monter de 300 m, elle doit parcourir 7,5 km donc consommer en plus 0,3 litre d'essence. À 1,5 € le litre, la facture s'élève à 0,45 €, soit 4,5 fois plus que la facture d'électricité ci-dessus. Cela est dû en grande partie aux taxes perçues par le gouvernement pour l'entretien des routes. Si l'on retire les taxes, la facture n'est plus que de 0,18 € soit à peine deux fois plus que l'électricité.

La discussion précédente implique qu'un volume de 0,3 litre d'essence fournit un travail mécanique de 1 kWh. En fait, comme nous avons vu (section 1.3), les moteurs thermiques ont un rendement limité (par le *rendement de Carnot*). Celui des moteurs de voiture est de l'ordre de 30 %. Les propriétés chimiques de l'octane nous disent qu'il suffit en effet de brûler 0,112 litre d'essence pour dissiper 1 kWh. Sachant que 0,112 litre d'essence pèse 82 grammes, on en déduit qu'une tonne d'essence fournit environ 12 000 kWh. Une tonne de pétrole brut fournit 11 630 kWh soit à peu près 42 GJ. C'est l'unité d'énergie utilisée en économie industrielle : la tonne équivalent pétrole (tep).

19.2. Les sources d'énergie de l'industrie

La population du globe consomme actuellement 10,5 milliards de tep par an (sans compter le bois de chauffage) soit une dissipation moyenne de 2,2 kW par individu (voir l'évolution de cette dissipation sur la figure 13). 85 % de cette puissance dissipée provient d'*énergies fossiles*, non renouvelables (charbon, pétrole, gaz). Les 15 % restant sont partagés essentiellement entre l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique (barrages). La contribution des énergies éoliennes et photovoltaïques est encore négligeable à l'échelle mondiale. Cela signifie que, si l'humanité veut garder son « mode de vie » actuel, elle devra trouver des substituts à 85 % de l'énergie qu'elle consomme.

Jugeant d'après l'expérience des derniers siècles et confiants dans les progrès scientifiques et techniques, une grande majorité d'économistes croient non seulement que l'humanité trouvera ces substituts, mais aussi que l'économie pourra continuer à progresser *exponentiellement*. Dès 1970, les scientifiques du *Club de Rome* ont mis en garde les économistes contre cette croyance (section

15.2.2), mais ils n'ont pas été écoutés. L'évolution de ces trente dernières années a pourtant entièrement confirmé leurs prédictions.

La thèse développée dans ce livre est que l'humanité trouvera effectivement des substituts aux *énergies fossiles*, mais que cela prendra du temps et entraînera une restructuration majeure de nos sociétés actuelles. D'une économie à croissance *exponentielle*, l'humanité passera à une économie stationnaire. Nous avons montré que, lié à l'épuisement des ressources naturelles, ce type de transition se retrouve tout au long de l'évolution biologique des espèces durant laquelle de courtes périodes d'évolution rapide alternent avec de longues périodes de stase. C'est le phénomène des *équilibres ponctuels* théorisé par le biologiste Jay Gould, phénomène qui a lui-même été relié au processus thermodynamique de *criticalité auto-organisée* par le physicien Per Bak.

19.3. Les sources d'énergie du vivant

Nous avons vu (section 8.1) que, si la vie est apparue sur Terre probablement grâce à l'énergie géothermique, elle s'est développée ensuite grâce à l'énergie solaire. Celle-ci permet aux plantes de synthétiser de la matière organique suivant un mécanisme appelé *photosynthèse*. Fondamentalement, la *photosynthèse* permet de combiner le gaz carbonique de l'air (dioxyde de carbone) et l'eau pour obtenir de la matière organique avec libération d'oxygène. La matière organique ainsi générée s'appelle la *biomasse*. Les *énergies fossiles* proviennent de la *biomasse* accumulée ainsi pendant plus d'un milliard d'années. C'est en quelque sorte de l'énergie solaire mise en conserve. Lorsque nous brûlons de la *biomasse* (bois, charbon, gaz, pétrole), nous la recombinaons avec l'oxygène de l'air. Nous récupérons ainsi l'énergie initiale, en régénérant le gaz carbonique et l'eau.

La combustion du pétrole est une réaction violente à haute température. C'est elle qui permet de faire tourner le moteur de notre voiture. Pour faire marcher nos muscles, la nature est parvenue à produire une réaction analogue de façon beaucoup plus douce, à la température du corps humain. Nous « brûlons » en quelque sorte nos aliments. L'énergie produite se mesure en calories. Elle est essentiellement contenue dans les sucres et les graisses. Leur combustion lente se fait grâce à des *catalyseurs* appelés *enzymes* (section 8.1). La respiration permet d'inhaler l'oxygène et d'exhaler le gaz carbonique et l'eau.

19.4. Les sources possibles d'énergie du futur

Nous avons dit plus haut que les *énergies fossiles* sont d'origine solaire. Il en est de même de l'énergie hydraulique. C'est en effet la chaleur du Soleil qui, en faisant évaporer l'eau de l'océan, permet d'alimenter les rivières. Ainsi, à part l'énergie nucléaire, la quasi-totalité de l'énergie qui nous fait vivre sur Terre est d'origine solaire. Seules l'énergie géothermique et celle des marées sont d'origine terrestre.

L'énergie totale dissipée par les marées terrestres est de 2 Gtep par an, soit un cinquième de ce que l'industrie utilise. Nous ne pouvons en récupérer qu'une infime partie. Le flux d'énergie géothermique à la surface de la Terre est de l'ordre de 60 mW par mètre carré. C'est très faible comparé aux 360 W par mètre carré que nous fournit en moyenne le Soleil. Ainsi l'énergie du futur sera soit d'origine solaire soit d'origine nucléaire.

L'énergie solaire peut être récupérée directement ou indirectement. Parmi les méthodes indirectes, seule l'énergie hydraulique peut être stockée (dans les barrages). De gros efforts sont actuellement déployés pour développer d'autres méthodes indirectes, telles que les énergies éoliennes ou celle des vagues et des courants marins. Cela nécessite de lourds investissements et ne résout pas le problème du stockage.

Les panneaux solaires (cellules photovoltaïques) permettent de récupérer l'énergie solaire directement sous la forme d'électricité, mais ne permettent pas de la stocker. La production des panneaux solaires est elle-même coûteuse en énergie et en matière première. Seule la production de *biomasse* permet de récupérer directement l'énergie solaire et de la stocker. C'est ce que font les organismes vivants depuis des milliards d'années. C'est ce que fait l'Homme pour se nourrir et qu'il a commencé à faire pour alimenter son industrie (biopétrole).

La production de *biomasse* est de loin la façon la plus aisée de récupérer l'énergie solaire. Elle est à la portée de tout le monde, mais elle interfère avec la production de nourriture. De tout temps il a fallu choisir entre planter des légumes pour se nourrir ou des arbres pour se chauffer l'hiver. À l'heure où un milliard d'individus souffrent de la faim sur Terre, faut-il utiliser des terres agricoles pour produire du biopétrole ?

19.5. Le dilemme de la biomasse

L'industrialisation de l'agriculture a permis à la population mondiale de doubler durant la seconde moitié du XX^e siècle. Pour compenser l'épuisement de la fertilité des sols et accroître leur productivité, il a fallu faire un appel massif à l'industrie chimique (fertilisants, pesticides), créant des problèmes environnementaux considérables. De nos jours le sol n'est plus qu'un support inerte. La *culture hors-sol* dite hydroponique montre que l'on peut parfaitement s'en passer. Pour accroître encore la productivité, on a développé des organismes *génétiquement* modifiés.

Tout ceci n'est pas sans conséquence pour l'Homme. Peu à peu il s'est adapté *culturellement* à une nouvelle nourriture. Il devra peut-être s'y adapter aussi *génétiquement*. Pour en compenser les carences, les gens aisés achètent des compléments vitaminés. Des pilules à haute valeur nutritionnelle sont fabriquées grâce à une micro-algue connue sous le nom de spiruline. L'Homme finira-t-il par se nourrir uniquement de pilules ?

Parallèlement à ce développement, l'agriculture industrielle se met de plus en plus à cultiver des plantes pour fabriquer des biocarburants, créant un conflit dans l'usage des terres cultivables. L'Homme devra-t-il choisir entre se nourrir ou nourrir son industrie ? De fait, il existe une grande différence entre les besoins nutritionnels de l'Homme et ses besoins industriels. L'Homme a des besoins très spécifiques, non seulement en énergie, mais aussi en éléments chimiques. Il a besoin pour vivre d'éléments comme l'azote, le soufre ou le phosphore. Les hydrocarbures que nous brûlons dans nos voitures ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène. Nos besoins en énergie industrielle sont donc bien plus faciles à satisfaire que nos besoins en nourriture.

On peut espérer que l'utilisation des terres agricoles pour produire des biocarburants n'est qu'un phénomène passager. Si des micro-algues sont capables de nourrir l'Homme, elles sont a fortiori capables de produire des biocarburants. C'est vraisemblablement de cette manière que la nature a produit le pétrole. Le problème est de produire en quelques jours ce que la nature a mis des milliers d'années à produire. C'est techniquement possible à condition de disposer d'une concentration suffisante de gaz carbonique. Une compagnie espagnole, BFS, produit ainsi du biopétrole à partir de gaz carbonique industriel. La récupération

du gaz carbonique industriel permet de résoudre le problème du réchauffement climatique. On voit là l'importance du recyclage des éléments.

Plutôt que de nourrir l'Homme avec des pilules et de cultiver des plantes pour produire du pétrole, il me paraît grand temps de revenir à des méthodes de culture plus proches de la tradition pour l'Homme et de réserver la haute technicité à la production de biopétrole.

19.6. Les options du nucléaire

J'ai dit plus haut que l'énergie du futur serait soit d'origine solaire soit d'origine nucléaire. Un bon nombre de scientifiques, dont James Lovelock lui-même, pensent que l'énergie nucléaire est une option possible pour l'humanité future⁷². Qu'en est-il exactement ?

Il en existe deux sortes d'énergie nucléaire. La première est l'énergie de fission. C'est l'énergie produite par la décomposition de noyaux lourds comme ceux de l'uranium. C'est celle de la première bombe atomique, dite bombe A, utilisée par les Américains à la fin de la guerre sur Hiroshima et Nagasaki. C'est aussi celle utilisée dans les réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité, notamment en France. L'accident de Tchernobyl et plus récemment celui de Fukushima montrent le danger de cette technologie. À mesure que ces réacteurs vieilliront, leur entretien deviendra de plus en plus coûteux, notamment dans une économie en déclin, et les risques d'accident s'accroîtront inévitablement. Enfin nos réserves en uranium seront épuisées d'ici un siècle. Il est possible de prolonger quelque peu cette durée en recyclant le combustible, mais cela conduit à utiliser le plutonium dont la toxicité est extrêmement élevée.

72. L'argument donné par Lovelock est que la vie sur Terre n'a pas cessé de progresser malgré les changements climatiques et des transformations majeures comme l'apparition d'oxygène dans l'atmosphère. La vie devrait donc s'adapter aux conséquences de l'énergie nucléaire. En plus des arguments donnés ici, on peut répondre à Lovelock que les êtres vivants s'adaptent à une modification de la composition chimique de leur environnement parce que la vie est un processus physico-chimique. L'énergie nucléaire modifiant les noyaux (c'est-à-dire les atomes eux-mêmes et non pas les molécules), l'adaptation de la vie à l'énergie nucléaire devient problématique.

La deuxième sorte d'énergie nucléaire est celle de la fusion. C'est l'énergie utilisée par le Soleil pour nous faire vivre. Elle est produite par la fusion d'atomes d'hydrogène en atomes d'hélium. C'est aussi l'énergie utilisée dans une bombe H. La difficulté est de comprimer suffisamment la matière pour obtenir la fusion (confinement). Pour cela, il faut apporter de l'énergie. On peut considérer celle-ci comme une « *énergie d'activation* ». (section 18.1). Dans le Soleil, cette énergie provient de la gravitation. Dans une bombe H elle provient d'une bombe A. Cette *énergie d'activation* est énorme. Pour produire de l'électricité, il faut la fournir de façon continue. Le problème est de produire plus d'énergie qu'on en fournit.

À ce jour le projet le plus avancé est le projet international ITER de Cadarache. Il est uniquement destiné à vérifier la faisabilité scientifique et technique de la production continue d'énergie par fusion. Il ne produira pas de l'électricité, mais de la chaleur. Initialement fixée en 2018, la date d'achèvement du projet est actuellement repoussée à 2020. Originellement fixé à 10 milliards d'Euros, le coût du projet est maintenant estimé à 16 milliards d'Euros. La durée effective d'utilisation d'ITER est prévue de 400 heures réparties sur 21 ans en tests de quelques minutes chacun. Il sera ensuite démantelé.

Suivant les résultats, il est prévu de construire ensuite un réacteur de démonstration. Les réacteurs d'application ne seront vraisemblablement pas fabriqués avant 2050. Un certain nombre de scientifiques ont des doutes sur les chances de succès de cette technologie à cause des instabilités de plasma. Enfin ITER consomme du lithium. En supposant que la croissance économique s'arrête, avec des réacteurs comme ITER, l'humanité épuiserait ses ressources en lithium en dix siècles. On est encore loin des mille siècles de Bonnet et Woltjer. De plus, comme nous allons le voir, il y a peu de chance que, dans ces conditions, la croissance s'arrête.

19. 7. L'irremplaçable énergie solaire

Le véritable problème n'est pas la quantité totale d'énergie dont l'humanité pourra disposer, mais son débit, c'est-à-dire la quantité d'énergie dont elle pourra disposer par unité de temps.

Les problèmes actuels de l'humanité viennent de l'utilisation d'*énergies fossiles* notamment du pétrole. Si la quantité totale de pétrole dont l'humanité dispose est finie, son débit est potentiellement illimité. On peut multiplier autant qu'on veut le nombre de puits de pétrole et l'humanité ne manque pas de le faire. La 3^e loi de la thermodynamique nous dit que les structures dissipatives évoluent de façon à maximiser leur dissipation d'énergie. La biologie nous confirme que c'est ce que font les espèces vivantes. Elles évoluent de façon à épuiser leurs ressources le plus vite possible. C'est bien ce que fait l'humanité, en particulier pour le pétrole.

Les problèmes de l'humanité ne peuvent que s'aggraver avec l'énergie nucléaire. La vie est en effet une forme de combustion. Plus le feu dispose de combustible, plus il s'étend. Si, par malheur, l'humanité parvient à utiliser la fusion nucléaire, alors c'est l'incendie. Nous avons vu qu'en présence d'une source d'énergie à débit illimité la compétition l'emporte sur la coopération, le bien-être à court terme sur le bien-être à long terme. C'est l'explosion, démographique ou exosomatique. La durée de vie de l'humanité se réduit à celle d'un feu de paille.

Supposons maintenant que l'humanité renonce à la fission nucléaire, jugée trop dangereuse. Les *énergies fossiles* s'épuisent, l'économie mondiale décline. Le développement de la fusion nucléaire est abandonné parce que trop coûteux. Seule l'énergie solaire permet de maintenir un certain niveau de vie. Pour les pays développés, c'est la pénurie d'énergie. Nous avons vu que dans ces conditions la coopération l'emporte sur la compétition. L'humanité s'organise pour faire face à la pénurie. Les investissements à long terme l'emportent sur ceux à court terme. Après avoir chuté, l'économie reprend pour atteindre peu à peu un état stationnaire lié au débit de l'énergie reçue. Les inégalités sociales entre les individus comme entre les nations s'estompent. Devenue un mauvais souvenir, l'idéologie de la croissance est oubliée. On est passé du feu de paille à une combustion lente et contrôlée. C'est l'hypothèse faite dans ce livre (section 16.2.1). Dans ces conditions, l'humanité peut certainement durer mille siècles.

20. Réponses à un philosophe

Parmi les premiers lecteurs de ce livre, un jeune professeur de philosophie, Julien Fleury, m'a posé les questions ci-dessous. Il m'a semblé intéressant de reproduire ici nos échanges.

J.F. : *Tu proposes tout simplement, en une ou deux centaines de pages, d'expliquer toutes les causes de tout, partout, et tout le temps...*

F.R. : « Expliquer » c'est beaucoup dire. Mais affirmer qu'il existe une loi simple et suffisamment générale pour nous permettre de comprendre l'évolution du monde, oui, je le pense. Cela peut surprendre les philosophes, mais cela ne surprend pas les physiciens. Depuis longtemps, ils cherchent à expliquer le monde par une équation unique. Ils y sont presque arrivés. Il ne reste plus qu'à unifier la gravitation et la théorie quantique. Les lois de la physique elles-mêmes nous montrent que cela devrait être possible.

J.F. : *... mais sans doute a-t-on aussi laissé en route une part de la complexité du monde.*

F.R. : La difficulté ne réside pas dans l'équation, mais dans sa résolution. Elle est double : 1) Le monde obéit à des lois non-linéaires. Les équations non-linéaires sont rarement solubles analytiquement. On a pu progresser dans ce domaine grâce aux ordinateurs. 2) Le nombre de variables est gigantesque. C'est l'approche statistique qui permet de progresser, d'où l'importance de la *mécanique statistique*. La complexité du monde n'est pas dans ses lois, mais dans les conséquences de ses lois, c'est-à-dire la résolution des équations. C'est là qu'on l'a laissée en route.

J.F. : *On se demande quel est le statut d'un énoncé scientifique comme la MEP.*

F.R. : Tu peux en avoir une idée en regardant le site internet de Wikipedia (Maximum Entropy Thermodynamics). C'est un bon résumé de la situation.

Pour moi, MEP rend bien compte du fait que, comme nous faisons partie de l'univers, notre information est nécessairement limitée. J'ai essayé d'en dire un mot dans l'introduction. Je partage entièrement le point de vue de Jaynes. C'est la seule façon de progresser. Malheureusement, heurtant de vieilles habitudes, ce point de vue est encore contesté par certains. Implicitement, ce que j'écris montre que ce point de vue est très fructueux. Il y a aussi une autre façon de voir les choses. On peut considérer MEP comme un principe général vérifié dans toutes ses conséquences, sans se préoccuper de le démontrer à partir de principes plus fondamentaux. Cela a été le cas, au début, des deux premières lois de la thermodynamique, qu'on appelait alors des principes.

J.F. : *Il me semble très schématiquement que la plupart des philosophes épistémologues qualifieraient ton travail de « réductionniste », au sens où tu expliques toujours les phénomènes complexes à partir des phénomènes plus simples, en ne considérant pas qu'il y ait entre eux de différence de nature.*

F.R. : Toute approche scientifique est d'abord réductionniste. Descartes n'a-t-il pas dit qu'il faut diviser la difficulté pour mieux la vaincre ? Pour comprendre le monde, ou du moins la Terre et la mesurer, le « géomètre » commence par définir le point, puis la droite, des concepts idéalisés qui n'ont pas d'équivalents réels. Il approche ensuite la réalité en formant des combinaisons de plus en plus complexes de ces parties. C'est comme cela qu'on calcule une intégrale, en sommant un nombre de plus en plus grand de quantités de plus en plus petites (idéalement une infinité de quantités infiniment petites). On doit alors préciser les conditions aux limites.

La thermodynamique du XIX^e siècle a été bâtie ainsi, en réduisant les systèmes thermodynamiques à une juxtaposition de parties à l'équilibre (équilibre thermodynamique local, réversibilité). Cela s'est montré être insuffisant. Le génie de Prigogine est d'avoir trouvé un autre type de réduction : des *structures dissipatives* en interaction. Comme les points ou les droites, les *structures dissipatives* n'existent pas dans la nature, mais on peut s'en approcher indéfiniment. En thermodynamique, les conditions aux limites portent sur l'Univers. Est-il fermé ou ouvert ? Il en est de même en géométrie. L'Univers est-il euclidien ? Si l'approche scientifique est d'abord réductionniste, elle ne l'est pas uniquement. Encore faut-il reconstruire le tout à partir des parties. Il est bien sûr matériellement impossible de tout reconstruire. L'essentiel est de se convaincre que c'est possible. Jusqu'à preuve du contraire la théorie est présumée correcte.

J.F. : *Tout un autre pan de la sociologie se construit à partir du principe weberien de la compréhension, du sens que les hommes donnent à leurs actes.*

F.R. : C'est là, je pense, que réside la beauté de la thermodynamique. Elle inclut l'Homme dans la description. Il en est inséparable. Où mettrais-tu la frontière ? Entre les *australopithèques* et les espèces *Homo* ? Ou entre les espèces *Homo* et l'*Homo sapiens* ? Même si elle n'est pas régulière, l'évolution est clairement continue. C'est ce que j'ai essayé de montrer dans la partie III (des gènes à la *culture*). Les singes aussi donnent un sens à leurs actes, ne serait-ce que quand ils épluchent une banane. Tu les as certainement vu faire au zoo. Notre deux cent millionième grand parent, commun à toi et à moi, était un poisson. À partir de quel moment nos ancêtres auraient-ils cessé de suivre les lois de la thermodynamique ? Ma réponse est que nous les suivons toujours, sans nous en rendre compte. Nous sommes des *structures dissipatives*. Nous ne pouvons subsister qu'en dissipant de l'énergie. Nous ne pouvons dissiper cette énergie qu'en acquérant de l'information sur notre environnement, de façon à nous y adapter. C'est ce que fait un cyclone. Dans le cas d'un animal, on dit qu'il apprend. Dans le cas de l'Homme on dit qu'il prend conscience. Dans tous les cas c'est le même processus que Weber ne pouvait pas connaître.

J.F. : *Ce qui me gêne, peut-être dans l'ensemble du travail, mais surtout dans la section 14, c'est que tu n'as pas l'air de considérer que nous avons là une hypothèse, mais bien une loi certaine.*

F.R. : Comme tu le sais aussi bien que moi, une loi n'est jamais certaine. Elle peut seulement être contredite (falsification de Popper). Le chapitre 14 est là pour montrer que l'histoire de l'humanité ne la contredit pas. Pour ma part, c'est plutôt le contraire. Je pense que les lois de la thermodynamique éclairent l'histoire de l'humanité d'un nouveau jour.

Liste alphabétique des auteurs cités

Arendt Hannah (1906-1975) : Philosophe allemande connue pour ses travaux sur la modernité.

Ayres Robert U. (1932-) : Économiste américain, disciple de Nicholas Georgescu Roegen.

Axelrod Robert (1943-) : Professeur de sciences politiques à l'université du Michigan (Ann Arbor, USA). Auteur de « *The evolution of cooperation* » (Basic Books, 1984).

Bak Per (1948-2002) : Physicien danois. Il a développé le concept de *criticalité auto-organisée*. Auteur de « *How Nature Works* » (Copernicus, 1996).

Baldwin James Mark (1861-1934) : Psychologue américain. En 1896 il émet l'hypothèse que le comportement acquis d'un individu peut influencer la transmission des *gènes*, donnant l'illusion d'une transmission héréditaire de caractères acquis comme le suggérait Lamarck.

Bayes Thomas (1702-1761) : Mathématicien et pasteur britannique connu pour avoir formulé le théorème de Bayes sur lequel reposent les estimateurs statistiques dits bayésiens.

Belousov Boris Pavlovich (1893-1970) : Biochimiste russe connu pour sa découverte d'un oscillateur chimique, la réaction de Belousov-Zhabotinsky.

Ben Jacob Eshel (1952-) : Physicien israélien connu pour ses travaux sur les bactéries.

Bennett, Charles H. (1943-) : Informaticien américain connu pour ses travaux sur les aspects thermodynamiques de l'information.

Blamont Jacques Émile (1926-) : Astrophysicien français. Cofondateur du

programme spatial français et européen. A publié plusieurs livres de réflexions d'ordre social, économique et écologique, notamment « *Introduction au siècle des menaces* » (2004).

Boltzmann Ludwig (1844-1906) : Physicien autrichien. Fondateur de la *mécanique statistique*.

Bonnet Roger-Maurice (1937-) : Astrophysicien français. Il a été directeur du programme scientifique et technique à l'Agence spatiale européenne (ESA).

Boulding Kenneth (1910-1993) : Économiste et philosophe anglo-américain.

Brillouin Léon (1889-1969) : Physicien français connu pour ses travaux en physique du solide.

Buffon Georges-Louis Leclerc, comte de (1707-1788) : Naturaliste français, auteur d'une « *Histoire naturelle* » en 36 volumes.

Carnot Nicolas Léonard Sadi (1796-1832) : Physicien français. Fondateur de la thermodynamique.

Carroll Lewis (1832-1898) : Nom de plume du révérend Charles L. Dodgson, mathématicien britannique et auteur de livres pour enfants. Il a notamment écrit « *Alice's Adventures in Wonderland* » (1865) et sa suite « *Through the Looking-Glass* » (1871), ouvrages traduits en français sous les titres « *Alice au pays des merveilles* » et « *De l'autre côté du miroir* ».

Cavalli-Sforza Luigi Luca (1922-) : Linguiste et généticien italien. Fondateur de la géographie *génétique*.

Chaisson Éric J. (1948-) : Astrophysicien américain connu pour ses travaux sur l'évolution de l'Univers.

Clausius Rudolf (1822-1888) : Physicien allemand. Il a introduit le concept d'*entropie*.

Crick Francis Harry Compton (1916-2004) : Biologiste britannique. Prix Nobel de médecine 1962. Avec James Watson, il a révélé en 1953 la structure en hélice de la molécule d'ADN.

Curie Pierre (1859-1906) : Physicien français connu pour ses études sur le magnétisme. Avec son épouse, Marie Curie, il étudie la radioactivité. Ils obtiennent le Prix Nobel de physique en 1903.

D'Alembert Jean le Rond (1717-1783) : Mathématicien français, codirecteur de l'« *Encyclopédie* » avec Denis Diderot.

Darwin Charles Robert (1809-1882) : Naturaliste britannique. Il a développé le concept de *sélection naturelle*.

Dawkins Richard (1941-) : Éthologiste britannique. Auteur du livre « *The Selfish Gene* » (1976), traduit en français sous le titre « *Le Gène égoïste* » (Odile Jacob 2003).

Descartes René (1596-1650) : Mathématicien, physicien et philosophe français, auteur du « *Discours de la Méthode* » (1637).

Dewar Roderick : Physicien d'origine écossaise, employé à l'INRA (Bordeaux). Il applique les lois de la *mécanique statistique* à la biologie.

Diamond Jared Mason (1937-) : Physiologiste et biologiste américain. Auteur de « *Collapse : how societies choose to fail or to succeed* » (Penguin Books, 2005), traduit en français sous le titre « *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie* » (Gallimard, 2006).

Diderot Denis (1713-1784) : Écrivain français, codirecteur de l'« *Encyclopédie* » avec Jean Le Rond D'Alembert.

Drake Franck (1930-) : Radioastronome américain. Créateur d'Ozma, premier programme de recherche d'intelligence extraterrestre (SETI). L'équation de Drake permet d'estimer la possibilité de sa détection.

Dresher Melvin (1911-1992) : Mathématicien américain d'origine polonaise,

spécialiste de la théorie des jeux. Avec Merrill Flood il a publié en 1950 un modèle mathématique de la coopération connu maintenant sous le nom de « dilemme du prisonnier ».

Durkheim Émile (1858-1917) : Sociologue français, un des fondateurs de la sociologie moderne.

Einstein Albert (1879-1955) : Physicien né en Allemagne, auteur de la théorie de la Relativité.

Eldredge Niles (1943-) : Paléontologiste américain. Avec Stephen Jay Gould, il a proposé en 1972 la théorie de « l'équilibre ponctué ».

Fermi Enrico (1901-1954) : Physicien italien connu pour ses travaux en mécanique quantique et en physique nucléaire. Il pensait que d'autres civilisations avancées avaient dû se développer dans la Galaxie et que, dans ce cas, elles devraient se manifester (paradoxe de Fermi).

Fiorito Graziano (1957-) : Biologiste italien connu pour ses travaux sur les *céphalopodes*.

Flood Merill (1908-1991) : Mathématicien américain. Avec Melvin Dresher, il a développé un modèle mathématique de la coopération connu sous le nom de « dilemme du prisonnier ».

Forster Lloyd William (1795-1852) : Économiste britannique connu pour son étude sur l'épuisement des ressources naturelles.

Franklin Benjamin (1706-1790) : Imprimeur connu pour ses almanachs, écrivain, physicien puis diplomate américain, corédacteur et signataire de la déclaration d'indépendance des États-Unis d'Amérique et premier ambassadeur américain en France.

Fredkin Edward (1934-) : Informaticien américain connu pour ses travaux en « physique digitale ».

Fukuyama Francis (1952-) : Philosophe et économiste américain d'origine japo-

naise, professeur d'économie politique connu pour ses thèses sur la fin de l'histoire.

Georgescu-Roegen Nicholas (1906-1994) : Mathématicien et économiste roumain, connu pour son application des lois de la thermodynamique à l'économie.

Gibbs Willard (1839-1903) : Physico-chimiste américain. Il a étendu la *mécanique statistique* de Boltzmann aux réactions chimiques et généralisé la notion d'*entropie*.

Gould Stephen Jay (1941-2002) : Paléontologiste américain connu pour ses ouvrages de vulgarisation sur la théorie de l'évolution. Avec Niles Eldredge, il a proposé en 1972 la théorie de « l'équilibre ponctué ».

Gutenberg Beno (1889-1960) : Géologue et sismologue allemand connu pour sa détection, en 1914, de la limite entre le manteau inférieur et le noyau externe de la Terre, appelée discontinuité de Guttemberg. Avec Richter, il a établi la relation entre l'amplitude d'un séisme et sa fréquence, appelée relation de Gutenberg-Richter.

Gutenberg Johannes (-1468) : Imprimeur allemand, novateur dans l'usage de caractères métalliques mobiles.

Hamilton William Donald (1936-2000) : Biologiste britannique, théoricien de l'évolution, connu pour sa découverte du processus de *sélection de parentèle* et ses implications sur le comportement social des insectes.

Hardin Garrett (1915-2003) : Écologue américain connu pour son article publié en 1968 dans « *Science* » et intitulé « *The Tragedy of the Commons* » (la tragédie des biens communs).

Heisenberg Werner (1901-1976) : Physicien allemand. Un des fondateurs de la mécanique quantique, Prix Nobel de physique de 1932. Heisenberg est connu pour sa relation d'incertitude découverte en 1927.

Hérodote (484 ou 482 - 420 avant J.-C.) : Historien grec, considéré comme le père de l'Histoire.

Herriot Édouard (1872-1957) : Homme politique français. Il a été plusieurs fois ministre puis président du Conseil.

Hubble Edwin Powell (1889-1953) : Astronome américain. Il a montré que l'Univers s'étend en dehors de la Voie lactée et qu'il est en expansion.

Hutton James (1726-1797) : Géologue écossais, un des pères de la géologie moderne.

Ising Ernst (1900-1998) : Physicien allemand connu pour sa thèse sur le *ferromagnétisme* (1924) dans laquelle il a développé ce qui est maintenant appelé le modèle d'Ising.

Jantsch Erich (1929-1980) : Astrophysicien autrichien connu pour son ouvrage « *The self-organizing Universe. Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution* » (Pergamon, 1980)

Jaynes Edwin Thompson (1922-1998) : Physicien américain connu pour ses travaux sur l'inférence bayésienne et pour son livre « *Probability Theory: The Logic of Science* ».

Juglar Clément (1819-1905) : Médecin et économiste français. Un des premiers à s'intéresser aux fluctuations apparemment périodiques de l'économie.

Juvenal (I^{er} siècle après J.-C.) Poète satirique latin.

Joule James Prescott (1818-1889) : Physicien britannique ayant montré expérimentalement que la chaleur est une forme d'énergie. L'unité internationale d'énergie porte son nom.

Kleiber Max (1893-1976) : Biochimiste suisse connu pour ses travaux sur le *métabolisme*.

Kolmogorov Andreï Nikolaïevitch (1903-1987) : Mathématicien russe connu des physiciens pour ses travaux sur la turbulence en dynamique des fluides. Il a montré que la distribution spatiale de l'énergie dans les petits éléments turbulents tend à suivre une loi de puissance.

Kondratiev Nikolai (1892-1938) : Économiste soviétique connu pour sa théorie des cycles économiques. Il est mort fusillé au Goulag où il avait été déporté à la fin d'un procès initié par Staline.

Kummel Reiner (1939-) : Physicien allemand.

Kurzweil Ray (1948-) : Informaticien américain, connu pour son concept de singularité technologique, désignant le moment où l'intelligence artificielle dépassera celle du cerveau humain.

Lamarck, Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, dit chevalier de Lamarck (1744-1829) : Naturaliste français connu pour avoir le premier proposé une théorie scientifique de l'évolution.

Landauer, Ralf (1927-1999) : Physicien américain connu pour ses travaux sur les aspects thermodynamiques de l'information.

Lebeau André (1932-) : Géophysicien français, ex-directeur général de Météo-France. Il a occupé de hautes fonctions administratives au Centre national d'études spatiales (CNES) et à l'Agence spatiale européenne (ESA).

Le Chatelier Henry Louis (1850-1936) : Chimiste français connu pour ses travaux sur les équilibres chimiques.

Lloyd William Forster (1795-1852) : Économiste britannique.

Lorenz Konrad (1903-1989) : Biologiste autrichien. Prix Nobel de physiologie ou médecine (1973).

Lotka Alfred James (1880-1949) : Mathématicien et statisticien américain connu pour ses travaux en dynamique des populations.

Lovelock James Ephraim (1919-) : Biochimiste et environnementaliste britannique. Il estime qu'il faut considérer la Terre et sa *biosphère* comme un organisme unique autorégulé qu'il a appelé *Gaïa*.

MacArthur Robert Helmer (1930-1972) : Biologiste américain connu pour ses travaux en écologie des populations.

Malthus Thomas (1766-1834) : Pasteur anglican et économiste britannique de l'école classique. Il est connu pour son essai sur le principe de la population (« *An Essay on the Principle of Population* ») publié en 1798.

Mandelbrot Benoît (1924-2010) : Mathématicien franco-américain connu pour sa théorie des structures *fractales*.

Margulis Lynn (1938-) : Microbiologiste américaine connue pour sa théorie selon laquelle les cellules *eucaryotes* résulteraient d'une *endosymbiose* entre différentes cellules *procaryotes*.

Maxwell James Clerk (1831-1879) : Physicien écossais connu pour sa formalisation mathématique de la théorie *cinétique* des gaz. Il a unifié la théorie de l'électricité avec celle du magnétisme et montré que la lumière était une onde électromagnétique.

Mendel Gregor (1822-1884) : Moine et botaniste autrichien. Il est connu pour sa découverte des lois de l'hérédité.

Michelet Jules (1798-1874) : Historien français.

Mill John Stuart (1806-1873) : Logicien et économiste britannique connu pour son ouvrage « *Principles of Political Economy* » (« *Principes de l'Économie politique* »). Après Adam Smith et Thomas Malthus, il est un des derniers représentants de l'école classique.

Montaigne Michel de (1533-1592) : Écrivain français, auteur des « *Essais* ».

Noether Emmy (1882-1935) : Mathématicienne allemande connue pour ses travaux en algèbre abstraite et en physique théorique. Le théorème de Noether montre le lien entre les symétries et les lois de conservation.

Onsager Lars (1903-1976) : Physico-chimiste d'origine norvégienne. Prix Nobel de chimie 1968 pour ses travaux en thermodynamique des processus irréversibles.

Pareto Vilfredo (1848-1923) : Économiste franco-italien connu pour son étude sur les inégalités de richesses.

Parravano Antonio (1956-) : Astronome vénézuélien.

Pascal Blaise (1623-1662) : Mathématicien, physicien et philosophe français, auteur des « *Pensées* » (1670).

Planck Max (1858-1947) : Physicien allemand, Prix Nobel de physique 1918, connu pour sa découverte des quantas et de la constante de Planck.

Platon (428 ou 427 - 347 ou 346 avant J.-C.) : Philosophe grec.

Price George R. (1922-1975) : Biologiste américain, généticien des populations. Il a travaillé avec Hamilton sur la *sélection de parentèle*.

Prigogine Ilya (1917-2003) : Physico-chimiste belge d'origine russe. Un des fondateurs de la thermodynamique hors-équilibre. Prix Nobel de chimie 1977.

Reynolds Osborne (1842-1912) : Physicien et ingénieur irlandais, spécialiste de la dynamique des fluides. Il est connu pour son introduction du nombre dit de Reynolds.

Ricardo David (1772-1823) : Économiste anglais connu pour sa théorie de l'avantage comparatif et sa loi des rendements décroissants.

Richter Charles Francis (1900-1985) : Sismologue américain connu pour son échelle de mesure de l'énergie des séismes et pour la loi de Gutenberg-Richter.

Rosa Hartmut (1965-) : Sociologue allemand connu pour son livre « *Accélération* ».

Scotto Pietro : Biologiste italien connu pour ses travaux avec Graziano Fiorito sur les *céphalopodes*.

Shannon Claude (1916-2001) : Mathématicien et ingénieur américain. Fondateur de la théorie de l'information.

Shennan Stephen (1949-) : Archéologue britannique.

Smirnov Stanislav (1970-) : Mathématicien russe. Médaille Fields 2010 pour ses travaux sur les *domaines d'Ising* et la percolation.

Smith Adam (1723-1790) : Économiste écossais chef de file de l'école classique. Il est connu pour son livre sur la « *Richesse des Nations* », un des textes fondateurs du libéralisme économique.

Smith John Maynard (1920-2004) : Biologiste britannique, théoricien de l'évolution. Il est connu pour son utilisation en biologie de la théorie des jeux et pour le concept de stratégie évolutionnairement stable (Evolutionarily Stable Strategy ou ESS).

Smolin Lee (1955-) : Physicien théoricien américain connu pour ses travaux en gravité quantique et sa théorie des univers féconds.

Sneppen Kim (1960-) : Physicien danois. Il a montré avec Per Bak que l'évolution des espèces peut être considérée comme un phénomène de *criticalité auto-organisée*.

Soddy Frederick (1877-1956) : Chimiste anglais connu pour ses travaux sur la radioactivité. Prix Nobel de Chimie 1921.

Spencer Herbert (1820-1903) : Sociologue anglais connu pour avoir cherché à étendre la théorie de Darwin aux sociétés humaines.

Stassinopoulos Dimitris : Informaticien d'origine grecque connu pour ses travaux sur le cerveau.

Tainter Joseph A. (1949-) : Anthropologue et historien américain connu pour son ouvrage sur l'effondrement des sociétés complexes (« *The Collapse of Complex Societies* ») paru en 1988.

Teilhard de Chardin Pierre (1881-1955) : Paléontologue, philosophe et théologien français connu notamment pour son ouvrage « *Le phénomène humain* ».

Todd Emmanuel (1951-) : Historien, démographe, sociologue et politologue français.

Toynbee Arnold J. (1889-1975) : Historien britannique connu pour son analyse en douze volumes de l'essor et de la chute des civilisations (« *A Study of History* ») paru entre 1934 et 1961.

Trivers Robert (1943-) : Biologiste américain connu pour ses études sur l'altruisme réciproque (1971) et l'investissement parental (1972)

Van Valen Leigh (1935-) : Biologiste évolutionniste auteur de la théorie de l'effet de *reine rouge*.

Von Neuman John (1903-1957) : Mathématicien et physicien américain d'origine hongroise, particulièrement connu pour ses travaux théoriques en informatique.

Verhulst Pierre-François (1804-1849) : Mathématicien belge connu pour son étude de l'évolution des populations et des fonctions logistiques.

Wallace Alfred Russel (1823-1913) : Naturaliste britannique codécouvreur de la *sélection naturelle* avec Charles Darwin. Il a identifié la ligne séparant la faune australienne de la faune asiatique, et qui porte son nom.

Watson James Dewey (1928-) : Biochimiste et généticien américain, Prix Nobel de médecine 1962. Avec Francis Crick, il a révélé en 1953 la structure en hélice de la molécule d'ADN.

Watt James (1736-1819) : Ingénieur écossais. Ses travaux sont à l'origine de l'essor de l'utilisation industrielle de la machine à vapeur.

Williams George C. (1926-2010) : Biologiste américain connu pour sa contribution aux théories évolutionnistes néodarwiniennes.

Wilson Edward Osborne (1929-) : Biologiste et entomologiste américain connu pour son travail en évolution et en sociobiologie.

Woltjer Lodewijk (1930-) : Astrophysicien hollandais. Ancien directeur de l'Observatoire européen austral (ESO).

Wynne-Edwards Vero Copner (1906-1997): Zoologiste britannique partisan de la sélection de groupe.

Zhabotinsky Anatol Markovich (1938-2008) : Chimiste connu pour ses travaux sur les oscillateurs chimiques, notamment la réaction de Belousov-Zhabotinsky.

Zipf George Kingsley (1902-1950) : Linguiste et philologue américain. Il a appliqué la statistique à l'étude des langues.

Glossaire des termes scientifiques et techniques

Les termes ci-dessous sont en italique dans le texte.

Altruiste : voir *coopération altruiste*.

Attracteur : Un *attracteur* est une région de l'*espace des phases* vers lequel convergent toutes les trajectoires du voisinage.

Attracteur étrange : *Attracteur* sensible aux conditions initiales. Il confère aux trajectoires un caractère imprévisible.

ADN : Acide désoxyribonucléique. Très longue chaîne moléculaire le long de laquelle sont codées les informations nécessaires à la reproduction d'un être vivant.

Aérobie : Se dit d'un organisme vivant qui utilise l'oxygène de l'air.

Anaérobie : Se dit d'un organisme vivant qui n'utilise pas l'oxygène de l'air.

Archéobactérie : Appelée aussi archée ou archaea. Variété de *procaryotes* considérée maintenant comme distincte de celle des « vraies » bactéries (appelées aussi *eubactéries*).

ARN : Acide ribonucléique. Chaîne moléculaire semblable à celle de l'*ADN*, mais capable de déclencher la synthèse des acides aminés correspondants.

ATP : Adénosine triphosphate. Molécule organique utilisée par tous les êtres vivants pour emmagasiner et transporter de l'énergie.

Australopithèque : Genre appartenant à la famille des hominidés. On trouve leurs fossiles exclusivement en Afrique. Le genre *Homo* serait vraisemblablement issu d'une branche gracile ancienne des *australopithèques*.

Autocatalytique : Une réaction chimique est dite *autocatalytique* si elle produit son propre *catalyseur*.

Autotrophe : Se dit d'un organisme vivant capable de vivre en l'absence de toute matière organique. Opposé d'*hétérotrophe*.

Baldwin (effet) : Facteur d'évolution proposé par Baldwin en 1896. On sait

maintenant qu'il s'agit d'une évolution *génétique* provoquée par un comportement transmis *culturellement*.

Bifurcation : Discontinuité d'une évolution dans l'*espace des phases*.

Biomasse : Matière d'origine organique capable de fournir de l'énergie par combustion.

Biosphère : Ensemble de tous les êtres vivants et de leur environnement.

Cambrien : La plus ancienne période géologique du *paléozoïque*. S'étend entre 542 et 488 millions d'années avant aujourd'hui.

Carbonifère : Avant-dernière période du paléozoïque. S'étend entre 360 et 300 millions d'années avant aujourd'hui.

Catalyseur : Substance capable d'accroître considérablement la vitesse d'une réaction chimique. Comparée aux réactifs, elle intervient dans la réaction en très petites quantités et se retrouve inchangée à la fin de la réaction.

Changement d'échelle (Invariance par) : Se dit d'une distribution spatiale (ou temporelle) indépendante de l'échelle d'espace (ou de temps) considérée. Mathématiquement, la fonction $f(x)$ qui la représente doit être proportionnelle à $f(kx)$, où k est un facteur d'échelle arbitraire. Cela implique que $f(x)$ est de la forme x^α , c'est-à-dire une loi de puissance. En effet $(kx)^\alpha = k^\alpha x^\alpha$ est bien proportionnel à x^α .

Chimioautotrophe : Se dit d'un organisme vivant obtenant son énergie à partir de réactions chimiques minérales.

Chloroplaste : *Organite* siège de la *photosynthèse*.

Céphalopode : Classe de mollusques comprenant le poulpe ou pieuvre, le calmar et la seiche.

Chiralité : Le fait de ne pas être superposable à son image dans un miroir.

Chromosome : Structure contenant l'ADN à l'intérieur d'une cellule. Chez les *eucaryotes*, les *chromosomes* sont dans le noyau de la cellule.

Cinétique : Qui est associé au mouvement (énergie *cinétique*, moment *cinétique*). La théorie *cinétique* des gaz s'intéresse au mouvement des molécules.

Clonage : Obtention d'un être vivant *génétiquement* identique au parent qui lui donne naissance.

Club de Rome : Groupe de réflexion fondé en 1968 et connu pour avoir publié en 1972 un rapport (dit rapport « Meadows ») dont le titre « The limits of growth » (Les limites de la croissance) a été traduit en français par « Halte à la croissance ? »

Colonie : Population dont tous les éléments sont issus d'une même souche. S'applique aux populations de bactéries comme aux populations humaines.

Conduction : Transport de chaleur sans mouvement de matière.

Conjugaison : Mécanisme par lequel une bactérie transmet du matériel *génétique* à une autre bactérie.

Convection : Transport de chaleur par mouvement de matière.

Coopération altruiste : Coopération engendrée par des *gènes* ou une *culture* commune.

Coopération symbiotique : Coopération entre deux organismes *génétiquement* ou *culturellement* différents

Crétacé : Troisième et dernière période du *mésozoïque*. S'étend de 145 à 65 millions d'années avant aujourd'hui.

Criticalité auto-organisée : Nom donné par Per Bak et ses collaborateurs à un processus statistique général suivant lequel les systèmes dynamiques non-linéaires s'auto-organisent en créant des avalanches pour dissiper l'énergie.

Critique : qualifie un état ou des conditions caractéristiques d'un *point critique*.

Culture : Toute information mémorisée dans le cerveau.

Culturel : Qui a trait à la *culture*.

Culturellement : De manière *culturelle*.

Cunéiforme : Se dit de la forme d'écriture la plus ancienne du monde, gravée à l'aide d'un coin dans de l'argile. Elle apparaît en Mésopotamie entre 3 400 et 3 200 avant J.-C.

Cybernétique : Science qui étudie les échanges d'information dans un système.

Cytosquelette : Réseau filamenteux conférant une certaine rigidité mécanique aux cellules *eucaryotes*.

Dévonien : Quatrième période du *paléozoïque*. S'étend de 416 à 359 millions d'années avant aujourd'hui.

Diploïde : Se dit des cellules dont les noyaux possèdent deux jeux de *chromosomes*.

Domaine d'Ising : Domaine à l'intérieur duquel les éléments partagent une information commune (originellement un *spin* commun).

Économie d'échelle : Il y a *économie d'échelle* si le coût unitaire de production diminue lorsque la production augmente.

Endosymbiose : *Symbiose* entre deux organismes dont l'un contient l'autre.

Endosymbiotique : Par *endosymbiose*.

Énergie d'activation : Énergie nécessaire pour franchir une barrière de potentiel de façon à libérer de l'énergie.

Énergies fossiles : Énergies issues de la combustion de matériaux fossiles provenant de la décomposition *anaérobie* d'êtres vivants (charbon, pétrole, gaz naturel).

Énergie libre : Énergie intégralement convertible en travail mécanique.

Entropie : Mesure de la dissipation irréversible de l'énergie. *L'entropie* mesure la perte de notre capacité à convertir l'énergie en travail mécanique. Elle mesure aussi la perte correspondante d'information.

Enzyme : Nom donné aux *catalyseurs* en biochimie.

Équilibres ponctuels (Théorie des) : Théorie proposée par Jay Gould et Niles Eldredge selon laquelle l'évolution ne serait pas continue, mais plutôt lente et entrecoupée de phases d'évolution beaucoup plus rapide.

Espace des phases : Ensemble des paramètres permettant de suivre et de décrire les différentes phases d'une évolution.

Eubactérie : bactérie autre que les *archéobactéries*.

Eucaryotes : Organisme vivant dont chaque cellule contient un noyau.

Exponentielle : voir *progression géométrique*.

Exponentiellement : de manière *exponentielle*.

Ferromagnétisme : propriété des substances *ferromagnétiques*.

Ferromagnétique : se dit d'une substance qui s'aimante en présence d'un champ magnétique et qui conserve ensuite cette aimantation.

Flagelle : *Organite* assurant la mobilité d'une cellule.

Fractal(e) : Se dit d'un objet dont la structure est invariante par *changement d'échelle*.

Gaïa : Nom donné par James Lovelock à la *symbiose* que formerait la Terre avec l'ensemble des êtres vivants.

Gène : Élément d'information héréditaire. Plus précisément : fragment de *chromosome* codant une information. Le plus souvent cette information concerne la production d'une chaîne particulière d'acides aminés dans une protéine.

Génétique : Qui a trait aux *gènes*.

Génétiquement : De manière *génétique*.

Génome : Ensemble des *gènes* nécessaires à un même organisme vivant.

Haploïde : Se dit des cellules dont les noyaux possèdent un seul jeu de *chromosomes*.

Hétérotrophe : Se dit d'un organisme vivant qui ne peut pas vivre sans se nourrir de matière organique (venant d'autres êtres vivants). Opposé de *autotrophe*.

Homéostasie : Terme utilisé par les biologistes pour désigner un état stationnaire d'équilibre dynamique. Ce terme s'applique aux organismes vivants.

Homo erectus : Représentant du genre *Homo* dont on trouve des restes fossiles en Asie. Apparue entre un et deux millions d'années, l'espèce se serait éteinte il y a 200 ou 300 mille ans.

Homo neanderthalensis : Représentant du genre *Homo* dont on trouve des restes fossiles en Europe. Apparue il y a quelques centaine de milliers d'années, l'espèce se serait éteinte il y a moins de trente mille ans.

Homo sapiens : Nom donné à notre espèce dans la classification des êtres vivants introduite au XVIII^e siècle par le biologiste suédois Carl Von Linné. L'espèce *Homo sapiens* est parfois divisée en deux sous-espèces : *Homo sapiens sapiens* et *Homo sapiens neanderthalensis*. Cette distinction semble avoir maintenant été abandonnée, l'homme de Néandertal étant considéré comme une espèce à part entière sous le nom d'*Homo neanderthalensis*. L'espèce *Homo*

sapiens est actuellement la seule représentante du genre *Homo*, toutes les autres espèces du genre *Homo* étant maintenant éteintes.

Hormone : Substance sécrétée par un organisme vivant pour transmettre une information à toutes ses cellules.

Inflation : Période d'accélération de l'expansion de l'Univers.

Ion : Atome ou molécule chargée électriquement.

Jurassique : Deuxième période du *mésozoïque*. S'étend de 200 à 145 millions d'années avant aujourd'hui.

Logarithme : Le *logarithme* (de base 2) de 2^n est n . Si un événement a une chance sur 2^n de se produire, sa probabilité est $1/2^n$ qui s'écrit aussi 2^{-n} . L'information correspondante est de n bits.

Logarithmique : Se dit d'une loi ou d'une fonction représentée par le *logarithme* de la variable.

Mécanique statistique : Science qui étudie le comportement macroscopique d'un très grand nombre d'objets physiques en interaction.

Méiose : Mode de division des cellules *eucaryotes* entraînant une division par deux du nombre de *chromosomes*. Une cellule *diploïde* donne deux cellules *haploïdes*. Ce mode produit les cellules germinales (gamètes) nécessaires à la reproduction sexuée des organismes multicellulaires.

Mème : Nom proposé par Richard Dawkins pour désigner l'équivalent *culturel* des *gènes*. Élément d'information transmis par le langage.

Mémétique : Qui a trait aux *mèmes* : code *mémétique* (langage), ressources *mémétiques* (connaissances).

Mésozoïque : Ancienne ère secondaire. S'étend de 251 à 65 millions d'années avant aujourd'hui.

Métabolisme : Ensemble des réactions biochimiques productrices d'*énergie libre* chez un être vivant.

Mitochondrie : *Organe* présente à l'intérieur des cellules *eucaryotes* et servant à la respiration cellulaire.

Mitose : Mode de reproduction non sexuée des *eucaryotes* par division cellulaire.

Morphogénèse : Développement des différentes formes d'un même organisme.

Mutation : Modification aléatoire de certains *gènes*, transmise héréditairement.

Néolithique : Époque préhistorique à partir de laquelle l'homme a eu recours à l'agriculture et à l'élevage.

Niche écologique : Environnement auquel une espèce est adaptée.

Ontogénèse : genèse d'un être vivant à partir d'un embryon.

Opalescence critique : Diffusion de la lumière par un fluide au *point critique*.

Ordovicien : Seconde période du *paléozoïque*. S'étend de 488 à 444 millions d'années avant aujourd'hui.

Organite (ou organelle) : Inclusion observée dans les cellules *eucaryotes*.

Paléontologie : Étude des restes fossiles des anciens êtres vivants, afin de mieux comprendre leur évolution.

Paléozoïque : Ancienne ère primaire. S'étend de 542 à 251 millions d'années avant aujourd'hui.

Paramagnétisme : Propriété des substances *paramagnétiques*.

Paramagnétique : Se dit d'une substance qui s'aimante dans le sens d'un champ magnétique, mais qui perd cette aimantation en dehors du champ.

Permien : Sixième et dernière période du *paléozoïque*. S'étend de 299 à 251 millions d'années avant aujourd'hui.

Phagocytose : Mécanisme suivant lequel une cellule peut englober et assimiler une particule étrangère ou une autre cellule.

Phéromone : Substance chimique servant à échanger de l'information entre les membres d'une même espèce.

Photoautotrophe : Se dit d'un organisme vivant obtenant son énergie à partir du rayonnement solaire.

Photosynthèse : Mécanisme permettant à certains êtres vivants d'utiliser l'énergie solaire pour synthétiser de la matière organique.

Phylogénèse : Genèse d'une espèce biologique nouvelle.

Point critique : Conditions sous lesquels deux états différents de la matière

deviennent identiques (ou un même état se différencie en deux états distincts).

Point de Curie : *Point critique* de transition entre le *ferromagnétisme* et le *paramagnétisme*.

Procaryote : Organisme vivant dont la cellule ne contient pas de noyau. Les bactéries sont des *procaryotes*.

Progression géométrique : Se dit d'une suite de nombres dont chaque terme s'obtient en multipliant le précédent par un même coefficient. Lorsque le processus est continu, on dit que la croissance est *exponentielle*.

Protoctiste : Organisme formé d'un très petit nombre de cellules *eucaryotes*, le plus souvent une seule cellule (protiste). Les *protozoaires* sont des *protoctistes* dont le mode de nutrition est de type animal.

Protozoaire : voir *protoctiste*.

Puits de potentiel : État d'équilibre stable duquel un système ne peut sortir sans apport d'énergie.

Quantum (pl. *quanta*) : Quantité d'énergie indivisible.

Recuit : Opération de chauffage, maintien en température, puis refroidissement d'une substance, destinée à améliorer sa cristallisation.

Recuit simulé : Algorithme d'optimisation en présence d'optimums secondaires.

Reine rouge (*Effet de la*) : Nom donné par Leigh van Valen à un mécanisme conduisant les espèces biologiques à leur extinction. Ce nom fait référence à un personnage du roman de Lewis Carroll « À travers le miroir ».

Rendement de Carnot : Fraction maximale de la chaleur convertible en travail mécanique.

Rétroaction : Inclusion dans la commande d'un système d'une information sur le résultat de l'action.

Sélection artificielle : Ensemble des mécanismes par lesquels l'Homme modifie l'évolution naturelle des espèces afin de subvenir à ses propres besoins.

Sélection de groupe : Forme de *sélection naturelle* agissant sur l'ensemble des individus appartenant à un même groupe. Niée par certains biologistes, la *sélection de groupe* est possible lorsqu'il y a socialisation des individus. C'est le cas par exemple s'il y a échange *culturel* d'information entre les individus d'un même groupe.

Sélection de parentèle : Forme de sélection naturelle agissant sur l'ensemble des individus partageant en commun des *gènes* d'un même ancêtre. C'est la forme *génétique* de la *sélection de groupe*.

Sélection naturelle : Ensemble des mécanismes par lesquels une espèce biologique s'adapte continuellement à son environnement naturel.

Sélection r et K : Deux aspects différents de la *sélection naturelle*. Lorsque l'environnement est instable, la *sélection naturelle* favorise les petits organismes capables de se reproduire et de se disperser rapidement. Elle est dite de type « r ». Lorsque l'environnement est stable, on observe le phénomène opposé. La *sélection naturelle* est alors dite de type « K ».

Silurien : Troisième période du *paléozoïque*. S'étend de 444 à 416 millions d'années avant aujourd'hui.

Spin : *Quantum* de moment *cinétique*. Pour une particule chargée, aimant quantique élémentaire.

Stromatolite : Formation calcaire édifiée par des *colonies* bactériennes riches en cyanobactéries.

Structure dissipative : Structure qui ne subsiste que si elle est alimentée par un flux permanent d'énergie. Les êtres vivants sont des *structures dissipatives*. Les *structures dissipatives* s'auto-organisent à la manière des *transitions de phase* continues.

Symbiose : Association permanente entre des organismes d'espèce différente.

Symbiotique : Par *symbiose*.

Température absolue : La *température absolue* s'exprime en degrés Kelvin. Elle s'obtient en ajoutant 273,15 à la température usuelle mesurée en degrés Celsius. Lorsque sa masse volumique est suffisamment faible, la pression ou le volume d'un gaz est proportionnel à sa *température absolue*. Un gaz idéal qui aurait toujours cette propriété est appelé un gaz parfait.

Transduction : Transfert de fragments d'ADN d'une bactérie à une autre par l'intermédiaire d'un virus.

Transformation : Intégration d'un fragment d'ADN étranger dans une cellule.

Transition de phase : Changement d'état de la matière comme le passage de l'état liquide à l'état gazeux. On distingue les *transitions de phase* abruptes, qui

nécessitent un germe, des *transitions de phase* continues, qui n'en nécessitent pas, mais ne se produisent que dans des conditions bien précises appelées *point critiques*.

Trias : Première période du *mésozoïque*. S'étend de 251 à 200 millions d'années avant aujourd'hui.

Wallace (ligne) : Ligne séparant la faune australienne de celle de l'Asie, identifiée pour la première fois par Alfred Russel *Wallace*.

Liste des figures et tableaux

Figure 1. Diagramme pression-température.....	45
Figure 2. Exemples de <i>domaines d'Ising</i> (T_c est la température <i>critique</i>).....	48
Figure 3. Exemple de <i>bifurcation</i>	49
Figure 4. Énergie dissipée par unité de masse en fonction de l'âge d'apparition (d'après Éric Chaisson, 2001)	59
Figure 5. L'alternance entre la macroévolution et la microévolution (d'après Erich Jantsch, 1980).....	62
Figure 6. La loi de Kleiber (d'après John Whitfield, 2006).....	83
Figure 7. Mécanismes d'adaptation à l'environnement.....	89
Figure 8. Développement d'une <i>colonie</i> de bactéries (photo Eshel Ben Jacob).....	111
Figure 9. Fonctionnement du cerveau (d'après Bak et Stassinopoulos).....	112
Figure 10. Les quatre types de famille (selon E. Todd).....	143
Tableau 1. Alternance de part et d'autre du point critique.....	150
Figure 11. Évolution du nombre de villages dans un site du Jura (d'après S. Shennan).....	164
Figure 12. Évolution de la population mondiale (données Wikipedia).....	184
Figure 13. Évolution de la puissance dissipée par individu dans le monde (données IEA).....	187
Figure 14. Évolution de la population mondiale (rapport Meadows) d'après Turner.....	189
Tableau 2. Progression des principaux moyens de transmission (à gauche) et de mémorisation (à droite) de l'information.....	192

Figure 15. Oscillateur non linéaire dit de relaxation	231
Figure 16. Réseau d'oscillateurs non linéaires.....	232
Figure 17. Roue chaotique de Malkus et Howard (d'après S. Strogatz)	234

Bibliographie

Le lecteur trouvera ci-dessous une liste non exhaustive des principaux ouvrages qui ont inspiré ce travail. Lorsqu'elle existe, j'ai indiqué la traduction française. J'ai complété cette liste avec quelques ouvrages plus récents sur les mêmes sujets.

I. Les lois de la thermodynamique :

Pour physiciens :

Edwin T. Jaynes, *Probability Theory, The Logic of Science*, Cambridge, 2003.

Axel Kleidon, Ralph D. Lorenz, edit., *Non-equilibrium Thermodynamics and the Production of Entropy*, Springer, 2005.

Steven H. Strogatz, *Non-linear Dynamics and Chaos*, Westview, 1994.

James P. Sethna, *Entropy, Order Parameters and Complexity*, Oxford, 2006.

Ricart V. Solé, *Phase transitions*, Princeton, 2011.

Pour grand public :

- En français :

Per Bak, *Quand la nature s'organise*, Flammarion, 1999.

Sadi Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, 1824.

James Gleick, *La théorie du chaos : vers une nouvelle science*, Flammarion, 2008.

John Gribbin, *Le chaos, la complexité et l'émergence de la vie*, 2004, Flammarion, 2010.

Ilya Prigogine, *Les lois du chaos*, Flammarion, 2008.

- En anglais :

Eric Chaisson, *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature*, Harvard, 2001.

Eric Jantsch, *The Self-Organizing Universe*, Pergamon, 1980.

Eric D. Schneider, Dorion Sagan, *Into the Cool, Energy flow, Thermodynamics and Life*, Chicago, 2005.

Lee Smolin. *The Life of the Cosmos*, Oxford, 1997.

II. L'évolution génétique :

- En français :

Patrice David, Sarah Samadi, *La théorie de l'évolution*, Flammarion, 2000.

Richard Dawkins, *Le gène égoïste*, 1976, Odile Jacob, 2003.

Richard Lewontin, *La triple hélice*, Seuil, 1998.

Lynn Margulis, Dorion Sagan, *L'univers bactériel*, Seuil, 2002.

John Maynard Smith, *La construction du vivant : Gènes, embryons et évolution*, 1999, Cassini, 2001.

Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité*, Seuil, 1970.

Jean-Marie Pelt, *L'évolution vue par un botaniste*, Fayard, 2011.

- En anglais :

Scott Camazine et al., *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton, 2001.

Pierre Luigi Luisi, *The Emergence of Life*, Cambridge, 2006.

Lynn Margulis and Dorion Sagan, *Microcosmos*, California, 1986.

Lynn Margulis, *Symbiotic planet*, Perseus Basic Book, 1998.

Lynn Margulis & Dorion Sagan, *A Theory of the Origins of Species*, Perseus Basic Book, 2002.

Harold Morowitz, *The Emergence of Everything*, Oxford, 2002.

John Whitfield, *In the Beat of the Heart*, Joseph Henry, 2006.

III. Des gènes à la culture

- En français :

Howard Bloom, *Le principe de Lucifer*, tome 1, Le jardin des livres, 1997.

Howard Bloom, *Le principe de Lucifer*, tome 2, Le jardin des livres, 2003.

Luca Cavalli-Sforza, *Qui sommes-nous ?* A. Mondatori, 1993, Flammarion, 1997.

Luca Cavalli-Sforza, *Évolution biologique, évolution culturelle*, 2004, Odile Jacob, 2005.

Jared Diamond, *Le troisième chimpanzé*, Gallimard, 2000.

Henry de Lumley, *La Grande Histoire des premiers hommes européens*, Odile Jacob, 2007.

- En anglais :

Kate Distin, *Cultural Evolution*, Cambridge, 2010.

Aaron Lynch, *Thought Contagion*, Perseus Basic Books, 1996.

Peter J. Richerson and Robert Boyd, *Not by Genes Alone*, Chicago, 2005.

Stephen Shennan, *Genes, Memes and Human History*, Thames & Hudson, 2002.
Spencer Wells, *The Journey of Man*, Random House, 2002.

IV. L'évolution culturelle

- En français (à titre indicatif) :
Hannah Arendt, *La crise de la culture*, 1954, Gallimard folio-essais, 1972.
Jacques Attali, *Une brève histoire de l'avenir*, Fayard, 2006.
Jacques Attali, *Demain qui gouvernera le monde ?* Fayard, 2011.
Philippe Bihouix, Benoît de Guillebon, *Quel futur pour les métaux ?* EDP Sciences, 2010.
Jacques Blamont, *Introduction au siècle des menaces*, Odile Jacob, 2004.
Howard Bloom, *Le principe de Lucifer*, tome 1 et 2, Le jardin des livres, 1997 et 2003.
Franz Broschimmer, *Une brève histoire de l'extinction des espèces*, Agone, 2010.
Vincent Cheynet, *Le choc de la décroissance*, Seuil, 2008.
Yves Cochet, *Pétrole apocalypse*, Fayard, 2005.
Jared Diamond, *De l'inégalité parmi les sociétés : Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*, 1997, 1999, Gallimard, 2007.
Jared Diamond, *Effondrement : Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, 2005, Gallimard, 2006.
Nicholas Georgescu-Roegen, *La décroissance : entropie-écologie-économie*, Sang de la Terre, 3^e édition 2006.
James Gleick, *Toujours plus vite*, Hachette, 2001.
Richard Heinberg, *Pétrole : la fête est finie*, 2003, 2005, Demi-Lune, 2008.
Rob Hopkins, *Manuel de transition*, Écosociété, Montréal, 2010.
Jean-Marc Jancovici, Alain Grandjean, *C'est maintenant ! 3 ans pour sauver le monde*, Seuil, 2009.
Éric Julien, *Le chemin des neuf mondes. Les Indiens Koguis de la Colombie peuvent nous enseigner les mystères de la vie*, Albin Michel, 2001.
Éric Julien et Muriel Fifi (sous la direction de), *Les indiens Koguis. La mémoire des possibles*, Actes Sud, 2007.
Paul Krugman, *L'économie auto-organisatrice*, 1996, De Boeck, 2008.
André Lebeau, *L'engrenage de la technique. Essai sur une menace planétaire*, Gallimard, 2005.

André Lebeau, *L'enfermement planétaire*, Gallimard, 2008.
André Lebeau, *Les horizons terrestres*, Gallimard, 2011.
James Lovelock, *La terre est un être vivant : l'hypothèse Gaïa*, Flammarion, 2010.
James Lovelock, *Gaïa : une médecine pour la planète*, Sang de la Terre, 2001.
Alberto Magnaghi, *Le projet local*, 2000, Pierre Mardaga, 2003.
Hartmut Rosa, *Accélération : une critique sociale du temps*, La Découverte, 2010.
Emmanuel Todd, *L'invention de l'Europe*, Seuil, 1996.
Harald Welzer, *Les guerres du climat*, 2008, Gallimard, 2009.
Jean-Luc Wingert, *La vie après le pétrole*, Autrement, 2005.
- En anglais :
Robert Axelrod, *The Evolution of Coopération*, Perseus Pasic Books, 1984.
Roger-Maurice Bonnet, Lodewijk Woltjer, *Surviving 1,000 centuries can we do it ?* Springer, Praxis, 2008.
Kenneth Boulding, *The Economics of the Coming Spaceship Earth*, 1966.
Vernon Gill Carter and Tom Dale, *Topsoil and Civilization*, Oklahoma, 1955, 1974.
Herman E. Daly, *Steady-State Economics: 2nd edition with New Essays*, Island Press, 1991.
Nicholas Georgescu Roegen, *The Entropy law and the Economic Process*, 1971.
Frederick Soddy, *Wealth, Virtual Wealth and Debt*, George Allen & Unwin, 1926.
Joseph A. Tainter, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge, 1990.
Bryan Ward-Perkins, *The fall of Rome and the end of civilization*, Oxford, 2005.

Thermodynamique de l'évolution existe également en version numérique
eBook, au format .epub :
- en français,
- en anglais : *The Thermodynamics of Evolution*,
téléchargeables sur notre site :
www.editionsparole.fr

Ouvrages parus aux éditions Parole

Collection Main de femme

Isabelle Hasbroucq : *Rouge comme un cœur dans la bouche de dieu.*

Violette Ailhaud : *L'homme semence.*

Lacolaffeille : *L'amour fait aux femmes.*

Mélanie Laheurte : *Sensations photographiques du Verdon.*

Catherine Carage : *Le Coucou.*

Violaine Warin : *Femmes lunes.*

Juliet Schlunke : *Rosenthal, une enfance australienne.*

Isabelle Hasbroucq : *Petites têtes d'épingles et autres minuties.*

Maria Borrély : *Sous le vent.*

Brigitte Broc, Emeline Chatelin – CD poésie et harpe : *Mon désir est devenu jardin.*

Claire Frédéric : *Le piano à écrire.*

Maria Borrély : *Les Reculas.*

Édith Reffet : *Le Bout du Monde.*

Géraldine Hubinois : *Sur la plus haute branche.*

Édith Reffet : *Lit 54, retour de l'enfer.*

Emilie Kah : *La petite flingueuse - Retour à Diên Biên Phu.*

Ile Eniger : *La femme en vol.*

Juliet Schlunke : *La Dryade.*

Suzanne Ghersenzon-Spénale : *Celui qui déplaçait les montagnes.*

Traduit en allemand par Frédérique-Marie Miñana – *Der Samenmann – L'homme semence*
de Violette Ailhaud.

Violette Ailhaud : *L'homme semence* – version illustrée de linogravures de Maryline Viard.

Sophie Alfieri : *Trois jeunes appelés dans les Aurès (Algérie 1956-1957).*

Émilie Kah : *L'automate du vide-greniers.*

Jackeline Van Bruaene : *Rua da Cruz et autres histoires.*

Marie Lébely : *Le large dans les poubelles.*

Soumya Ammar Khodja : *De si beaux ennemis et autres nouvelles.*

Mireille Barbieri : *C'était en février.*

Luisa Myrial : *L'île - Les sept nuits d'Ève à Lilith.*

Soumya Ammar Khodja : *Elle était ma première terre.*

Édith Reffet : *Ma mère - Chronique d'un non-amour.*

Nancy Huston : Livre biface – *Sois belle/Sois fort.*

Marie Lébely : *L'horizon d'un événement.*

Maria Borrély : *La tempête apaisée.*

Maria Borrély : *Les mains vides.*

Maria Borrély : *Le dernier feu.*

Mireille Barbieri : *À l'encre violette.*

Natacha Verdier, Cara Tael, Florence Batisse-Pichet, Valérie Marcoult, Virginie Bardin,

Corinne Pons, Caroline Gonnaud, Laurence Sharples, Sylvie Pellet, Fannie Lefebvre,

Isabelle Henry, Charlotte Naturale : *12 mois, 12 femmes.*

Laure Sorasso : *Les guerrières.*

Suzanne Ghersenzon-Spénale : *Polina - Une Ukrainienne dans la tourmente.*

Anne Lecourt : *Sept jours en face.*
Stéphanie Quérité : *Rouges.*
Christine Demarchi : *La table de Joseph.*
Juliet Schlunke : *Pourquoi partir ? Le rêve australien.*
Fanny Saintenoy : *J'ai dû vous croiser dans Paris.*
L'homme semence de Violette Ailhaud, traduit en anglais par Nancy Huston : *The Seed Man.*
Muriel Roche : *Fusil.*
Nancy Huston : *Rien d'autre que cette félicité.*
Emilie Kah : *Rendez-vous chambre 31.*
Nancy Huston : *Leçons d'indifférence.*
Simone Righetti : *Maille à maille.*
L'homme semence de Violette Ailhaud, traduit en occitan provençal par Daniel Daumàs : *Samenaire de vidas.*
Laure Sorasso : *Un été infini.*

Collection Regard d'homme

Gilles Vincent : *Si je cessais de vous écrire... - Le choix de l'intranquillité.*
Patrick Caffarel : *Sur la route de Ten Sleep - Un berger des Alpes au Far West.*
Jean Darot : *L'amer du thé - De la Chine en éruption à la nuit éternelle.*
Daniel Picard : *Mission libyenne - À l'aube du Printemps arabe.*
Daniel Cohen Aknin : *Un lit dans l'océan.*

Collection Le temps d'apprendre

François Roddier : *Le pain, le levain et les gènes.*
Laurence Verna-Vanin : *Voir et penser : de l'œil à l'esprit.*
Agnès Pastourel : *Presque encyclopédie de la vigne et du vin.*
Louis Brachet : *La terre prise au piège de l'homme.*
Paulette Borrély : *Maria Borrély 1890-1963.*
François Roddier : *Thermodynamique de l'évolution.*
Jack Meurant : *Jean Giono et le pacifisme, 1934-1940 - La tentation politique.*
Henry Lombard : *Sentiers philosophiques.*
Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Italie à l'Aquitaine.*
Jacky Plauchud Vaucher et Barney Vaucher : *Calanques : un siècle d'amour et de vigilance.*
Christiane Gaillard : *Le petit traité de l'amour.*
Yannick Bernier : *La face cachée du Verdon.*
Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Espagne à l'Aquitaine.*
Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre. De l'Alsace à l'Aquitaine.*
Berthe Pélestor-Ravel : *Vingt ans de cohabitation dévastatrice : la colère d'une bergère.*
Langage Pluriel : *"La cuisine" D'un pays à l'autre - 100 recettes immigrées.*
Langage Pluriel : *D'un pays à l'autre - Pays d'Eymet terre d'accueil.*
Emma Sanz-Delzars : *Paroles d'avant l'oubli - La retirada. Une famille dans l'exode des républicains espagnols en 1938 et 1939.*
Djamel Safsaf : *Le tango argentin, une marche à deux au sein du bal - Des origines à une méthode originale.*
François Roddier : *De la thermodynamique à l'économie.*
Jack Meurant : *Jean Giono et le pacifisme, 1934-1944 - De la paix à la guerre.*

La collection Le temps d'apprendre devient

Curieux par nature

Virginie Langlois, Philippe Granarolo, illustratrice : Céline Decorte : *Dessine-moi un chat de Schrödinger - Quand la philosophie quantique révèle l'Extra-Ordinaire de notre quotidien.*

Daniel Nahon : *Le réchauffement climatique commence sous nos pieds - Le scientifique, le citoyen et le politique, face à la crise.*

François Roddier : *Le pain, le levain et les gènes - Un essai sur l'évolution.*

Pierre Micheletti : *0,03 % - Pour une transformation du mouvement humanitaire international.*

Collection Chemins faisant

François Lupu : *L'équation, une vie d'une rive à l'autre.*

Pierre Micheletti : *Une mémoire d'Indiens.*

Joseph Périgot : *Le crépuscule des éditeurs.*

Daniel Nahon : *Dernière lettre à Irène.*

Collection La mescla

Miquèu Montanaro et Réka Fekete – Correspondance : *Un vélo dans les arbres.*

Jean-Loup Dariel – Roman : *Célestin de l'Étang.*

Bernard Loyer – Roman : *L'hiverne.*

Jean-Pierre Vaissaire – Roman-conte : *Chaconne.*

Raymond Jardin – Roman : *La guerre des moissons, tome 1 : L'Ardente et la Routière.*

Raymond Jardin – Roman : *La guerre des moissons, tome 2 : Les marins des hautes terres.*

Éric Schulthess – Recueil : *Marseille rouge sangs.*

Jack Meurant – Roman : *Prettye un amour envolé.*

Jean-Pierre Védrières – Conte : *Jean le roux.*

Éric Schulthess – Conte : *En attendant la pluie.*

Félix Chabaud : *Pour l'exemple.*

Violaine Warin – Contes : *Un gecko dans la calebasse et autres histoires extraordinaires.*

Barney Vaucher – Polar : *Meurtre au Verdon.*

Barney Vaucher – Polar : *À bas les masques.*

Jack Meurant – Biographie : *Commissaire Laviollette, alias Modeste Clarisse*

Pierre Souhaitée – Roman historique : *Le prix de la liberté.*

Daniel Picard – Roman historique : *Moi, Ambroise Paré.*

Raymond Jardin – Roman : *Le jour maudit.*

Violaine Warin – Contes : *Le cadeau de l'amant et autres contes d'amour.*

Jack Meurant – Roman : *Ravine*

Roger Mourier – Contes : *Bois d'aubaine et autres Têtes de mule.*

Éric Schulthess – Récit : *Il s'appelait Alphonse Richard, le premier Dignois tué à la Grande Guerre.*

Pierre Veranese – Conte philosophique : *Déclaration des Droits de l'Âme insoumise et joyeuse.*

Félix Chabaud : *Majid - Le chemin d'Azza.*

Olivier Soria : *La chèvre de Monsieur Créatin : Les frasques écologiques de l'être humain racontées par un olivier.*

Collection Biface

Daniel Daumàs – Livre : *Tessons de vie/Tròçs de vidas.*

Jean-David Gallet – Livre-CdRom : *Dans le secret de la nuit.*

Daniel Daumàs – Disque-livre : *Contra Suberna/A contre-courant.*

Alain Billy – Livre : *Les Amandes.*

Daniel Daumàs – Contes de la Provence d'en haut : *L'attrape soleil/L'aganta soléu.*

Lieutenant Vallier/Claude et Jean-Michel Sivirine – Livre : *Le cahier rouge du maquis/L'homme boussole.*

Collection Angle de vie

Yannick Bernier : *Ma Patagonie !*

Parc naturel régional du Verdon : *L'almanach - Ces petits ruisseaux qui font le Verdon.*

Collection Pourquoi ?

Sagault - Jutta Ash : *La marmotte qui ne voulait pas siffler.*

Myriam Benois : *Grise Mine.*

René Frégni - Jutta Ash : *L'étrange Noël de Léa.*

Florence et Patrick Lanéelle – Livre-disque : *Djamil, le crocodile qui perdit ses dents.*

Marie Clauwaert et Éva Schlunke : *Xal, le lézard, donne sa langue au sorcier.*

Sagault - Jutta Ash : *Le gros petit loup.*

Marie-Pierre Aiello : *Olympe, une graine, un bébé, ou l'histoire d'une naissance médicalement assistée.*

Collection Globe

Marie-Pierre Aiello et Olivier Bauza - Livre-disque : *Les chants kanak du papayer.*

Bande dessinée

Mandragore et Laetitia Rouxel : *L'homme semence*, en coédition avec les éditions de l'Œuf.

Hors collection

Sébastien Authemayou et Marielle Gars, Duo Intermezzo - Livre-disque : *Astor Piazzolla - Libertad.*

Rencontres avec des auteurs,
points de vue de libraires, de lecteurs...
découvrez nos ouvrages avec
nos livrets interactifs sur :
parolesautourdunlivre.com

© 2021, Éditions Parole
Groupe AlterMondo 83500 La Seyne-sur-Mer
Courriel : contact@editionsparole.fr
Suivi commande : commande@editionsparole.fr
www.editions-parole.net
Tous droits réservés pour tous pays

ISSN : 2728-1736
ISBN : 978-2-37586-092-2
Dépôt légal : mars 2021

Maquette et illustration couverture : Mireille Roddier
Maquette et mise en page : &com - éditions Parole

Imprimé et façonné par
Yenooa 13640 La Roque-d'Anthéron - France



En France, un livre a le même prix partout.
Depuis 1981, C'est le « prix unique du livre ».
En librairie, en grande surface ou en ligne,
tous les commerçants doivent le respecter.
Si vous payez moins cher, c'est que le livre est d'occasion
ou que votre carte de fidélité vous fait bénéficier
d'une réduction jusqu'à 5 %.
**Les éditions Parole s'engagent aux côtés des libraires
pour préserver et encourager la bibliodiversité.**

curieux par nature

Thermodynamique de l'évolution

Un essai de thermo-bio-sociologie

Ils ne sont pas nombreux les livres qui nous donnent la vie. Celui-ci en est un. Il nous donne la vie parce qu'il va nous permettre d'éclairer l'avenir de l'humanité, si celle-ci veut survivre. Pour son auteur, le savant François Roddier, « Ce livre adresse un message aux générations actuelles et futures. L'Histoire montre que chaque fois qu'une société est en crise, elle cherche des coupables et désigne des boucs émissaires. Ce livre désigne le vrai coupable : les lois de la mécanique statistique contre lesquelles nous sommes individuellement impuissants. Howard Bloom parle d'un principe de Lucifer sans savoir qu'il s'agit des principes fondamentaux de la thermodynamique. Nos souffrances sont dues à l'entropie liée à notre méconnaissance des lois de l'univers. Lorsque ces lois seront universellement reconnues et comprises, cette entropie aura été évacuée. L'humanité sera enfin capable de prendre en charge son destin et d'atténuer ses souffrances. »

Ce livre n'est pas facile à lire. Pourtant, il est génial : il nous donne l'intelligence de comprendre une myriade de choses dont le sens nous échappait. Nous comprenons même de façon intuitive ce que nous ne comprenons pas. C'est jubilatoire.

Certes, on peut continuer à vivre sans avoir lu ce livre qui pourtant ne donne pas de réponses toutes faites. Il faut alors accepter de souffrir en se demandant où va l'humanité. Certes, ce livre fait partie du débat entre savants qu'ils soient physiciens, biologistes ou sociologues. Mais l'avenir de l'humanité appartient à tous et nous avons le devoir de nous mêler de nos affaires. Comme tous les livres qui nous donnent la vie, celui-ci exige une petite révolution qui dérange les habitudes, les certitudes, les aveuglements, les chapelles. Mais quel bonheur de sortir à la lumière en regardant les choses sous un autre angle.

Après quatre éditions dans la collection « Le temps d'apprendre », ***Thermodynamique de l'évolution poursuit son chemin essentiel à travers le monde*** et fait peau neuve dans la collection « Curieux par nature ».



François Roddier est né en 1936. Astrophysicien, il est connu de tous les astronomes pour ses travaux qui ont permis de compenser l'effet des turbulences atmosphériques lors de l'observation des astres. Après avoir créé le département d'astrophysique de l'université de Nice, c'est aux États-Unis, au National Optical Astronomy Observatory (Tucson, Arizona) puis à l'Institute for Astrophysics de l'Université d'Hawaii, qu'il participe au développement des systèmes d'optique adaptative qui équipent désormais les grands outils d'observation comme le télescope CFHT (Canada-France-Hawaii), ou le télescope japonais Subaru tous deux situés à Hawaii, et les télescopes de l'ESO (European Southern Observatory), l'observatoire européen austral situé au Chili. Savant toujours curieux, il s'intéresse aux aspects thermodynamiques de l'évolution.



9 782375 860922

19 €

01 UN LIVRE A
LE MÊME PRIX
PARTOUT

éditions
parole

www.editionsparole.fr

Retrouvez François Roddier sur son blog : www.francois-roddier.fr