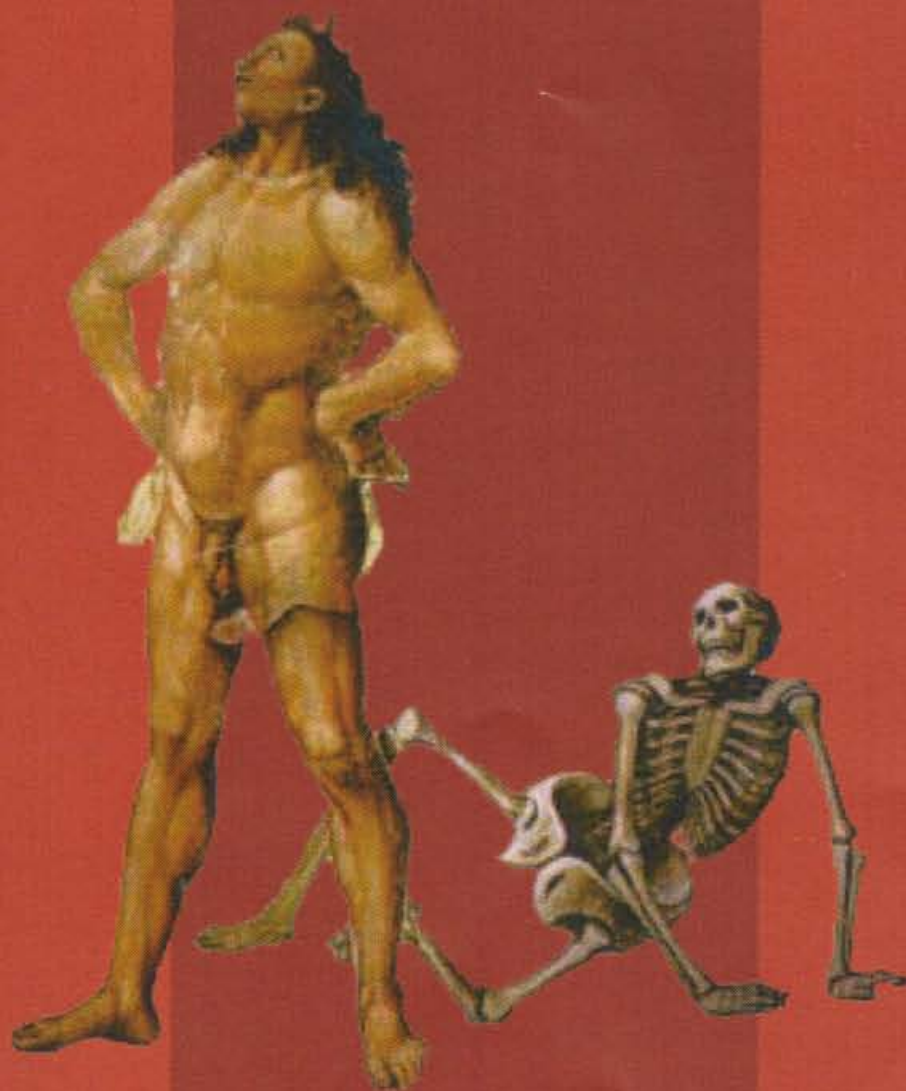


LE MIROIR
DES SAVANTS



JEAN-PIERRE AUBIN

LA MORT DU DEVIN, L'ÉMERGENCE DU DÉMIURGE



ESSAI SUR LA CONTINGENCE, LA VIABILITÉ
ET L'INERTIE DES SYSTÈMES



BEAUCHESNE

Du même auteur

1. *Approximation of Elliptic Boundary-Value Problems* (1972), Wiley-Interscience
2. *Applied Abstract Analysis* (1977), Wiley-Interscience
3. *Applied Functional Analysis* (1979), Wiley-Interscience, seconde édition, 1999 (version française : *Analyse fonctionnelle appliquée*, tomes 1 et 2. [1987], Presses Universitaires de France)
4. *Mathematical Methods of Game and Economic Theory* (1979), North-Holland, seconde édition, 1982
5. *Méthodes explicites de l'optimisation* (1982), Dunod (traduction anglaise : *Explicit Methods of Optimization*, Dunod, 1985)
6. *L'Analyse non linéaire et ses motivations économiques* (1983), Masson (version anglaise : *Optima and Equilibria*, Springer Verlag, 1993, seconde édition, 1998)
7. *Differential Inclusions. Set-Valued Maps and Differential Inclusions* [en collaboration avec A. Cellina] (1984), Springer Verlag
8. *Applied Nonlinear Analysis* [en collaboration avec I. Ekeland] (1984), Wiley-Interscience
9. *Exercices d'analyse non linéaire* (1987), Masson
10. *Set-Valued Analysis* [en collaboration avec H. Frankowska] (1990), Birkhäuser
11. *Viability Theory* (1991), Birkhäuser
12. *Initiation à l'analyse appliquée* (1994), Masson
13. *Neural Networks and Qualitative Physics. A Viability Approach* (1996), Cambridge University Press
14. *Dynamic Economic Theory. A Viability Approach* (1997), Springer Verlag
15. *Mutational and Morphological Analysis. Tools for Shape Regulation and Morphogenesis* (1999), Birkhäuser
16. *Viability Theory. Regulation of Uncertain Systems* [en collaboration avec A. Bayen et P. Saint-Pierre] (2010), Springer Verlag
17. *Restoring Viability in Control and Tychastic Systems* (en préparation)

Jean-Pierre AUBIN

La mort du devin,
l'émergence du démiurge

Essai sur la contingence, la viabilité
et l'inertie des systèmes

*Ouvrage publié avec le concours du
Centre national du livre*

BEAUCHESNE

À la mémoire de mes trois « consciences »

Jacques-Louis Lions, Pierre Tabatoni et Laurent Schwartz,

ce livre que je lègue à mes enfants

Henri-Jean, Anne-Laure, Marc et Pierre-Cyril
et à mes petits-enfants

Lola, Théo, Ludovic, Louis, Victor, Thibaut,
Alice, Ulysse, Jules et Léonard.

Avant-propos

« Peut-être notre terre, peut-être l'humanité arriveront-elles à un but ignoré qu'elles se seront créé à elles-mêmes. Nulle main ne nous dirige, nul œil ne voit pour nous ; le gouvernail est brisé depuis longtemps, ou plutôt, il n'y en a jamais eu, il est à faire : c'est une grande tâche, et c'est notre tâche. »

Jean-Marie Guyau,
Esquisse d'une morale sans obligation ni sanction

Formés d'êtres vivants, nombre d'organismes biologiques, économiques, sociaux et culturels partagent des traits communs malgré la disparité de leurs éléments. Il faut alors s'attendre à ce qu'ils partagent également quelques propriétés de leur mode d'évolution. Divulguer certaines de ces propriétés découvertes à ce jour à l'aide de métaphores mathématiques est le propos de cet essai.

Les régulons

Un premier trait commun est le regroupement des variables descriptives des êtres vivants en deux catégories, *états* et *régulons*, qui jouent des rôles différents dans leur évolution. Ces deux termes ont été choisis arbitrairement (le terme *régulon* figure dans le [294, *Dictionnaire culturel en langue française*]), en leur donnant un sens spécifique et restrictif :

1. les *états* sont les « manières d'être » de certaines variables, tels les *organismes* en biologie, les *biens économiques* en économie, les *comportements* des individus en sociologie, les « *états cognitifs* » en sciences cognitives ;
2. les *régulons* sont par exemple les *gènes* en biologie, les *prix* et autres

biens fiduciaires (comme la monnaie) en économie, les *régulons socio-culturels* en sociologie et les *régulons cognitifs* en sciences cognitives.

1 L'état et le régulon. La différence entre *états* et *régulons* réside en ceci : on connaît les *acteurs* qui agissent sur les états, *il n'existe pas de consensus*^{119–156} *sur la nature de « ceux » qui régissent l'évolution des régulons.* Je fais l'hypothèse que *les états évoluent en fonction de régulons.* J'appellerai « *devin* » le prototype des acteurs qui agissent sur les états du système, « *démiurge* » celui qui représente ces mystérieux mécanismes « régulant » l'évolution à l'aide de régulons. Le titre l'annonce : il s'agit d'étudier et de comparer les modes de fonctionnement de ces deux prototypes, surtout, de celui du démiurge, qui constitue l'originalité de cet essai. *Viabilité, contingence* et *inertie* sont proposées comme mieux appropriées à l'évolution du vivant que l'optimisation intertemporelle à laquelle on a le plus souvent recours.

L'optimisation intertemporelle, version formelle de la téléologie, requiert du devin

1. la possibilité de piloter le système et, pour cela, d'avoir accès à ses commandes ;
2. la connaissance de l'avenir ;
3. le recours à un critère d'optimisation ou d'un objectif à atteindre ;
4. l'exclusion de la correction au cours du temps des décisions prises à l'instant initial.

Dans le cadre des systèmes qui ne sont pas conçus par des cerveaux humains, *il vaut mieux prendre à un moment opportun des décisions viables que des décisions optimales prises à contretemps.* Quand, comment et où décider de ce moment propice est une des questions que pose ce livre.

Cette entrée en matière est brutale, à la manière des mathématiciens qui commencent leurs exposés par des définitions précises avant de les motiver, de les justifier ou de les appliquer. C'est ce à quoi je m'emploierai.

2 Que faire ? Un système évolutionnaire est *déterministe* si, de tout état initial de l'environnement, part une et une seule évolution régie par ce système, et *non déterministe* ou *incertain* dans le cas contraire. Dans ce dernier cas, il nous faut *découvrir comment* les régulons « rétroagissent » sur les états (agissent à leur tour, en retour). Pour répondre à cette question, j'introduis :

1. un moteur d'évolution *non déterministe* (« contingent ») régissant plusieurs évolutions possibles des états en fonction de l'évolution des régulons,

2. parmi lesquelles choisir celles qui s'adaptent à des *contraintes de viabilité* nécessaires à leur survie.

Le « *moteur* » *métabolique*^{300–467} de la vie utilise en dernière analyse l'énergie solaire pour *fabriquer* des acides nucléiques ordonnant la synthèse des protéines. Celles-ci communiquent et complotent entre elles pour inciter les acides nucléiques à fabriquer d'autres protéines qui, à leur tour, contribuent à la duplication des acides nucléiques. Molécules, cellules, organes, organismes se sont *organisés* pour entretenir, maintenir, alimenter et nourrir le *métabolisme* à chacun des niveaux de leur *organisation*. Ils consomment pour cela des ressources et de l'énergie, produisent des déchets, afin de *vivre* et d'assurer leur reproduction pour *prolonger la vie* au-delà de la leur. Au niveau des sociétés, le moteur métabolique induit les comportements cognitifs, sociaux et économiques des êtres humains. Pour résumer, les états sont soumis à des contraintes de viabilité auxquelles ils doivent s'adapter sous peine de mort.

3 Exemples.

<i>Domaine</i>	<i>États</i>	<i>Régulons</i>	<i>Viabilité</i>	<i>Acteurs</i>
<i>Biologie</i>	organismes	gènes	viabilité ou homéostasie	biochimie métabolisme
<i>Économie</i>	biens économiques	prix et monnaie	rareté économique	agents économiques
<i>Sociologie</i>	comportements	régulons socioculturels	sociabilité	individus
<i>Sciences cognitives</i>	états cognitifs	régulons cognitifs	adaptabilité	organismes

Puisque les régulons évoluent eux aussi, la question se pose en effet de savoir « *qui* » *régit leur évolution et surtout comment*. Je ne sais pas *qui* gouverne les régulons, ni *pourquoi*, mais je tenterai d'expliquer *comment* ils opèrent pour adapter l'évolution des organismes à leur environnement défini par des contraintes de viabilité.

Nombreux sont pourtant les candidats imaginaires à prétendre à la fonction d'omniscient pilote de régulons : dieux et divinités, diables et démons, créés à leur image, mais en négatif, si nombreux qu'il est impossible de les citer tous (Abigor, Amon, Bélial, Belphégor, Belzébuth... pour ne citer que les premiers démons de l'annuaire judéo-chrétien), virils Incubes et charmantes Succubes, Anges gardiens ou Anges déchus, Archanges, Séraphins et Chérubins, Éons, Archontes, Astres, Devins, Pythie, Sybilles, Auspices, Augures,

Fées, Lutins, Génies, Totems, Fétiches, Lares, Mânes, Pénates, Djinns, Idées platoniciennes, Mercure des alchimistes et des hermétiques, le Pneuma des gnostiques, feu le Phlogistique (substance fluide et volatile pour expliquer le feu), Éther (immuable substance constitutive des astres dont la signification a évolué depuis *Aristote*), Élan vital bergsonien, talentueux Horloger de *Paley*, « Marché », le dernier devin à la mode, Main invisible^{232–398} d'*Adam Smith*, Prophètes, Providence, *Weltgeist* hégélien, sens de l'Histoire, Masses, Physicalisme d'*Otto Neurath*, Âmes, Esprits, Monades, Homuncules, Libido freudienne, Anima jungienne, Hasard, Fortune, Destin, et j'en oublie.

La liste est longue de ces devins peuplant le *Pandémonium*, capitale de l'enfer qu'imagina *John Milton*, et loin d'être exhaustive. On ne bride pas la poésie et le lyrisme, l'invention féérique pour donner un sens à un monde qui en est tellement privé. Quand on voit tant d'hommes parmi les plus intelligents et les plus profonds user de leur talent pour défendre tel ou tel de ces êtres imaginaires, on peut en conclure que leur affaire est bien mauvaise pour rechercher des avocats si talentueux.

Le cerveau humain, émerveillé de ses prouesses de créateur, ressent de fortes réticences à ne pas concevoir que l'évolution du monde soit elle aussi pilotée par des êtres conçus à sa propre image, en vue de buts mystérieux qu'il s'agit de déceler, supposés bénéfiques, sur une route semée d'embûches qui, elles, ne sont que trop réelles. Nous ressemblant comme des frères idéaux, auxquels nous ôtons nos faiblesses et que nous dotons de dons qui nous font cruellement défaut, ces entités surnaturelles ne peuvent qu'être supposées « surrationnelles ». Comme les parents qui reportent sur leurs enfants les missions qu'ils n'ont pu eux-mêmes accomplir, les hommes confient à leurs enfants imaginaires les pouvoirs dont ils rêvent, se défaussant en quelque sorte de leur impuissance à agir eux-mêmes sur le monde. La tentation est forte de personnaliser la « Nature ». *D'Holbach*^{57–77} avait évité le piège en 1770 dans son [173, *Système de la nature*] :

4 D'Holbach. « [...] lorsque je dis que la nature produit un effet, je ne prétends point personnifier cette nature, qui est un être abstrait, mais j'entends que l'effet dont je parle est le résultat nécessaire des propriétés de quelques uns des êtres qui composent le grand ensemble que nous voyons. »

Pourtant, même *Voltaire* avait des difficultés avec l'existence de tels auteurs : « *L'univers m'embarrasse, et je ne puis songer que cette horloge existe et n'ait point d'horloger* », de sorte qu'il n'a rejoint dans leur athéisme ni *Julien de la Mettrie* (auteur de [245, *L'homme-machine*]), ni *Claude Adrien Helvétius*^{384–601}, ni *d'Holbach* qui écrivait à ce sujet :

5 D'Holbach. « *Que l'homme cesse donc de chercher hors du monde qu'il habite des êtres qui lui procurent un bonheur que la nature lui refuse : qu'il étudie cette nature, qu'il apprenne ses lois, qu'il contemple son énergie et la façon immuable dont elle agit ; qu'il applique ses découvertes à sa propre félicité, et qu'il se soumette en silence à des lois auxquelles rien ne peut le soustraire ; qu'il consente à ignorer les causes entourées pour lui d'un voile impénétrable ; qu'il subisse sans murmurer les arrêts d'une force universelle qui ne peut revenir sur ses pas, ou qui jamais ne peut s'écarter des règles que son essence lui impose.* »

La perfection d'un œil était pour *Paley* l'argument majeur de l'existence d'un Maître Horloger. Qui sait, par exemple, si, en identifiant de nos jours le « Marché » à un acteur — sinon à une divinité —, on ne va pas, au-delà d'une simple formule rhétorique, observer à l'aide de verres déformants le fonctionnement complexe de la régulation économique ?

Le devin

C'est de façon tout arbitraire que je qualifierai de *devin* tout acteur *inventé* par les hommes pour agir sur les régulons¹⁻¹⁶ en fonction d'objectifs. Ce *devin* sera en quelque sorte *le prototype de tous ces êtres imaginaires* pour agir sur les régulons qu'ils observent.

Contrairement aux acteurs gouvernant ou ayant barre sur l'évolution d'organismes proprement identifiés, observés, testés, personne n'a rencontré aucune de ces fantomatiques créatures, même si, par pure provocation, certains le proclament péremptoirement. « *Il n'y a rien de si beau que ce qui n'existe pas* », écrivait *Jean-Jacques Rousseau*, repris par *Paul Valéry*. Il est futile et vain de tenter de démontrer que ces devins n'existent pas.

Les disputes théologiques, idéologiques et philosophiques sur l'existence et la nature de ces devins sont d'autant plus intenses, violentes et trop souvent criminelles qu'aucune expérience ne permet de prouver leur existence. L'acharnement mis à les défendre est inversement proportionnel à leur caractère expérimental. « *On n'a recours aux invectives que quand on manque de preuves* », écrivait *Denis Diderot* dans ses [106, *Pensées philosophiques*]. On ne tue pas au nom de la science, mais on torture, massacre, brûle au nom des croyances.

L'Inquisition ne se mêle pas de questions scientifiques et expérimentales, la guépéou traquera le moindre soupçon de révisionnisme dans les cachots de la Loubianka, emprisonnera un *Vavilov* coupable de ne pas s'incliner devant les injonctions d'un *Lyssenko* dont la stalinolâtrie le disputait à la médiocrité. Que de crimes commis pour débusquer l'hérésie, d'autant plus cruels que le coupable

est proche de la vraie foi^{172–271}, que le révisionnisme s'ajoute à l'hérésie, que les fantasmes sexuels se mêlent au prétendu sacré. Pauvre sorcière chère à la compassion de *Jules Michelet* ! Fallait-il, pour que l'histoire la retienne, que la première mathématicienne connue, *Hypatie*, fille du mathématicien Théon, qui prit la tête de l'école des platoniciens à Alexandrie, fût enlevée de son char, déshabillée, torturée à l'aide de coquilles d'huître aiguisées et brûlée vive en 415 par le fanatisme tout neuf des chrétiens prenant le pouvoir sous la direction de l'évêque Cyrille ?

Quels trésors d'arguties théologiques, quelles prouesses dialectiques ont été déployés pour justifier de si nombreux aveux de *culpabilité objective*. Moins est enraciné dans la perception du monde un imaginaire collectif, plus sévères et criminels sont les moyens de l'imposer, plus élaborés sont les prétextes inventés pour le justifier.

Mais alors, serait-il possible que ces devins n'existent pas ailleurs que dans notre imagination (la *maya*, l'*illusion* que les enseignements védiques tiennent pour être l'essence des phénomènes) qui, après tout, crée en quelque sorte la réalité ?

La mort du devin

A-t-on vraiment besoin d'un devin, prototype de ces acteurs mythiques guidant les évolutions des régulons de concert avec les véritables acteurs pilotant les états d'un organisme ?

C'est en justifiant mathématiquement une réponse négative à cette première question que va commencer cette histoire. Si l'on admet que les moteurs d'évolution dépendent de régulons, il y a par conséquent autant d'évolutions potentielles que de régulons disponibles. Il s'agit dès lors d'expliquer, sans invoquer de devins, rusant avec les dieux et les forces qui régissent notre destin, comment à *chaque instant* est choisi un régulon et, par conséquent, comment s'implante une évolution particulière.

Mais alors, s'il n'y a plus de devins, il devient *impossible de prévoir* et ensuite *de prédire l'évolution future*, laissant ainsi la place à un hasard contingent nécessaire à la *nécessité*^{455–666} qui la bride. La science s'est donné pour mission de traquer cette incertitude qu'il s'agira de réduire à une liberté d'évolution qu'il s'agira d'appivoiser par la nécessité, sans pouvoir l'éradiquer à coup sûr. La liberté des organismes est une *liberté surveillée* par des *contraintes de viabilité*.

En effet, ces organismes, en évoluant, modifient leur environnement, consommant des ressources rares, produisant des déchets. Ces organismes doivent donc *s'adapter* constamment à leur *environnement* défini par des

contraintes de viabilité, au risque de mourir, de disparaître en tant que tel lorsque ces contraintes sont violées.

« *La vie*, écrivait *Claude Bernard* en 1898, *est le résultat du contact de l'organisme et du milieu, [...] nous ne pouvons la comprendre avec l'organisme seul, pas plus qu'avec le milieu seul.* » Les organismes vivants « luttent » pour rester en vie en maintenant la « *fixité du milieu intérieur* », principe que *Claude Bernard* énonça en 1854, baptisé sous le nom d'*homéostasie*⁷⁵⁻⁹⁸ par *Walter Cannon* en 1915, pour permettre à l'organisme de fonctionner en maintenant à leur niveau les diverses composantes du *métabolisme*³⁰⁰⁻⁴⁶⁷. Les biologistes décrivent par *épigenèse*³¹²⁻⁴⁸⁹ l'évolution de l'organisme qui résulte de l'interaction des gènes et de l'environnement. Les organismes économiques mobilisent leurs forces productives et leurs réseaux de distribution pour accroître l'ensemble des ressources disponibles, les groupes sociaux organisent leurs forces de police, leurs armées, leurs services diplomatiques pour garantir un niveau minimum de paix et de sécurité, les systèmes nerveux ne cessent de perfectionner leurs connaissances sans lesquelles les organismes qu'ils commandent ne pourraient plus s'adapter aux contraintes culturelles, la biodiversité accroît le nombre d'espèces disponibles pour faire face aux caprices de l'environnement, etc. À tous les niveaux des systèmes du vivant, l'éventail des possibilités « contingentes » se déploie pour accroître la redondance alimentant un hasard contingent⁴⁰⁰⁻⁶¹⁵, redondance d'autant plus grande qu'elle doit faire face à une autre forme de hasard, le hasard « tychastique⁴³⁴⁻⁶⁴⁹ ». Cette redondance n'est autre qu'une « assurance sur la vie » sur la planète, et donc, d'un point de vue anthropomorphique, assurance sur la survie de l'espèce humaine. Les contraintes de viabilité restreignent ainsi les possibilités d'évolution et même, dans certains cas, excluent la possibilité d'*évolutions viables* (c'est-à-dire d'évolutions obéissant à chaque instant aux contraintes de viabilité).

L'adaptation à ces contraintes est un des traits communs à toutes les versions du darwinisme qui tentent d'*expliquer* l'évolution des *espèces biologiques*³¹⁹⁻⁵⁰⁰ par sélection des caractères des organismes (appelés *phénotypes*³¹³⁻⁴⁸⁹) et non par instruction directe des *gènes*³¹⁵⁻⁴⁹¹. Une des motivations principales de la théorie de la viabilité a été de conforter ce point de vue darwinien par des *métaphores mathématiques*, dont il appartient aux biologistes d'évaluer le degré de validité.

La *première tâche* de la théorie mathématique de la viabilité, qui est le thème principal des pages qui suivent, est de reconnaître le cas où les contraintes de viabilité permettent l'existence d'évolutions viables, c'est-à-dire d'évolutions qui respectent ces contraintes à chaque instant. Il s'agit de déterminer si le moteur d'évolution, d'une part, et des contraintes de viabilité, d'autre part, sont

compatibles au sens où *en tout état initial commence au moins une évolution viable*.

Lorsque les moteurs d'évolution ainsi confrontés aux contraintes de viabilité sont compatibles, un *deuxième objectif* est de découvrir *comment* les régulons sont modifiés pour produire des évolutions viables. Autrement dit, il s'agit de *révéler* les *rétroactions*³⁹⁻⁶⁰ (ou feedbacks), ces « causes à rebours » qui *associent à tout état au moins un régulon* pour maintenir la viabilité, de les dégager de la gangue qui les soustrait à notre observation immédiate, de briser le moule qui cèle le bronze du sculpteur. En fait, on pourra « calculer », combiner, agencer et enchaîner ces *rétroactions*³⁹⁻⁶⁰ en fonction du moteur d'évolution et des contraintes de viabilité. Le concept de *rétroaction* joue un rôle central dans toutes les versions de l'analyse des systèmes, car toute cause a non seulement un effet, mais *celui-ci rétroagit sur la cause*, si bien que *les relations causales sont à double sens*.

La reconnaissance de ce concept de *rétroaction* a fait le succès de la *théorie des systèmes* et de la *cybernétique* de *Norbert Wiener*, en permettant de surmonter l'absence de relations directes de causes à effets, lorsque ces derniers ont le mauvais goût de *rétroagir* sur les causes. Le terme de *système* est particulièrement polysémique, et impossible à définir, sauf à l'accompagner d'un adjectif pour le qualifier précisément. Sans qualificatif qui lui soit adjoind, j'utiliserai le mot « système » en un sens vague d'assemblage :

6 Système. Le mot système, du grec « *sustêma* », assemblage, est apparu en 1644 dans le *Système de l'âme* de *Marin Cureau de la Chambre*, médecin de *Louis XIV*, puis fut notamment utilisé par *Vauban* pour baptiser son projet de *Dixme Royale* en 1706 (condamné par *Louis XIV* malgré tant de services rendus), et en 1719 pour celui de *John Law* (1671-1729) avec la fortune que l'on sait. Sans oublier les merveilleux ouvrages de *Holbach*⁵⁷⁻⁷⁷, [173, *Système de la nature*] et [175, *Système social*], et de *Condillac*, [75, *Traité des systèmes*]. Cet ouvrage débute par cette définition : « *Un système n'est autre chose que la disposition des différentes parties d'un art ou d'une science dans un ordre où elles se soutiennent toutes mutuellement, et où les dernières s'expliquent par les premières [...] qui rendent raison des autres.* »

Mais très souvent, ces *rétroactions*³⁹⁻⁶⁰, une fois dégagées dans l'analyse d'un système, sont posées comme *primitives*, comme points de départ, dans l'analyse de questions à élucider. Ici, ces *rétroactions* seront des *réponses* à des questions posées, des phénomènes *dérivés*, des points d'arrivée ou, plutôt, de transit.

On conçoit alors que, pour assurer la possibilité de la sélection, la *redondance*³²⁻⁵⁵ des régulons constitue le réservoir du moteur de l'évolution. À de très nombreux niveaux, les organismes vivants ont effectivement cette

tendance à multiplier les solutions possibles afin de permettre de choisir, d'éliminer les régulons qui ne sont pas viables lors de la confrontation du moteur d'évolution avec l'environnement. Nombreux sont les exemples de gaspillage apparent, de *redondance*³²⁻⁵⁵ croissante, d'investissement dans la flexibilité qui s'opposent à la tendance de notre cerveau à chercher un ou des critères « utilitaires » que la nature tenterait d'optimiser. Pour apprendre à s'adapter, les organismes doivent se *structurer de façon lamarckienne*⁶¹¹⁻⁷⁸⁵, et pour se structurer, *doivent d'abord accroître leur redondance*³²⁻⁵⁵ et ensuite, *éliminer, de façon darwinienne*.

La connaissance de ces rétroactions, qui très souvent ne sont pas déterministes, permet d'expliquer — et éventuellement, de corriger — les nombreux effets pervers, paradoxaux ou inattendus. Ceux-ci sont souvent causés par des raisonnements statiques ignorant les moteurs d'évolution, cherchant désespérément des *équilibres*⁴⁵³⁻⁶⁶³ là où il ne peut en exister, *des décisions optimales plutôt que des décisions prises à temps*. Ils peuvent résulter d'une optimisation de critères *intertemporels* là où la myopie des acteurs permet au mieux des optimisations *instantanées*, remises en cause à chaque instant.

Si un certain jeu de contraintes de viabilité n'est pas viable, une troisième tâche est de déterminer le *noyau de viabilité*⁴⁵⁶⁻⁶⁶⁸ de l'environnement que ces contraintes définissent : c'est par définition *l'ensemble des conditions initiales à partir desquelles part au moins une évolution viable*. En d'autres termes, en dehors du noyau de viabilité, *toutes les évolutions violent les contraintes en temps fini*. Le *noyau de viabilité* s'est avéré être le concept le plus important de la théorie de la viabilité et un outil mathématique des plus efficaces : il contient toutes les informations importantes, les *équilibres*⁴⁵³⁻⁶⁶³ (évolutions qui... n'évoluent pas) viables, les trajectoires que parcourent les *évolutions périodiques*³⁹³⁻⁶⁰⁶ viables, les attracteurs vers lesquels convergent les évolutions viables lorsque le temps devient infiniment grand, etc. De plus, de nombreux concepts mathématiques sont des noyaux de viabilité bien cachés, qui héritent donc des propriétés de ces derniers.

Mais au lieu de se restreindre au *noyau de viabilité*⁴⁵⁶⁻⁶⁶⁸ d'un environnement, la question se pose de savoir comment rétablir la viabilité d'un environnement. Plusieurs pistes peuvent être suivies. La première est de corriger ou de modifier le moteur d'évolution. La théorie des multiplicateurs de viabilité exposée à la section 11.8, p. 775, a été conçue pour cela, et propose une méthode systématique de trouver des régulons et la façon de les incorporer pour rendre viables des contraintes. Une autre méthode consiste à corriger le moteur d'évolution par des connexions entre les composantes du moteur d'évolution, pouvant expliquer l'émergence du connexionnisme dans les sciences du vivant et de la structuration lamarckienne qui font l'objet des sections 1.9, p. 93, et 1.10, p. 96.

Une autre solution est de faire évoluer l'environnement, et non seulement l'état du système. Ce sera possible grâce aux équations morphologiques exposées à la section 12.2, p. 802. Il reste bien d'autres pistes à défricher.

L'émergence du demiurge

Toutefois, l'incertitude pesant sur l'évolution future peut être réduite lorsque le *principe d'inertie*^{514–704} entre en jeu : ce principe énonce que *les régulons n'évoluent que lorsque la viabilité est en danger*.

En effet, le devin disparu, plus personne n'est là pour agir sur les régulons, de sorte qu'il n'y a aucune raison de les changer. Ces régulons, *gènes*^{315–491}, *prix*, *régulons culturels* et *concepts* dans les exemples cités, laissés à eux-mêmes, auront donc tendance à demeurer constants la plupart du temps, ce qui n'interdit pas aux états d'évoluer. La *niche de viabilité* d'un régulon est l'ensemble des états de l'environnement qui sont régulés par ce régulon maintenu constant : partant de la niche de viabilité d'un régulon, au moins une évolution peut (mais ne doit pas) évoluer dans cette niche en conservant le régulon initial. Partant en dehors de la niche de viabilité d'un régulon, le régulon devra être changé lorsque l'état violera en temps fini les contraintes de viabilité.

En respectant le *principe d'inertie*^{514–704}, les régulons ne se mettent en mouvement que lorsque advient une « crise de viabilité », et ce, jusqu'à ce que la viabilité soit rétablie et « stabilisée ».

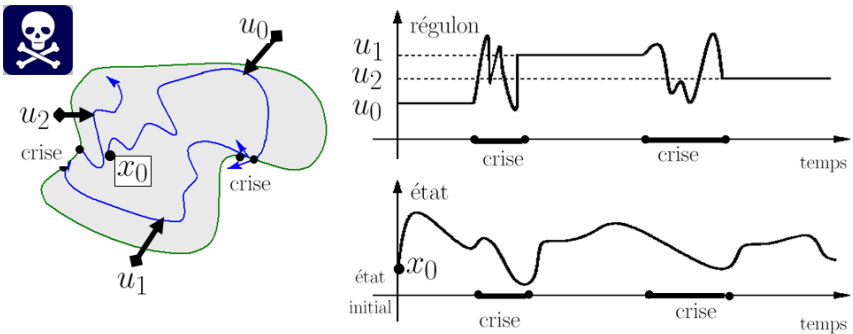
Le principe d'inertie *explique* ainsi le phénomène d'*équilibre intermittent* (*punctuated equilibrium*) introduit en 1972 par Nils Eldredge et Stephen Gould en paléontologie pour décrire les discontinuités des témoignages de l'évolution des *espèces*^{319–500} qui n'étaient pas prévues par les successeurs de Darwin^{287–453}, mais qui, depuis, se sont révélées manifestes.

7 Équilibre ponctué. Une évolution des *espèces biologiques*^{319–500} est en *équilibre ponctué*^{7–24} (ou simplement, *ponctué*, ou encore un *équilibre intermittent*, pour traduire l'anglais *punctuated equilibrium*) lorsqu'elle alterne des phases d'évolution lente sur de longues durées de temps et de révolutions rapides sur des durées de temps beaucoup plus brèves pendant lesquelles de nouvelles *espèces*^{319–500} apparaissent.

Comme le souligne le biomathématicien Jim Murray, Darwin avait pourtant ajouté à la fin du chapitre 11 de la sixième édition de [88, *L'Origine des espèces*] cette phrase anticipant le concept d'*évolution ponctué*^{7–24} qui ne figurait pas dans les éditions précédentes :

8 Darwin. « Les périodes durant lesquelles les espèces ont subi des modifications, bien que fort longues mesurées en années, ont probablement été courtes en comparaison des périodes durant lesquelles ces mêmes espèces sont restées sans aucun changement. »

Cela ne suffit pas encore à réduire complètement l’incertitude : il faut découvrir des mécanismes qui obéissent à ce principe d’inertie. Le plus simple est celui qui consiste à *choisir parmi tous les régulons viables celui qui a la plus petite vitesse*, le plus paresseux. Les évolutions viables correspondantes seront qualifiées de *lourdes*. Elles ont la propriété d’*accrocher* (*lock-in* en anglais) la niche de viabilité d’un régulon : lorsque l’évolution lourde d’un état le conduit dans la niche de viabilité d’un régulon, alors ce dernier peut devenir constant et l’état demeure à jamais dans sa niche.



9 Illustration des évolutions ponctuées. À gauche, le sous-ensemble représente l’environnement en dehors duquel les états ne sont pas viables. La courbe représente la trajectoire^{389–604} de l’évolution partant de l’état initial x_0 . La figure de droite, en haut, décrit le déroulé temporel du régulon, qui est constant aussi longtemps que possible, prenant ici les valeurs u_0 , u_1 et u_2 pendant trois périodes successives, durant lesquelles l’évolution « à régulon constant » est viable, comme indiqué dans la figure de gauche. Lorsqu’elle cesse d’être viable, le régulon doit évoluer pendant une « crise de viabilité » jusqu’au prochain instant où le régulon peut demeurer de nouveau constant en pilotant une évolution viable, et ainsi de suite. L’état, lui, évolue pendant ce temps, comme l’illustre la figure de droite, en bas.

En sélectionnant des évolutions viables lourdes, par exemple, on fait donc émerger de la confrontation d’un moteur d’évolution et des contraintes qui lui sont imposées un mécanisme d’évolution myope, paresseux mais explorateur, conservateur mais opportuniste.

C’est pour éviter de commettre un autre néologisme (régulon suffit bien) que l’on désignera par *démiurge*, mot grec désignant un humble artisan, ce

procédé de sélection de régulons gouvernant les solutions viables lourdes. Non pas l'ouvrier à qui *Platon* a attribué, par la voix de *Timée*, la responsabilité de transformer le chaos en cosmos : il n'en est pas le créateur, il est encore moins un objet de culte, mais le fabriquant qui doit pour cette tâche se conformer aux plans dressés par les préexistantes Idées. Non plus le descendant de *Sophia* — dieu créateur d'un monde imparfait que la plupart des systèmes gnostiques des premiers siècles de notre ère distinguent d'un Dieu premier transcendant, auteur, lui, d'un Monde idéal. Mais un démiurge chef d'orchestre harmonisant toutes les partitions d'un concert, du concert endocrinien au concert des nations, un démiurge organisateur, maître de l'ordre des choses, responsable des structures.

Le choix de qualifier de démiurge ce mécanisme de sélection n'implique en rien l'intervention d'Idées préexistantes, bien que la tentation soit forte chez de nombreux mathématiciens de céder à la conviction de découvrir ou dévoiler ce qui préexiste plutôt que d'inventer ou de créer du neuf, tant sont puissantes les idées qui semblent « s'imposer d'ailleurs » et tant est aveuglante la clarté qu'elles projettent. Je n'adhère personnellement pas à cette vue, car ces idées ne sont après tout que le produit de cerveaux humains qui eux existent, et qui explorent tout en le construisant un univers culturel. C'est ce qu'avait remarqué *Lamarck*^{283–451}, comme en témoigne cet extrait de son [201, *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres*] :

10 Lamarck. « *J'ai déjà dit que la pensée était un phénomène tout à fait physique, résultant de la fonction d'un organe qui a la faculté d'y donner lieu [...]. Quel est l'homme qui ignore les effets que peut produire sur son individu la vue d'une femme belle et jeune, ainsi que la pensée qui l'a reproduite à son imagination lorsqu'elle n'est plus présente ?* »

Ce qu'il y a de nouveau, c'est que notre démiurge, contrairement à celui de *Platon* et des gnostiques — distingué par une majuscule, comme il se doit — n'est pas donné *a priori* avant que l'environnement existe, n'est pas posé comme un compagnon inséparable et invisible aux ordres des Idées, comme un créateur maladroit (ou mal intentionné, c'est selon). Il est ici *construit, calculé, inhérent* au moteur d'évolution dès lors que lui sont imposées des contraintes de viabilité et est admis le principe d'inertie.

Indéterminisme, viabilité, inertie : ce sont trois clés mathématiques pour penser l'évolution des organismes du vivant. Il n'y a plus besoin de supposer l'existence de devins qui nous révèlent notre destin, d'un élan vital qui régit l'évolution des gènes des espèces, de mains invisibles qui guident les prix, de

Weltgeist qui inspire les régulateurs culturels des sociétés, d'âmes qui distillent nos pensées, qui accaparent notre essence au point de vouloir nous survivre.

Un *démiurge émerge* qui, malgré sa *myopie*, son *opportunisme*, son *conservatisme* et sa *paresse*, ou plutôt, grâce à tous ces « défauts » qui, dans ce cas, se révèlent être des qualités, guide l'évolution en la maintenant en vie, pour la maintenir en vie.

Tout système périra

Tout organisme vivant meurt pour qu'il survive dans sa lignée. [113, *Tout empire périra*], tel est le titre d'un ouvrage de Jean-Baptiste Duroselle paru en 1981, reprenant une citation de *Polybe*. Organismes, empires, aucun n'est indépendant dans un système qui structure les milieux en sous-milieux, les organismes en organes, ceux-ci en cellules, celles-ci en molécules, puis en atomes, etc. dans une structure en poupées russes dont *Lamarck*²⁸³⁻⁴⁵¹ avait souligné la complexité. On conçoit que les contraintes pesant à chaque niveau engendrent des contraintes plus fortes aux niveaux inférieurs. Les respecter exige *à la fois* la disparition de leurs composantes et la possibilité de les renouveler. C'est ainsi que les organismes doivent s'adapter *à court terme* à l'évolution de l'ensemble qu'ils forment même si, en retour, leur évolution retentit sur cet ensemble, mais *à long terme*. Ce mode de régulation par sélection de type darwinien est à l'origine du *principe d'inertie*⁵¹⁴⁻⁷⁰⁴, qui rend *asymétriques les échelles d'inertie, et donc, de temps*.

Le moteur métabolique de l'évolution suggère un *principe d'anticipation*⁶⁴⁹⁻⁸¹² : il ne suffit pas de léguer à notre descendance un environnement qu'on souhaite préserver, il est vital de lui fournir les moyens *d'anticiper son évolution afin de s'y adapter*.

Et pour cela, en ce qui concerne les êtres humains, il leur faut les imaginer. Car nous arrivons à un moment de l'histoire des hommes où c'est notre monde qui est en danger de périr, *puisque, en devenant globales, les contraintes de viabilité se resserrent inexorablement*.

Tant pis si l'image est éculée, mais il faut bien reconnaître que les merveilleuses photographies de Gaïa, cette agate bleue marbrée de blanc et d'ocre sur fond de velours noir, ont contribué à nous faire prendre conscience de la finitude du globe qui nous abrite, qui nous protège. *Il n'y a plus de nouveaux espaces à explorer et à conquérir sur cette planète pour reculer la frontière*⁶⁷⁶⁻⁸³⁷ de viabilité que la croissance démographique et l'épuisement des ressources rapprochent de jour en jour. Les dernières taches blanches des atlas de nos parents ont été coloriées.

C'est nouveau.

Il ne reste guère qu'un espoir, que les progrès¹⁷⁻⁴⁶ de la science et de la

technologie remplacent l'exploration de continents vierges, permettent de desserrer les contraintes qui nous étouffent, *de bâtir de nouveaux mondes culturels, scientifiques et technologiques*, d'envahir les mondes virtuels qui naissent sous nos yeux. La curiosité et l'imagination des hommes qui n'ont cessé jusqu'ici de contribuer à cet enrichissement alimentent un puissant moteur qui peut accroître suffisamment le domaine de viabilité de l'espèce humaine et, partant, des autres *espèces biologiques* encore en vie.

Si l'on en croit le *principe d'inertie*, il est possible que l'humanité s'avère incapable de dévier à temps la folle course qui nous conduit vers la frontière de viabilité pour nous empêcher de la franchir. Car le progrès moral — si toutefois il y a progrès en ce domaine — évolue bien plus lentement que les progrès scientifiques et techniques. La sagesse des nations — trop souvent nourrie de la folie des hommes — est un régulon bien lourd, qui a beaucoup de mal à évoluer, et pas toujours dans le sens du bien et de la vertu.

Cerner la compréhension des mécanismes complexes gouvernant l'évolution de nature darwinienne dans lesquels nous vivons peut nous aider à éviter la catastrophe. À ne pas détruire notre Terre, lentement par épuisement de ressources insuffisamment remplacées, soudainement par un embrasement nucléaire. À ne pas détruire notre espèce en faisant naître des concurrents monstrueux à partir de manipulations génétiques.

Les hommes ont certes acquis récemment le moyen de transformer rapidement leur environnement. Si nous sommes tous des organismes génétiquement modifiés depuis plus de trois milliards d'années, ce le fut avec la majestueuse lenteur des changements exogènes de nature géologique ou climatique. Les cerveaux humains ont cependant ajouté à ces changements ceux qu'ils apportent eux-mêmes, sur une autre *échelle de temps*^{530–721}, ce qui est une indication supplémentaire du rôle de l'inertie qui mesure ces échelles de temps. Les hommes trop pressés refusent de « *donner du temps au temps* » nécessaire aux mécanismes biologiques pour adapter les organismes à leur environnement évoluant *trop rapidement*. L'inertie peut être telle que, lorsque les conséquences sont perçues, il est *trop tard*, l'évolution ayant poursuivi sa route, pour revenir en arrière, à *temps* pour corriger la dynamique. Les organismes que les êtres humains s'approprient, eux, à modifier, ou à créer, pourront-ils avoir le temps de s'adapter ? Les êtres humains ne savent cependant pas comment guider l'évolution biologique dans un sens qui leur convient. Nos contemporains ne seront pas les témoins des conséquences à long terme de leurs interventions. *Après eux, le déluge génétique.*

Les cerveaux humains ne peuvent résister à la tentation de juguler l'évolution en transformant *écologie*^{324–506} et *économie* en vaine recherche d'un *équilibre*^{453–663}. Non seulement cette stratégie est vouée à l'échec, car la vie

évolue depuis plus de trois milliards d'années, mais en forçant une partie des variables du système à rester *stationnaire*^{392–606} dans l'espoir d'éviter la catastrophe, on ne fait que la précipiter, en empêchant les évolutions de s'adapter. *L'enfer environnemental est pavé des meilleures intentions écologiques.*

Reconnaître le principe d'inertie ne revient pas à lui accorder un statut normatif. Le principe d'inertie n'est ni juste ni efficace. *Il est*, et c'est là le drame. Ne pas en tenir compte conduit à coup sûr à des effets pervers. Trop d'apprentis sorciers se sont perdus en l'ignorant.

Sera-t-on capable de le comprendre assez pour le maîtriser, pour que l'intelligence des hommes puisse percevoir à temps les signaux annonçant la proximité des frontières de viabilité, puisse ouvrir des accès aux régulons afin de violer le principe d'inertie et changer les régulons avant l'ultime moment de systèmes que nous avons condamnés à mort ?

Contingence, viabilité et inertie des systèmes

Une fois le « *moteur* » *métabolique*^{300–467} lancé, rien n'a encore pu arrêter cette randonnée vitale. La vie est en permanence créatrice de nouveaux organismes, même si elle n'a pas été créée. Je ne sais ni quand ni pourquoi ce moteur évolutionnaire est apparu. Je ne sais pas quand il s'arrêtera. Je ne sais s'il en existe d'autres ailleurs. Je sais que je n'ai pas les moyens d'y répondre, que ces problèmes ne sont pas bien posés. Nos cerveaux sont ainsi faits qu'ils ne cessent d'interroger le monde. Dès qu'il balbutie, l'enfant de l'homme assaille ses parents de « pourquoi » tout en apprenant les « comment » par imitation, comme nombre de nos cousins du règne animal. Toutes les fois qu'ils ne trouvent pas la réponse par eux-mêmes, les hommes continuent à poser humblement leurs « pourquoi » à des devins créés orgueilleusement à leur image pour ausculter un monde dont l'entendement leur échappe.

11 Condillac. « *Mais il est rare que les hommes ne se contentent pas d'une première réponse. On dirait que leur curiosité les porte moins à s'instruire d'une chose qu'à faire des questions sur plusieurs. Quand la curiosité se trouve jointe à un peu d'imagination, on veut aussitôt porter la vue au loin, on veut tout embrasser, tout connoître. Dans ce dessein, on néglige les détails, les choses à notre portée* », écrivait Condillac dans son [75, *Traité des systèmes*].

Je ne saurai répondre aux « *pourquoi* » que je soulèverai tout au long de cette quête, je ne donnerai pas ma langue au devin, et resterai le plus souvent *agnostique* sur ses questions, selon ce beau mot que forgea en 1869 *Thomas Huxley*^{290–454}, l'ami de *Darwin*^{287–453}.

12 Agnosticisme. *Thomas Huxley* raconte avec humour son invention du mot agnostique : « *Toute une variété de philosophes et de théologiens était représentée [...] ; la plupart de mes collègues étaient des -istes d'une sorte ou d'une autre [...] ; j'ai donc réfléchi, et inventé ce que j'ai conçu être le titre approprié d'agnostique. Il vint à mon esprit comme antithétique au terme gnostique de l'histoire de l'Église [...] et je pris la première occasion pour en faire étalage auprès des membres de notre société. À ma grande satisfaction, le terme prit.* »

Je me restreindrai à proposer *comment* des évolutions ont pu s'adapter à des contraintes de viabilité. Je me suis appuyé sur les concepts et outils mathématiques qui ont été peu à peu dégagés durant ce dernier quart de siècle pour répondre à cette question.

Il n'y a d'ailleurs aucune raison que [350, « L'efficacité déraisonnable des mathématiques dans les sciences naturelles »], selon le titre d'un article célèbre du physicien *Eugene Wigner*, s'étende aux sciences du vivant. Ce miracle, terme par lequel il termine son texte, n'est pas si étonnant, puisque, après avoir parcouru toutes les étapes de la phylogenèse (l'évolution des *espèces*), les cerveaux humains se sont adaptés de longue date aux rythmes biologiques, ceux des jours, des mois, des saisons et des années. Ils étaient préparés à reconnaître les régularités de la mécanique céleste, puis celles de leur environnement. Ils ont pu accompagner les capacités cognitives du langage par celles qu'on désigne sous le nom de mathématiques, spécifiquement destinées à repérer et à anticiper les évolutions stationnaires et cycliques⁵²⁷⁻⁷¹⁹. Nos cerveaux n'ont cependant pas pu bénéficier de ce temps immémorial pour s'adapter à la compréhension des sociétés humaines qui leur sont contemporaines.

C'est à ce point qu'un miracle est peut-être nécessaire pour appréhender les sciences du vivant. Il serait paradoxal de ne réserver qu'*aux systèmes plus simples de la physique des explications complexes*, utilisant des outils mathématiques de plus en plus difficiles d'accès, et de ne proposer que des explications simples, monistes, aux systèmes complexes qui font intervenir la vie de leurs acteurs, systèmes sans frontières, dont toutes les variables sont reliées entre elles, systèmes qu'il est impossible de délimiter sans les trahir. On ne peut espérer obtenir des métaphores mathématiques beaucoup plus abordables que celles utilisées pour rendre compte des phénomènes physiques. Ou alors évacuer ce problème en définissant de façon opérationnelle la physique comme le champ des connaissances susceptibles d'être expliquées par des métaphores mathématiques, et d'intégrer l'étude des organismes vivants comme une nouvelle branche de la physique, qui deviendrait ainsi l'arbre impérialiste de la connaissance. Il s'agit d'ordonner un monde perçu comme chaotique à partir de théories mathématiques en (r)évolution permanente, en lieu et place

d'immutables Idées platoniciennes à qui l'on cède volontiers le monopole de la métaphysique.

Plus complexes que ceux de la physique, les systèmes formés d'êtres vivants vont exiger au contraire des outils mathématiques spécifiques, probablement différents de ceux qui sont disponibles à l'heure actuelle. En fait, en l'absence de définition rigoureuse et consensuelle de la complexité, on peut cependant s'accorder pour constater qu'elle est intimement liée à l'évolution et à l'adaptation. N'ayant nul besoin de s'adapter, les objets naturels inanimés ne sont pas complexes. La *nécessité* de s'adapter aux contraintes de viabilité est donc l'antidote du *hasard* qui frappe les évolutions, en structurant les moteurs d'évolution pour tenter de maintenir leurs régulons constants et, donc, aisément identifiables. Entre la simplicité du statique et l'extrême complexité du pur hasard d'une évolution totalement désordonnée, contraintes de viabilité, principe d'inertie et évolutions lourdes contribuent à ordonner leurs évolutions, à en réduire la complexité, à en permettre l'élucidation.

La fin des fins ?

À une époque où nombre d'ouvrages clament la fin de l'histoire, du travail, etc., témoins inconscients d'une crise de viabilité majeure où disparaissent les régulons anciens pour en laisser poindre de nouveaux qui régulent les nouvelles contraintes de viabilité, cet essai a également pour thème une autre fin, celle de la *téléologie* (la science des fins de l'homme), autrement dit, la fin des fins.

Lorsque je suis arrivé à l'Université Paris-Dauphine en octobre 1969, le spécialiste d'analyse numérique des équations aux dérivées partielles que j'étais, armé de la vraie foi mathématique que seule la jeunesse peut excuser, sinon expliquer, s'est plongé dans l'univers mathématique-économique de l'époque. *Optimums* et *équilibres* — ces deux thèmes familiers de la mécanique fournissant alors des métaphores mathématiques aux économistes — ne pouvaient que passionner les mathématiciens, et ceux du CEREMADE (Centre de recherches de mathématiques de la décision) des années 1970 en particulier. C'est avec une enthousiaste naïveté qu'ils apportèrent leurs pierres à l'étude des *équilibres*^{453–663} de l'économie et de la théorie des jeux.

Il m'a fallu cependant déchanter, et entamer le dur chemin de l'agnosticisme ou, pis, de la remise en cause de certitudes chèrement acquises, en opposant inertie, réticences et résistances, même en ces matières mathématiques où l'on fait officiellement profession de certitude, voire de vérité. Si tout allait bien dans les recherches mathématiques menées dans ces directions, au point que la séduction des mathématiques m'incitait à la tentation de prendre les modèles pour la réalité, je ne pouvais pas ne pas ressentir quelque malaise en

observant que *jamais* l'évolution économique ne se trouvait à l'équilibre, pas plus qu'elle n'y convergeait d'ailleurs. Je formais de sérieux doutes sur l'hypothèse de rationalité des agents économiques supposés maximiser leur utilité et minimiser leurs coûts. Même dans un cadre dynamique où l'incertitude était permise, je n'arrivais pas à être convaincu par la façon de la lever en optimisant des critères intertemporels. Cela exigeait des *acteurs pilotant les régulateurs*, leur connaissance des *critères à optimiser*, des *anticipations* de l'avenir que l'impossibilité d'expérimentation interdit, et d'avoir pris une fois pour toutes la *décision optimale à l'instant initial*. Excellente métaphore mathématique d'un certain créationnisme, qui renaît sous nos yeux déguisé en « *intelligent design* », en attendant que pour répondre aux incertitudes du moment, soient réhabilitées l'astrologie, l'alchimie, la phlogistique, la sorcellerie et autres chimériques coquecigrues. Prêter à une « intelligence » autre un comportement humain est faire preuve d'arrogance inconsciente puisque ce devin est créé à notre image pour piloter un monde dont l'entendement nous échappe.

Je me suis alors posé la question de rendre compte de mécanismes évolutionnaires *seulement guidés par l'adaptation aux contraintes de viabilité*. Je songeais de plus en plus à trouver des métaphores mathématiques de l'évolution de systèmes évolutionnaires sous incertitude. Le type de hasard *n'obéissant à aucune régularité statistique* décelable ne me semblait pas pouvoir être appréhendé par les processus stochastiques dont l'usage semblait universel et exclusif à l'époque. Je suis reconnaissant à Charles Peirce⁹⁹⁻¹⁴¹ de m'avoir présenté la déesse Tychè³⁹⁷⁻⁶¹² et le concept d'évolution tychastique⁴³⁴⁻⁶⁴⁹ pour proposer une traduction mathématique de cet autre type d'incertitude d'ailleurs compatible avec le *principe d'anticipation*⁶⁴⁹⁻⁸¹².

Il m'a fallu désapprendre, tâche autrement plus ardue que celle d'apprendre. Ce sont ces frustrations qui me conduisirent avec un certain nombre de mathématiciens à forger et à développer depuis 1977 des outils mathématiques spécifiques constituant ce qui est devenu la *théorie de la viabilité*. Le mot « théorie » est utilisé en mathématiques avec un sens plus neutre que dans les autres disciplines : ce sont, conformément à l'étymologie (*theôria* grecque), des *cortèges d'énoncés démontrés à l'aide d'une même famille de techniques*, des *enschaînures de preuves*, comme disait Savinien Cyrano de Bergerac, et non pas des corpus explicatifs ou doctrinaires. Ces techniques ont été motivées par les sciences économiques, sociales, biologiques et cognitives, puisqu'il n'est pas toujours possible d'emprunter celles qui ont été motivées pendant tant de siècles par les sciences physiques. Ces énoncés proposent des *métaphores*, aidant les uns et les autres à *observer* (traduction du grec *theôrein*, autre étymologie de « théorie ») l'évolution des systèmes particuliers qu'ils étudient à l'aide de nouveaux outils conceptuels, à poser de nouvelles questions aux mathématiciens, à motiver des recherches ultérieures, bref, à contribuer *provi-*

soirement et *modestement* au progrès¹⁷⁻⁴⁶ de ces sciences que l'on qualifie, sans doute injustement, de « molles », pour en faire des « sciences fortes », comme l'on disait du temps d'*Oresme*³⁷⁰⁻⁵⁹⁰, « dures », depuis *Friedrich Hayek*. C'est aux jeunes scientifiques « des deux rives » que cet essai s'adresse en priorité, pour les convaincre des charmes de l'aventure mathématique. Pures, motivées ou appliquées, les mathématiques conservent également leur possibilité d'influencer la société, sans que cette influence soit toujours immédiate.

Si de jeunes mathématiciens, de concert ou en collaboration avec de jeunes spécialistes d'autres disciplines, aux idées fraîches et joyeuses, contestent et dépassent nos suggestions en *francs-penseurs* (comme ont dit de francs-tireurs, pour réhabiliter aux oreilles de notre temps le terme de « franc-pensant » que revendiquait *Voltaire*, qui, contrairement à « bien-pensant », est tombé en désuétude), cet ouvrage n'aura pas été rédigé en vain, mais pour une gloire posthume par procuration :

13 Gerbert d'Aurillac. « *La victoire du disciple, c'est la gloire du maître* », écrivait Gerbert d'Aurillac, le pape de l'an mil, sous le nom de *Sylvestre II*, qui fut, avant son court règne de quatre ans, tout à la fois clerc et mathématicien de son état.

Cette aventure intellectuelle à laquelle j'ai participé m'a procuré de grandes satisfactions, à la mesure des difficultés surmontées. Ce sont ces plaisirs que je souhaite partager avec mes lecteurs, en leur proposant quelques explications que j'ai retenues plausibles, en ayant fait tout mon possible pour leur épargner les difficultés. Ce n'est pas un livre de mathématiques, mais celui d'un mathématicien qui pose sur le monde un regard au travers de verres polis par un long exercice de sa technique et de son art, de sa *technè*. Je vais planter le décor de mon récit en introduisant ses éléments les uns après les autres, et j'invite le lecteur à visiter les coulisses de ce théâtre. Le *deus ex machina* a été remplacé par la *dea in mathematica* qui propose les *métaphores mathématiques* de ce récit. J'emprunte à *Denis Diderot* les premières lignes de ses [106, *Pensées philosophiques*] :

14 Diderot. « *Je compte sur peu de lecteurs, et n'aspire qu'à quelques suffrages. Si ces pensées ne plaisent à personne, elles ne pourront qu'être mauvaises ; mais je les tiens pour détestables si elles plaisent à tout le monde.* »

Si jamais il s'avère que certaines de ces métaphores n'emportent pas la conviction du lecteur, les assertions mathématiques, elles, sont *vraies*, de la vérité conférée par l'onction mathématique, celle de l'*alètheia*¹²⁷⁻¹⁷⁰ grecque, qui signifiait alors *dévoiler* une « nature qui aime à se cacher », si l'on en

croit *Héraclite*. Nous essaierons ensemble d'ôter le voile d'Isis, qui se vantait qu'aucun mortel ne pourrait le soulever (voir le beau livre [165, *Le voile d'Isis*] de *Pierre Hadot*). Et ces vérités-là sont belles à dire, d'une beauté difficilement accessible, mais qui fascine tous les mathématiciens en les captivant dans ses rets : ce sera de ma seule faute si le talent me manque pour la dépeindre.

J'ai tenté de traduire des assertions mathématiques *démontrées*, sans trop les trahir par des considérations métaphysiques :

15 **Voltaire.** « *On peut être métaphysicien sans être géomètre. La métaphysique est plus amusante ; c'est souvent le roman de l'esprit. En géométrie, au contraire, il faut calculer, mesurer. C'est une gêne continuelle, et plusieurs esprits ont mieux aimé rêver doucement que se fatiguer.* »

avait déjà remarqué *Voltaire* dans son [344, *Dictionnaire philosophique*].

Cette entrée en matière est brutale : je voulais en dire le plus possible avec le moins de mots. Il me faut maintenant détailler ce récit, et procéder par ordre.

Itinéraires et modes de navigation dans l'ouvrage

« Mais je dois rassembler des faits généraux et des vérités fondamentales bien reconnues, parce que je m'aperçois qu'il jaillit de leur réunion des traits de lumière qui ont échappé à ceux qui se sont occupés des détails de ces objets, et que ces traits de lumière nous montrent, avec évidence, ce que sont réellement ces corps doués de la vie, pourquoi et comment ils existent, de quelle manière ils se développent et se reproduisent ; enfin par quelles voies les facultés qu'on observe en eux ont été obtenues, transmises et conservées dans les individus de chaque espèce. »

Jean-Baptiste de Monet, chevalier de Lamarck

S'il a fallu attendre la Renaissance pour que *Mercator* conjugue ses talents mathématiques et cartographiques afin de projeter le globe terrestre (dans un espace de dimension 3) sur une carte (dans un plan de dimension 2), que dire de la difficulté que surmontent depuis deux cent mille ans les êtres humains pour projeter sur une droite (un espace de dimension 1), par la voix ou l'écriture, une pensée qui se développe dans un espace de dimension pratiquement infinie ? Comment justifier l'exposé de tel concept avant un autre, alors qu'ils sont tous les deux liés et reliés à d'autres ? Difficultés que j'ai eu peine à surmonter depuis que je rédige cet essai, ne sachant quel ordre choisir pour présenter ces chapitres. Celui de la logique aurait exigé que je suive un plan exactement contraire au plan que j'ai choisi : il aurait fallu que je commence par les mathématiques et ses résultats généraux, suivis d'un exposé de la biologie, depuis la biologie moléculaire jusqu'à l'évolution biologique des espèces, dont la nôtre.

J'ai choisi de suivre l'ordre inverse, celui de la difficulté *technique* croissante. Je commence par ce qui peut intéresser le plus lectrices et lecteurs, eux-

mêmes femmes et hommes : leurs comportements, leurs régulons culturels, leurs activités sociales et économiques. Pour ensuite revenir au tout début, aller plus en détail au niveau des genèses biologiques, du gène à l'anthropogenèse, des comportements aux processus cognitifs. On ne peut parler d'économie, par exemple, sans prendre en compte les individus. On ne peut supposer ces derniers rationnels sans faire le point sur ce que l'on sait des sciences cognitives à l'heure actuelle, et, en particulier, du langage et autres échanges de signes et d'informations, et de leurs capacité mathématiques. Ils font partie des comportements humains qui régissent les échanges sociaux, y compris les échanges économiques, qui peuvent être mieux compris si on les intègre dans le cadre de l'*éthologie*⁵⁰⁻⁶⁸. L'histoire de nos sociétés n'est qu'un chapitre de la phylogenèse, l'histoire des êtres vivants, dont on peut tirer des enseignements. L'histoire économique n'est qu'une composante de l'histoire des sociétés, qui s'en distingue essentiellement par l'*usage du nombre* dans les échanges. Tous ces concepts sont liés, et retentissent les uns sur les autres, à des niveaux hiérarchiques, de fait, inertiels, différents, bien sûr.

Je convie donc le lecteur à faire en ma compagnie l'école buissonnière, au gré des *enquêtes* que nous mènerons ensemble pour traquer l'évolution des êtres et des choses, en furetant dans les champs disciplinaires. Comme dans toute enquête, nous emprunterons des fausses pistes, reviendrons sur nos pas, cherchant où se niche l'inertie, repérant des régularités, des similitudes. Nous musarderons pour nous attarder autour des curiosités, même si elles ne sont pas toujours indispensables aux investigations, flâner ici et là pour le simple plaisir de l'esprit et de la découverte. Ici ou là seront déposées des clés de lecture, pour inciter le lecteur à découvrir ce qui n'est qu'effleuré, quitte à abandonner la lecture de ce livre, et peut-être y revenir.

Le lecteur n'est en rien tenu de me suivre pas à pas. J'ai tenté de multiplier les itinéraires qui peuvent être suivis au gré des goûts et des inspirations des uns et des autres, aménageant des haltes où distraire celles et ceux qui tiennent cet essai entre leurs mains. Je ne connais malheureusement pas mes futurs interlocuteurs. J'assume ces digressions, en fait, ces transgressions au conseil de *Vauvenargues* : « *Les digressions trop longues ou trop fréquentes rompent l'unité du sujet.* » Certes, mais pour dépendre un arbre, faut-il commencer par élaguer ses branches et décrire son seul tronc, ou plutôt écarter ses branches une à une, admirer la couleur et ôter quelques feuilles qui accrochent le regard pour les examiner de plus près, avant d'accéder à ce tronc et de franchir l'écorce pour admirer son fonctionnement interne. L'unité de l'arbre se réduit-elle à son tronc ? J'ai ici cédé à la tentation de détailler aussi quelques feuilles de mon arbuste de la connaissance avant d'en disséquer le tronc. Sans pour autant que cet arbre cache la forêt, qu'il a fallu que je visite aussi pour me rendre auprès

de mon arbre et le comprendre, sans me démunir des cailloux nécessaires pour ne pas égarer le lecteur avec moi.

J'ai choisi une démarche toute contraire à celle qu'un mathématicien ou un universitaire est censé suivre : du général au particulier, du « *top* » au « *down* ». J'ai précipité le lecteur dans le « *bottom* » des particuliers pour « monter en abstraction », suivre ce fameux « *up* » que les Anglo-Saxons savent si bien décrire dans les images ramassées que favorise leur langue.

Puis, les enquêtes bien avancées, cette promenade terminée, je m'appuierai sur tous ces exemples d'où surgissent les questions de viabilité, de contingence, d'inertie, de régulation « lourde » par des régulons, pour aborder dans la seconde partie de l'ouvrage la description de la théorie de la viabilité, motivée par ces questions, et... débouchant sur d'autres. Le degré d'abstraction que réclament les mathématiques, cette activité de paresseux qui isole un tout petit nombre de variables pour mieux les analyser, cause de nombreuses surprises. Les outils mathématiques forgés pour expliquer tel ou tel phénomène à un niveau d'abstraction élevé sont de fait utiles à tout autre système qui partage ce niveau d'abstraction. Plus ce niveau est élevé, plus les domaines d'application sont nombreux.

Les outils mathématiques forgés pour rendre compte de l'évolution en avenir incertain, soumise à des contraintes de viabilité et à des seuils d'inertie, ont ainsi trouvé des applications dans des domaines plus terre à terre, tels :

1. *Problèmes d'environnement*, comme
 - la gestion de ressources renouvelables comme la pêche (halieutique), dans le cadre duquel sont illustrés de nombreux concepts (Sections 9.2.2, 9.3.3, 10.3.5, 10.8.2 et 10.9.5),
 - l'impact de la pollution sur la concentration de gaz à effets de serre et le coût économique de la transition industrielle pour respecter ce seuil^{10.9.8–724}.
2. *Gestion de portefeuille* garantie et performante et leurs logiciels de gestion^{267–435}.
3. *Robotique*
 - navigation autonome de robots^{11.4–761},
 - minimisation de la congestion du trafic, tant terrestre qu'aérien^{10.6–684}.
 - enveloppe de sécurité pour l'atterrissage.

Ils se sont révélés suffisamment efficaces pour être valorisés par la société *VIMADES*, qui s'est donné pour tâche de les faire passer du stade de la découverte à l'innovation sociale en créant une demande pour ces nouveaux produits.

J'essaierai de tramer tous ces fils, de tisser des histoires cohérentes, de nouer entre eux les indices et les observations recueillies lors de nos enquêtes.

Celles et ceux pressés d'aller à l'essentiel, qui ne se soucient pas trop des détails, et qu'une vue cavalière satisfait, peuvent commencer à affronter d'emblée l'exposé des principaux résultats de la théorie de la viabilité présentés de façon plus « académique » dans la deuxième partie, plus aride, mais qui peut-être abordée indépendamment de la première.

J'ai supposé lectrices et lecteurs aussi curieux que moi, et moins ignorants que je ne le suis en dehors de leur domaine d'expertise. Comme eux, j'ai formé des opinions ou exprimé des intuitions. Je ne me suis d'ailleurs pas interdit certaines naïvetés qui pourraient indisposer les experts des divers sujets passés en revue. Le grand moteur de la science consistant à corriger les erreurs inévitables des opinions précédentes, leur mérite sera au moins de poser des questions et de provoquer un débat.

Il est impossible de tout exposer, mais j'ai cru qu'il fallait que je m'efforce de négliger le moins possible les informations disponibles — au risque de former un « *chaos d'idées* » — que je souhaiterais claires, si ce compliment en forme de reproche n'avait déjà été fait à *Voltaire*. Comme l'écrivait *Lucien Febvre* dans [123, *Autour de L'Heptaméron*] : « *Je ne serai pas complet. Je voudrais, une fois de plus, comprendre, et faire comprendre. Comprendre, ramasser, ressaisir, reconstituer, comprendre. Et ce livre va en rejoindre d'autres — qui eux non plus ne seront pas complets. Mais tous, je l'espère, proposent quelque énigme à notre besoin de trouver.* » J'ai tenté d'ordonner ces nombreuses digressions autour du fil d'Ariane qu'est dans ce labyrinthe la théorie de la viabilité.

Naturellement, un biologiste, un « cogniticien », un historien ou un économiste n'apprendra rien du chapitre que résume — forcément de façon maladroite — sa discipline l'amateur que je suis, et je souhaite qu'il n'y trouve ni erreurs ni déformations grossières. Il aura cependant accès à une information éclectique minimale — présentée dans un cadre commun — sur les autres domaines qu'un enseignement de plus en plus spécialisé ne lui aura pas procurée, car il ne peut en être autrement de nos jours. Dans son domaine, les insuffisances de la théorie de la viabilité lui sauteront aux yeux. La complexité des systèmes qu'il étudie va bien au-delà de ce que les mathématiques peuvent proposer à chaque instant pour accompagner les progrès culturels, scientifiques et autres.

En ce qui concerne la traduction en langage vernaculaire des énoncés mathématiques, théorèmes, propositions, corollaires et autres lemmes, l'usage est

d'énoncer d'abord les hypothèses et ensuite les conclusions obtenues à partir de démonstrations. Dans cet essai, j'emprunte la démarche inverse : je formule d'abord la conclusion, qui est l'assertion offerte à la curiosité du lecteur, et j'indiquerai ensuite les hypothèses, lorsqu'elles ne sont pas trop techniques : elles constituent le prix à payer pour que la conclusion proposée soit validée selon les modalités du jour. Une fois isolées pour les assertions que je juge à la fois importantes et communicables, nul besoin d'insister sur le montant de ce prix : comme dans tout bon commerce, il n'est disponible que pour les chalands qui souhaitent céder à l'objet convoité.

Table des matières

Avant-propos	15
---------------------	-----------

Itinéraires et modes de navigation dans l'ouvrage	35
--	-----------

I. Enquêtes sur la viabilité, la contingence et l'inertie

Chapitre 1. L'inertie des régulons	43
---	-----------

1.1. Acteur, spectateur et conteur	43
1.2. La perception des sphères	46
1.3. Les organismes et leurs régulons	50
1.4. Systèmes évolutionnaires, rétroactions et lois de régulation	56
1.5. Comportements et savoirs	62
1.6. L'empreinte	68
1.7. La science de l'inertie	76
1.8. L'inertie de la science	82
1.8.1. Mnémosyne et Lesmosyne	82
1.8.2. Le retour aux grands embranchements	87
1.8.3. À la recherche du chaînon perdu	88
1.8.4. Irréversibilité	90
1.9. Complexité connexionniste	93
1.10. Complexité lamarckienne	96

Chapitre 2. Métaphores de la réalité	105
---	------------

2.1. Quand les hommes devinrent conteurs	105
2.2. Quand les hommes devinrent compteurs	118
2.3. Quand les hommes devinrent scripteurs	127
2.4. Systèmes de communication	133
2.4.1. Signaux et motifs	133
2.4.2. Systèmes linguistiques	134
2.4.3. Grammaires	139
2.4.4. Systèmes sémiotiques	140
2.4.5. Relations	143
2.5. Métaphores et régulons culturels	144
2.6. Réalité individuelle	152
2.7. Réalité sociale	155
2.8. La malédiction de Babel	160

Chapitre 3. La longue marche vers l'abstraction	167
3.1. Dé-couvrir : alètheia	167
3.2. La révolution de l'orgueil	174
3.3. Des mathématiques et des hommes	179
3.3.1. Mathématiques ?	179
3.3.2. Mathématiciens !	181
3.3.3. Métaphores mathématiques	184
3.3.4. De l'utilité des mathématiques	190
3.3.5. Les mathématiques vivent avec les hommes	192
3.4. Fermat, prince des novateurs	196
3.5. Le commerce des savoirs	203
3.5.1. Méta-éducation : apprendre à apprendre	204
3.5.2. Évaluation des savoirs	212
3.5.3. Professeurs ou évaluateurs	215
3.5.4. Le savant et l'entrepreneur	221
3.5.5. La recherche malade de son évaluation	228
3.5.6. Du contribuable aux maîtres et aux étudiants	232
3.5.7. L'irruption des réseaux	234
Chapitre 4. La fin du <i>Weltgeist</i>	241
4.1. Mnémosyne et Clio	241
4.2. Les origines : rites et mythes	244
4.2.1. Rites	246
4.2.2. Mythes	250
4.3. Régulons sociaux	255
4.3.1. Civilisations et cultures	258
4.3.2. Foi et obéissance	261
4.3.3. Composantes des hyperrégulons sociaux	265
4.3.4. Hiérarchisation des hyperrégulons sociaux	267
4.3.5. Dogmes et hérésies	269
4.3.6. Le lent cheminement vers la démocratie	272
4.4. Systèmes sociaux et sociétés	281
4.5. Un moteur nommé désir	285
4.5.1. Agir	285
4.5.2. Porteurs d'hyperrégulons sociaux	290
4.5.3. Production continue d'hyperrégulons sociaux	296
4.6. Sociabilité	299
4.7. Sociétés viables	304
4.7.1. Évolution des hyperrégulons sociaux	306
4.7.2. Pouvoir d'inertie	307
4.7.3. Conversions	310
4.7.4. Avènements et événements	313
4.7.5. Le chêne et le roseau	315
4.7.6. Tendances lourdes	318
4.7.7. Peurs eschatologiques	324
4.8. De Thémis à Diké	329
4.9. Évolution des coalitions	333
4.9.1. Groupes de sociétés	333
4.9.2. La révolution culturelle silencieuse des années 1980	346
4.9.3. L'Europe ressuscitera-t-elle ?	348
4.10. Ainsi parlait vraiment Zarathoustra	351

Chapitre 5. Le Marché, Devin de notre temps ?	371
5.1. L'irruption du nombre dans les échanges	371
5.1.1. Le désir produit la rareté	371
5.1.2. Le commerce des promesses	375
5.1.3. La relique barbare	376
5.1.4. Prix, régulateurs économiques	383
5.1.5. L'impérialisme quantitatif	386
5.1.6. Le droit au loisir	389
5.1.7. Cols bleus, blancs et ouverts	392
5.1.8. Gestion par faillites	395
5.2. Vers une uconomie ?	396
5.3. Une perspective évolutionnaire	402
5.4. Main invisible ou agents économiques visibles ?	405
5.4.1. Contraintes de rareté	406
5.4.2. Peut-on mesurer le bonheur ?	407
5.4.3. Chef suprême et chef d'orchestre	409
5.4.4. Propriétés des équilibres walrassiens	410
5.4.5. L'émergence des prix	413
5.4.6. Équilibres économiques	414
5.5. Agents visibles et délibérés	416
5.6. Le Banquier : Demiurge de notre temps !	420
5.6.1. Évolution conjointe des biens et de la monnaie	422
5.6.2. Cycles économiques	424
5.7. Les spéculateurs	427
5.7.1. Portefeuilles	428
5.7.2. Modèles de prévision des cours	429
5.7.3. Gestion garantie et performante	433
5.7.4. Le robot-trader VPPI	437
5.7.5. Gestion actif-passif	438
5.7.6. À la recherche de la formule perdue.	441
5.7.7. Évaluation et gestion des options financières	443
Chapitre 6. Les genèses	447
6.1. Explorateurs et héritiers	447
6.2. Le ballet des molécules	457
6.2.1. Sémiologie moléculaire	457
6.2.2. La bibliothèque génétique	462
6.2.3. Synthèse des protéines	467
6.2.4. Mutations	471
6.2.5. La plage primordiale	473
6.3. L'impérialisme cellulaire	475
6.3.1. La cellule	475
6.3.2. La division ou la mort	479
6.3.3. Différenciation cellulaire	482
6.3.4. Reproduction sexuée	483
6.3.5. Suicide sur ordonnance	487
6.4. Le gène explorateur	488
6.4.1. Les états phénotypiques	489
6.4.2. Les régulateurs géniques	490
6.4.3. Embryogenèse	492
6.4.4. Ontogenèse	496
6.5. La genèse des espèces	496
6.5.1. La taxinomie spéculative	497
6.5.2. Les espèces	499
6.5.3. Hétérochronie	502
6.5.4. Phylogenèse	505
6.6. S'adapter ensemble	508
6.7. Inertie des systèmes biologiques	511
6.8. Anthropogenèse	515
6.9. Vanini, prince des libertins	522

Chapitre 7. Les âmes mortes	531
7.1. L'homme synaptique	532
7.1.1. Synapses, carrefours de neurones	532
7.1.2. Circuits de neurotransmetteurs	540
7.1.3. Apprentissage sensorimoteur	546
7.1.4. Apprendre en jouant et en rêvant	549
7.1.5. Localisation des fonctions cérébrales	552
7.2. Perception, action et processus cognitifs	556
7.3. De l'abduction à la métacognition	560
7.3.1. Abstraction et symboles	560
7.3.2. Apprentissage et métacognition	570
7.4. Correspondances vicariantes	576
7.4.1. Systèmes cognitifs statiques	579
7.4.2. Systèmes cognitifs dynamiques	582
7.4.3. Inertie de l'apprentissage	583

II. Mathématiques de la viabilité, de la contingence et de l'inertie

Chapitre 8. Temps et incertitudes	589
8.1. Le temps : une convention sociale	589
8.1.1. Le futur est un pari, conforté par le passé	594
8.1.2. L'expérimentation ou la foi	596
8.1.3. Il faut donner le temps au temps : le kairos	596
8.1.4. Échelles de temps	599
8.2. Le temps, numéraire de l'évolution	601
8.3. Typologie des évolutions	605
8.4. Incertitudes	610
8.4.1. La déesse Tychè	612
8.4.2. Systèmes tychastiques	615
8.4.3. Variables contingentes : régulons et commandes	617
8.4.4. Évolution de la redondance	618
8.4.5. Typologie des incertitudes	621
8.5. Les hasards de Cicéron et de Cournot	622
8.6. Le hasard impulsif	623
Chapitre 9. Moteurs de l'évolution	627
9.1. Systèmes évolutionnaires généraux	627
9.2. Systèmes en temps daté	628
9.2.1. Systèmes déterministes en temps discret	628
9.2.2. Halieutique : temps discret	629
9.2.3. Systèmes non déterministes discrets	636
9.3. Moteurs univoques en temps continu	637
9.3.1. Transitions et vitesses d'évolutions	637
9.3.2. Équations différentielles	639
9.3.3. Halieutique : Malthus et Verhulst	641
9.3.4. Déterminisme et prévisibilité	643
9.4. Moteurs multivoques en temps continu	648
9.4.1. Systèmes régulés	649
9.4.2. Inclusions différentielles	651
9.4.3. Systèmes contingent/tychastique	654
9.4.4. Systèmes régulés en cascade	655
9.4.5. Systèmes rétrogrades : d'effet à causes	655
9.5. Évolutions optimales : le principe téléologique	656

Chapitre 10. Contingence, viabilité et inertie	661
10.1. Problèmes directs et inverses	661
10.1.1. Problèmes directs	661
10.1.2. Problèmes inverses	662
10.1.3. Équilibres et points d'arrêt d'un système évolutionnaire	663
10.2. Le lit de Procruste	665
10.3. Noyaux de viabilité, fonctions de sortie	667
10.3.1. Noyaux de viabilité	667
10.3.2. Évolutions persistantes	670
10.3.3. Semi-perméabilité des noyaux de viabilité	672
10.3.4. Viabilité inverse	673
10.3.5. Halieutique : des poissons et des hommes	674
10.3.6. Progrès par rapport à une relation de préférence	676
10.4. Bassins de capture et fonctions d'entrée	677
10.5. De Charybde en Scylla	680
10.6. Gestion du trafic dans les réseaux de transport	684
10.6.1. Gestion du trafic aérien	684
10.6.2. Gestion du trafic routier	686
10.7. Cascades de contraintes de viabilité	689
10.7.1. <i>Fluctuat nec mergitur</i>	689
10.7.2. Paradis, purgatoire et enfer	690
10.7.3. Sûreté	691
10.7.4. Cellules qualitatives	693
10.8. Mesures d'indice sur les évolutions	696
10.8.1. Fenêtres temporelles et mesures occupationnelles	696
10.8.2. Halieutique : des sardines et des chômeurs	697
10.8.3. Fonctions de sécurité et de transgression	699
10.8.4. Fonction de résilience	700
10.9. Le principe d'inertie	701
10.9.1. Fonctions d'inertie	701
10.9.2. Métis, Tao et inertie	707
10.9.3. Évolutions viables ponctuées	709
10.9.4. Évolutions viables lourdes	712
10.9.5. Halieutique : évolutions lourdes	714
10.9.6. Oscillateurs viabilistes	717
10.9.7. Régulation en cascade inertielle	720
10.9.8. Impacts économiques sur le climat	724
10.10. Quand le présent évolue à son tour	727
10.10.1. Intégrateurs de « conditions transitoires »	727
10.10.2. Bassins de connexion	728
10.10.3. La stratégie d'Eupalinos	731
10.10.4. Attracteurs	732
10.10.5. Observations des évolutions	736
10.11. Noyaux et bassins tchastiques	737
10.11.1. Noyaux d'invariance	737
10.11.2. Bassins d'absorption	740
10.11.3. Noyaux de viabilité garantis et conditionnels	741
10.12. Algorithmes de viabilité	744
10.12.1. Approximation des noyaux de viabilité	744
10.12.2. Propriétés fractales de noyaux de viabilité	747
10.13. Rétablir la viabilité	750
Chapitre 11. Régulation des systèmes	751
11.1. Le théorème de viabilité	751
11.2. La loi de régulation	756
11.2.1. Rétroactions	757
11.2.2. Sélection de rétroactions viables	758
11.3. Exemples de lois de régulation	759
11.4. Navigation autonome de robots	761
11.5. Enchaînement de rétroactions	765
11.6. Du « micro » au « macro »	771
11.7. Jeux dynamiques « myopes »	773

11.8. À la recherche des régulons perdus	775
11.9. Émergence du connexionnisme	777
11.9.1. Réseaux de neurones formels	778
11.9.2. Régulation par les matrices connexionnistes	781
11.9.3. Structuration lamarckienne et réseaux mimétiques	784
11.10. Équilibres et points d'arrêt	786
11.10.1. Existence d'un équilibre	786
11.10.2. Évolutions périodiques viables	789
11.10.3. Bifurcations	789
11.10.4. Stabilités autour d'un équilibre	791
11.11. Le théorème d'invariance	794
Chapitre 12. Autres systèmes évolutifs	795
12.1. Systèmes impulsifs et hybrides	795
12.1.1. Suite de kairós	796
12.1.2. Évolutions impulsives	797
12.1.3. Systèmes impulsifs univoques	798
12.1.4. Systèmes impulsifs multivoques	800
12.2. Coévolution et morphogénèse	802
12.2.1. Morphogénèse	803
12.2.2. Transitions morphologiques	805
12.2.3. Équations morphologiques	807
12.2.4. Coviabilité	810
12.2.5. Embryogénèse du poisson zèbre	814
12.3. Systèmes historiques	816
12.4. Systèmes spatiotemporels	818
12.5. Systèmes stochastiques	819
12.6. Systèmes flous	821
Chapitre 13. Commentaires mathématiques	823
13.1. Correspondances	824
13.2. Approche « graphique »	826
13.3. Relations triadiques	830
13.4. Espaces vectoriels	831
13.5. Continuité et stabilité	834
13.6. Frontière	836
13.7. Systèmes évolutifs	838
Chapitre 14. Genèse de la théorie de la viabilité	841
Remerciements	853
Bibliographie	859
Index des noms	871
Index des noms propres	879