

SurEnvironnement
et
paradigme écosystémique

Frédéric Malaval

The logo for POLEMIA features the word "POLEMIA" in a blue, serif font. A yellow lightning bolt graphic strikes the letter "E".

Plan

25 août 2005

Introduction	6
Partie I : Le SurEnvironnement	13
A : De la loi de 1992 au SurEnvironnement	14
1 : La loi de 1992 relative à l'élimination des déchets	14
2 : Finitude et croissances exponentielles	16
3 : Optimisme et catastrophisme écologiques	20
4 : Environnement: de l'aménagement au SurEnvironnement	24
B : La découverte de l'environnement	29
1 : Approches 'milieu' et approches 'environnement'	32
a : Le SurEnvironnement	32
b : Le Milieu et l'Environnement	37
c : Catégories des 'problématiques' de l'environnement	39
3 : La disparition des SurEnvironnement	43
4 : L'intégration des SurEnvironnement	47
5 : Du SurEnvironnement au dommage écologique pur	50

Partie II : Vers une épistémologie de l'environnement	56
A : Le paradigme	57
B : Les enjeux épistémologiques de la thermodynamique	61
1 : Préambule	61
2 : De Carnot à la mort de l'univers	63
3 : Du désordre aux structures dissipatives	66
a : Les trois thermodynamiques	68
a-1 : La thermodynamique d'équilibre	69
- Le premier principe ou principe d'équivalence	69
- Le second principe ou principe d'entropie	70
- Fluctuations et équilibre	71
a-2 : La thermodynamique du non-équilibre	72
- La thermodynamique linéaire	72
- La thermodynamique non-linéaire	74
b : Les structures dissipatives	77
c : L'usage de la thermodynamique	79
c-1 : Les concentrations d'énergie	80
c-2 : Les oxydo-réductions	81
d : Les notions incontournables	83
d-1 : Information et néguentropie	83
d-2 : Exergy	87
d-3 : Homéostasie	88
d-4 : Non-linéarité	89
d-5 : Hasard	91
d-6 : Complexité	93
d-7 : Information et complexité	94

C : Rôle des mathématiques dans le paradigme écosystémique	98
1 : Préambule	98
2 : Les mathématiques: voie royale vers la connaissance	100
3 : A la découverte des limites des mathématiques	108
4 : Désordre et complexité	113
5 : Complexité d'émergence	114
6 : Le chaos déterministe	116
7 : Le désordre de la nature	118
D : Paradigme classique ou paradigme écosystémique	122
Conclusion générale: vers un phénoménologie de l'environnement	128
Bibliographie	135

Introduction

C'est en juin 1972 que des scientifiques, des organisations non gouvernementales (ONG) et des représentants des Etats se retrouvèrent à Stockholm pour exprimer que l'ère industrielle se révélait être particulièrement pénalisante pour les milieux naturels. René Dubos¹ écrivait dans son rapport préparatoire à cette première Conférence mondiale sur l'environnement humain: "*En voulant produire sans cesse davantage, l'homme pollue davantage l'air, l'eau et le sol et il gaspille des ressources qui ne sont pas inépuisables. En voulant maîtriser la maladie sans s'être soucié de l'expansion démographique, il est en train d'épuiser la terre. Où en serons-nous dans trente ans, lorsque six ou sept milliards de gens devront exister sur la planète ?*".

La même année, le Club de Rome publiait un rapport intitulé *The Limit to Growth* traduit en français par "*Halte à la croissance*". Ce réquisitoire d'économistes prônait la "*croissance zéro*" de la démographie humaine pour épargner les matières premières non renouvelables.

¹ DUBOS René (1901-1982) Médecin et biologiste américain d'origine française. Né dans le Val d'Oise à Saint-Brice, fut professeur honoraire à la Rockefeller University, mais aussi professeur de pathologie comparée et de médecine tropicale à la Harvard University Medical School. Ses travaux ont ainsi ouvert la voie au développement des antibiotiques. En matière d'environnement, sa contribution principale fut sa mémorable intervention à la Conférence sur l'environnement, tenue à Stockholm en 1972 sous l'égide de l'O.N.U

L'appel de Stockholm est un texte qui s'intéresse principalement à la protection de la nature. Il s'inscrit dans une conception naturaliste de l'écologie et de la protection de l'environnement, niant à l'homme une quelconque prérogative sur la nature, alors que le concept de Développement durable place celui-ci au centre de ses préoccupations. La manifestation de Stockholm est un point d'ancrage historique pour les initiateurs du Développement durable, mais marque aussi la fin de l'espérance suscitée par trente d'années d'expansion économique dans les pays occidentaux.

La première réaction à ces problématiques de l'environnement fut l'édification d'une législation spécifique dans tous les pays occidentaux pendant les années 1970. Les industriels furent les principales cibles de ces nouvelles exigences. Ce travail législatif se compose de textes dits "correctifs" qui résolvent les problèmes au moment où ils se posent. Puis, après les phases de prise en compte et de réactions ciblées apparurent de nouvelles manières d'envisager l'intégration des préoccupations environnementales.

En politique, les textes développés à partir du concept de Développement durable consacré par le Sommet de la Terre de Rio en 1992 sont le pendant des systèmes de certification destinés aux entreprises comme ISO 14001. Il s'agit désormais, non plus d'opposer économie et environnement, mais de les intégrer dans des ensembles conceptuels cohérents regroupés dans l'expression de "management de l'environnement". En trente années, la prise en compte de l'environnement est passée d'une conception *end of pipe* (bout de tuyau), c'est à dire qui se contentait de gérer une pollution, à une conception par laquelle l'environnement est intégré au processus de production. A la première phase a correspondu l'énorme effort de réglementation fait dans tous les pays développés, puis les éco-outils (systèmes de management de l'environnement, éco-produits, analyses de cycle de vie, etc.) sont apparus pour compléter et dépasser l'approche initiale, participant à l'enrichissement du concept de Développement durable.

Les enjeux pratiques, mais aussi philosophiques de l'environnement se résument par la question suivante: le concept 'environnement' est-il réductible à des préoccupations ancestrales ou formalise-t-il une problématique nouvelle consubstantielle à nos pratiques sociales ? La réponse proposée est que l'usage des termes environnement, écologie, Développement durable ou le recours au préfixe 'éco' dans des mots comme écoconception, écomanagement, écoproduit, etc. manifestent une exigence de modifications de nos pratiques sociales et cognitives. C'est la philosophie naturelle, -ce que je peux connaître-, et la philosophie morale, -ce que je peux faire-, qui sont bouleversées par cette évolution.

Ces interrogations obligent à formaliser les fondements de notre modèle social, accusé par le courant écologiste d'être à l'origine de la crise de l'environnement, et d'en comprendre les racines et l'histoire selon une grille de lecture écosystémique. Le paradoxe est que malgré les nombreux progrès réalisés, les réponses à cette crise de l'environnement n'ont pas modifié sensiblement les systèmes cognitifs de référence. Celles-ci s'organisent selon deux axes. Le premier regroupe des personnalités qui ne prétendent pas modifier le modèle socio-économique dominant, mais seulement l'amender dans ses manifestations les plus gênantes. Le second réunit des contestataires affirmant que le modèle est vicié et qu'il n'est pas viable, obligeant à envisager d'autres modes d'existence. Mais, les uns et les autres fondent leurs réflexions à partir de grilles de lecture anciennes rendant nécessaire d'organiser le concept d'environnement sur des bases nouvelles.

En effet, une des difficultés majeures rencontrées par les environnementalistes est l'absence de précision conceptuelle. Une multitude de phénomènes ou d'interrogations sont regroupées sous l'expression de "problématiques de l'environnement".

A l'occasion du 25^{ème} anniversaire de la création du Ministère de l'environnement en 1971, une brochure² éditée par cette institution citait les thèmes suivants comme relevant de l'environnement: effet de serre, couche d'ozone, pollution des eaux, biodiversité, déforestation, désertification, exploitation des ressources naturelles, effets de l'urbanisation, multiplication des déchets, maîtrise de l'énergie, risque des biotechnologies, développement durable.

Les juristes, de leur côté, tentaient de créer un Code de l'environnement pour donner à ce concept la même pertinence que ceux de 'Code de l'aviation civile' ou de 'Code du blé'. La tâche fut sans doute difficile car, alors que ce projet remonte aux années 1970, la partie législative du code de l'environnement ne fut publiée qu'en novembre 2000. Et encore, de vives critiques fusèrent. Plusieurs aspects fondamentaux de l'environnement avaient été oubliés comme la santé publique ou la politique d'aménagement du territoire. Aussi, la nécessité d'organiser le concept d'environnement s'est imposée à tous les environnementalistes. Ces derniers prennent vite conscience, en effet, que l'environnement n'est pas réductible à l'hygiène du milieu ou à l'aménagement du territoire.

Ce mot 'environnement' n'a pas toujours bénéficié de ce capital de sympathie qui le caractérise aujourd'hui. Au début des années 1980, il n'était pas facile de s'affirmer 'environnementaliste'. Pour illustrer cette situation, il est utile de rappeler l'évocation de ce mot en 1985 dans l'Encyclopédie Universalis: *“Environnement, le mot est à la mode, on dit “environnement” comme on dit “structure”, c'est-à-dire sans avoir aucune idée d'un sens précis du terme. Et si “structure” a la chance de se rattacher à une doctrine philosophique : le structuralisme; environnement, lui, se cherche aujourd'hui un état civil”*.

² “12 questions d'actualité sur l'environnement”, Ministère de l'environnement, 1996.

Depuis, le discours a évolué favorablement. La même encyclopédie a ensuite consacré un long article à ce mot, avec une multitude de renvois. Mais l'évocation du mot 'environnement' suscite toujours de nombreuses interrogations.

Quelles que soient leurs sensibilités, tous les environnementalistes cherchent à étudier et à imaginer de nouveaux savoirs et de nouvelles pratiques intégrant les contraintes révélées avec l'expression de 'crise de l'environnement'. Ainsi sont apparues les notions d'internalisation, de Développement durable, de dommages écologiques, d'écomanagement, et une multitude d'initiatives, de recherches, de politiques, de philosophies, pertinentes ou pas, efficaces ou pas. On ne sait pas. L'avenir le dira. Cela oblige aussi à explorer de nouvelles méthodes de pensée fondées sur les nouveaux discours de la science. Il est en effet important d'admettre que les récents développements de la science, dont la thermodynamique ou les mathématiques, imposent d'introduire de nouvelles approches dont les termes d'écosystème, de flux, de structures de non-équilibre, de complexité, de linéarité, de non-linéarité, d'holisme, d'interactions, de couplages, d'incomplétude, d'indéterminisme, etc. structurent de nouveaux paradigmes.

Toutes ces interrogations obligent à admettre que l'environnement subsume les paradigmes dominants qui structurent et déterminent les discours scientifiques et nos pratiques sociales. Aussi, la thèse proposée dans cet essai est que l'environnement, aujourd'hui, n'est pas réductible à l'aménagement, à l'hygiène ou à la conservation de la nature qui furent les attitudes historiques traditionnelles développées pour organiser... l'environnement. L'utilité de ces réponses n'est pas contestable, mais au cours de années 1970, une nouvelle conception des problématiques associées au vocable 'environnement' est apparue. Elle est fondée sur la notion d'impact d'une structure sur son entourage. Elle aussi, cependant, révèle vite ses limites pour obliger à la transcender et à envisager une autre conception.

Pour qualifier dès à présent ces deux approches, nous utiliserons l'expression de 'milieu' pour les typologies d'approches fondées sur la première conception de l'environnement, pour réserver l'usage du mot 'environnement' aux problématiques réellement nouvelles. Approches 'milieu' et approches 'environnementales' sont les deux axes autour desquels est construit ce texte.

Le plan de ce document s'articule à partir de l'idée que l'histoire de la philosophie occidentale dominante est achevée à la fin du 18ème siècle avec la constitution du paradigme classique qui s'est élaboré en rupture avec les discours religieux et scolastiques qui dominaient l'Europe depuis sa christianisation. Depuis, ce paradigme classique fait l'objet de nombreux questionnements dont la crise écologique est une des manifestations. Celle-ci conduit à proposer un ensemble de nouveaux concepts dont le SurEnvironnement (SE) est le pivot.

La première partie de cet ouvrage distinguera donc les problématiques qualifiées d'environnement fondées sur le concept de SurEnvironnement de celles, plus traditionnelles, faisant référence à un Milieu. Elle soulignera en outre que nous avons basculé d'un monde conçu comme infini dans un monde conçu comme fini. Or, le SurEnvironnement ne peut se concevoir que comme infini, obligeant à d'autres modèles pour penser les enjeux contemporains de l'environnement et du Développement durable.

Le SurEnvironnement fondamental est la Nature au sens juridique. L'étude des couplages assurances-environnement montre, d'une part, la demande qui s'exerce désormais pour intégrer cette Nature conçue comme *res nullius* dans le champ des dommages indemnisables et d'autre part, les obstacles qui s'y opposent. Ce rapide exposé permettra d'aboutir à une définition de la problématique de l'environnement contemporaine et aussi au constat que tout organisme se développe à partir d'un SurEnvironnement.

Le stade ultime de l'hominisation serait alors d'accomplir une véritable révolution qui serait d'intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives. Or, le paradoxe est que nos pratiques sociales et cognitives actuelles se sont épanouies dans un paradigme dont les fondements ont été établis au tournant des XVIII et XIXème siècle. La Révolution française de 1789 en fut la première expression politique. Le paradigme qualifié de classique est accusé par les plus radicaux des environmentalistes d'être à l'origine de la crise de l'environnement; d'où la nécessité d'organiser un autre paradigme: le paradigme écosystémique. C'est l'objet de la seconde partie d'exposer les circonstances de son élaboration et ses composantes principales.

Enfin, la conclusion générale introduira la suite à cet essai par l'évocation de la notion de valeur écosystémique dont l'invention est rendue nécessaire par la définition qui caractérise les enjeux de la crise de l'environnement contemporaine: intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales, ce que nous faisons, et cognitives, comment nous pensons. Répondre à cette question n'est pas un besoin au sens que lui donnent les gens du commerce et du marketing. C'est une nécessité.

Partie I
Le SurEnvironnement

A : De la loi de 1992 au SurEnvironnement

1 : La loi de 1992 relative à l'élimination des déchets

Le 13 juillet 1992, l'Assemblée nationale adoptait la loi n°92-646 relative à l'élimination des déchets. Une des ambitions principales de ce texte était de limiter, à l'horizon 2002, la mise en décharge aux seuls déchets ultimes. Ce qualificatif est employé pour désigner les déchets "*qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment*". Cette loi, dont tous les buts n'ont pas été atteints en 2002, a soulevé une multitude de problèmes bien concrets pour les élus locaux. Quoi de plus simple que de jeter ses déchets derrière son jardin. Depuis des milliers d'années, c'est ainsi que nous préservons nos demeures des souillures de nos activités quotidiennes. Que faire alors de ces miasmes interdits de décharge ? Les brûler, les éviter, les ignorer, les envoyer loin derrière les frontières ou dans des espaces inhabités, etc ?

La problématique est concrète, car d'année en année la quantité des déchets ménagers produits par habitant augmente de manière sensible. En 2004, elle est en France de 365 kg par an et par habitant (www.ademe.fr). En supprimant le recours aux décharges pour traiter le déchet, la loi de 1992 manifeste le souci de modifier une pratique sociale millénaire fondé sur l'éloignement de la nuisance. Cette mise en décharge fut initiée dans le prolongement de la loi Poubelle de 1894. A l'époque, la préoccupation principale était d'évacuer le déchet, vecteur de maladies, loin des centres de vie.

Les motivations à l'origine de cette loi ne sont pas idéologiques. Elles trouvent leurs origines dans le constat qu'il est quasiment impossible en France de disposer d'endroits pour stocker les déchets.

Et encore, la crise dans notre pays n'a pas la même ampleur que dans d'autres pays européens plus densément peuplés ou qu'en Asie. Quant aux pays dotés de territoires immenses, ces préoccupations leur sont étrangères, mais pour peu de temps encore compte-tenu des croissances démographiques et/ou économiques supportées par une écosphère aux dimensions finies.

Cette loi de 1992 fut donc initiée sous la contrainte que les espaces disponibles pour stocker des déchets sont de plus en plus rares ou alors que leur usage est trop coûteux. Elle participe à une mutation profonde que vivent nos sociétés développées confrontées aux limites physiques de l'espace sur lesquelles s'exerce leur autorité politique: celle de ne plus pouvoir recourir au loin, à l'inconnu, à l'ignoré pour évacuer leurs déchets. Dans le prolongement de cette législation émergent des néologismes comme 'matière première secondaire' ou 'matière résiduaire' pour remplacer le mot 'déchet', porteur de valeurs négatives. La finalité de cette évolution sémantique est d'attribuer à ces déchets une image favorable, préalable indispensable à leur réintégration dans l'économie de marché. Les succès mitigés de produits destinés au grand public fabriqués à partir de déchets montrent à quel point les aspects purement industriels ne suffisent pas assurer le succès commercial d'un bien. Le recours à des matières premières secondaires est plus sûr. Encore faut-il envisager la fin de vie du produit dès sa conception.

La loi déchet de 1992 en initiant l'écoconception marqua une étape fondamentale dans l'histoire de l'industrie et de l'économie. A l'issue de la dernière guerre mondiale (1939-1945), le but était de reconstruire, puis de produire en intégrant progressivement davantage de qualité dans les produits. La demande économique était là. Aussi, le personnage de référence de cette période fut l'ingénieur apte à créer des produits nouveaux fiables à des coûts compétitifs par l'optimisation de toutes les étapes du processus de production.

Puis l'équilibre entre la production et la demande s'établissant progressivement, il fallut recourir à de nouveaux artifices pour remporter des succès commerciaux sur ses concurrents. La fonction commerciale acquit alors une importance jusqu'alors limitée dans le processus de vente. Cette seconde étape intégra la fonction marketing-communication désormais présente dès la conception d'un produit ou d'un service.

Une des conséquences de cette politique fut de recourir à des pays tiers pour limiter les coûts de fabrication. Les effets conjugués de produits peu coûteux et abondants et d'une éthique matérialiste fondée sur la consommation ont induit une croissance des déchets à l'origine de la loi de 1992.

La troisième étape, après celles de la production, puis de la commercialisation, est celle de l'environnement. Elle tend à limiter les conséquences de cette surconsommation par le recours à des techniques comme l'écologie industrielle, l'écoconception, l'écomanagement, etc. Cette loi de 1992 est par conséquent fondamentale. Elle initie une étape supplémentaire dans l'organisation de nos sociétés développées. Elle ne remet cependant pas fondamentalement en question nos pratiques sociales, mais figure parmi les nombreuses tentatives de traitement de la crise de l'environnement. L'esprit qui en est à l'origine anime désormais toute la législation en environnement qui exprime le sentiment que nous évoluons désormais dans une écospère aux dimensions finies supportant des croissances exponentielles.

2 : Finitude et croissances exponentielles

Avant la Seconde guerre mondiale, le Pacifique était une mer inconnue. Sa cartographie fut motivée par le conflit opposant Américains et Japonais. La découverte des profondeurs de la mer fut rendue possible par l'invention du scaphandre autonome, toujours pendant la Seconde guerre mondiale.

Quant à l'espace, il est pour l'instant établi que l'homme ne peut y vivre. On est donc sur une boule. Cette boule n'est pas infinie.

La fin du XXème siècle fut celle d'un constat: la mondialisation. Ce phénomène a toujours existé. Le commerce entre des régions très éloignées fut de tout temps une réalité. Ainsi, les grandes pestes des 13 et 14ème siècle ont comme foyer originel la Mongolie dont les bacilles endémiques gagnèrent la Chine et l'Europe par les caravanes qui empruntaient les voies commerciales reliant l'Orient à l'Occident. Cette mondialisation s'est doublée d'une modification de la perception que nous en avons. Effectuée à l'origine dans un monde conçu comme infini, elle s'effectue désormais dans un monde que nous savons fini.

La mutation fondamentale que nous avons vécue à la fin du vingtième siècle est d'avoir basculé d'un monde infini dans un monde fini. La crise de l'environnement est née de la découverte de la finitude de notre monde. Ce recours à l'infini pour gérer les pollutions fut le viatique traditionnel qu'utilisèrent nos aïeux pour entretenir leur... environnement. La rivière, les gouffres comme Padirac en Dordogne, la mer et aussi l'espace furent le réceptacle réel ou imaginé de nos déchets. C'est toujours ce qui est loin qui les reçoit, que ce loin soit physique ou psychologique.

Le constat qui s'impose est que le recours à l'infini est au cœur de nos pratiques sociales et cognitives. Aujourd'hui, les discours politiques dominants voient dans le développement le remède à tous nos maux. Chômage, exclusion, famine, démographie, déficits publics, pauvreté, guerres, etc. sont solubles dans le développement dont le principe est à peine écorné par celui de développement durable. Il y eut bien quelques audacieux à parler de croissance zéro ou de décroissance durable, mais la pierre angulaire de notre modèle social reste le développement qui a comme condition nécessaire l'infini. Cette notion de développement s'étiole dès lors que son substrat est envisagé comme fini. Ce n'est qu'une question de représentation.

De l'espace, la Terre est une boule de 40.000 kilomètres de diamètre. Sur terre, l'horizon est la ligne géométrique qui borne l'espace perceptible. Au-delà, c'est l'infini. Pourtant il y a déjà pas mal de siècles que les philosophes ont diffusé l'idée d'une écosphère finie. Mais notre perception a dû attendre les progrès de l'aéronautique pour admettre que le monde sensible correspondait aux déductions des philosophes. C'est tout récent. Les années 1950-1960.

Un exemple de cette mutation est fourni grâce aux études sur l'atmosphère et les représentations qui en sont issues. Hier, donnée inconnue, on sait désormais que l'air respirable par nos organismes, quand il n'est pas pollué, est une couche de 3 km d'épaisseur : la distance entre la Tour Eiffel et la Tour Montparnasse à Paris. Ce chiffre de 3 km est le seuil d'utilisation d'appareils respiratoires dans la réglementation aéronautique pour les aéronefs non pressurisés: planeurs, aviation légère, avion de chasse, hélicoptère, etc. En faisant une projection verticale de cette distance avec comme base le sol, on a une idée exacte de l'épaisseur de l'atmosphère respirable. C'est très très mince, alors que notre perception en est infinie. Regardons le ciel un jour de beau temps. Il est immense. La nuit, c'est pire. Tous nos savoirs et toutes nos pratiques sont donc fondés sur la notion d'infini.

Selon que l'on évolue dans un monde fini ou infini, nos attitudes changent singulièrement. Divers auteurs soulignent la différence qui existe entre les pays pleins et les pays vides. Dans les premiers, les civilisations sont millénaires et se trouvent aux deux extrémités de l'Eurasie. L'Europe occidentale d'un côté, l'espace asiatique de l'autre. Ailleurs c'est vide. La conquête spatiale permet cette consciencisation de la finitude de l'écosphère. Elle succède à la révolution copernicienne qui avait placé l'homme quelque part dans le cosmos.

Paradoxalement, alors que Jacques Monod (1910-1976) concluait dans 'Le hasard et la nécessité' (1971) à la solitude de l'homme dans un univers immense, Neil A. Armstrong posait le pied sur la Lune le 20 juillet 1969 d'où il contempla l'étroitesse de la Terre et l'inhospitalité des lieux où la bannière US flottait.

Selon les lieux, les époques et les paradigmes de référence, les conceptions finies ou infinies de notre monde alternent. L'articulation entre un monde sensible et un monde conçu apparaît fondamentale. Evoluer dans un monde fini n'a pas la même signification que de disposer d'un monde infini. Imaginons nos attitudes face aux déchets si nous devions les conserver dans nos domiciles.

La crise de l'environnement a aussi son origine dans l'explosion démographique des dernières décennies. Quand les Français sont arrivés en Algérie (1830), la population était évaluée à quelques centaines de milliers d'habitants alors qu'à la fin du XXème siècle, elle avait atteint 30 millions d'habitants. Cette crise de l'environnement est née aussi de l'expansion économique, des pollutions, de la raréfaction des ressources naturelles, de la disparition d'espèces animales et végétales, de la crise de l'énergie, etc.

La crise de l'environnement est par conséquent due à la découverte de la finitude de l'écosphère d'une part et du constat qu'elle supporte des évolutions perçues comme exponentielles d'autre part. Le constat étant fait, les débats portant sur la crise de l'environnement vont s'organiser à partir de deux camps: celui des optimistes qui vont toujours trouver un infini pour surmonter les contradictions inhérentes au modèle de civilisation qu'ils soutiennent; celui des pessimistes/catastrophistes qui n'envisagent plus d'infinis mais simplement des croissances exponentielles supportées par une écosphère de dimensions et de quantités finies.

Ces croissances exponentielles sont de deux sortes: démographiques au Sud, économiques au Nord, coïncidant parfois comme en Inde ou en Chine.

3 : Optimisme et catastrophisme écologiques

La crise de l'environnement a suscité plusieurs types de réactions.

La première est la négation de cette nouvelle problématique. Les adeptes de cette position sont devenus très rares, ou alors ils sont discrets. Par courtoisie, il ne sera pas évoqué les nombreuses institutions qui rajoutent 'environnement' ou 'développement durable' à leur nom par effet de mode.

La seconde est, qu'après avoir admis cette crise, beaucoup d'experts considèrent qu'elle est terminée. Une abondante littérature soutient cet optimisme écologique. La courbe de Kuznets et la thèse de Lomborg sont souvent évoquées.

La thèse de Simon Kuznets (1901-1985), économiste américain d'origine ukrainienne, repose sur l'idée que le développement économique permet de surmonter la crise de l'environnement que tous les systèmes économiques rencontrent dans leur cheminement. Schématiquement, cette approche établit que dans une première phase du développement, l'impact sur l'environnement croît corrélativement à l'économie, puis dans une deuxième étape, un découplage se produit. La conclusion de ces travaux fondés sur le rapport entre le PIB par habitant et l'impact sur l'environnement est que le développement est la solution à la crise écologique. Cette thèse a fait l'objet de nombreuses critiques de la part d'économistes. La plus courante est que la baisse de la pression sur l'environnement est aussi due à des transferts d'activités industrielles vers des pays tiers. Cependant, l'idée d'un découplage de l'impact sur l'environnement et le PIB/hab. conforte la thèse d'une crise écologique.

Le débat sur les causes de ce découplage, si découplage il y a, en revanche est loin d'être clos.

Les idées de Bjorn Lomborg, né en 1965, eurent plus de succès dans l'opinion publique. Auréolé de son statut contesté d'ancien militant de Greenpeace, cet universitaire danois a montré, chiffres à l'appui dans *The Skeptical Environmentalist* (2001), que notre environnement aujourd'hui est meilleur que celui des années 1970. Son travail lui a valu d'être sélectionné en 2001 par le World Economic Forum comme Global Leader for Tomorrow (www.lomborg.com). Ses chiffres ont été contestés.

Dans l'un et l'autre cas, ces auteurs cherchent à démontrer que notre modèle socio-économique a les réponses à la crise de l'environnement. Il est vrai que les sociétés humaines ont toujours réagi aux crises graves... ou ont disparu.

La littérature catastrophiste sur la dégradation de l'environnement dresse un tableau apocalyptique de la situation. Cette attitude est assez bien représentée par l'œuvre de Lester R. Brown³ du Worldwatch Institute. Selon cet auteur, plusieurs facteurs favorisent la dégradation de l'environnement et notamment *“l'accélération de l'histoire due non seulement aux progrès de la technologie, mais aussi à l'augmentation sans précédent de la population mondiale, à une croissance économique plus rapide encore et à des collisions de plus en plus fréquentes entre les besoins des hommes, qui progressent, et les systèmes naturels du globe, qui ont leurs limites”*. C'est la troisième attitude.

Reposant à l'origine sur une approche catastrophiste de l'avenir de l'humanité, la notion de Développement durable a l'ambition de proposer un modèle, qui sans contester frontalement le modèle dominant, tente de l'amender en y intégrant les préoccupations environnementales.

³ “L'état de la planète 1996”, Lester R. Brown, *Economica*, 1996.

Cependant, la première idée-force véhiculée par les textes inspirant le Développement durable est que si rien n'est fait, notre monde s'effondrera.

Le mythe de la fin du monde en est le moteur principal. Ainsi, le préambule de l'Agenda 21 affirme que: *“l'humanité se trouve à un tournant crucial de son histoire. La misère, la faim, la maladie et l'analphabétisme continuent de s'aggraver, et les écosystèmes dont dépend notre bien-être ne cessent de se dégrader”*. Un auteur comme Bernard Esambert reprend cette perspective eschatologique en exprimant que⁴: *“le Développement durable intègre implicitement la perspective d'une fin possible du développement des activités humaines, voire d'une fin de notre planète. L'espèce humaine ressemble curieusement à un véhicule en pleine accélération, conduit par d'innombrables pilotes vers un avenir incertain. Il s'agit de conjurer la tragédie de l'histoire: le concept de Développement durable et son prolongement dans l'Agenda 21 indique une direction qu'il serait suicidaire de ne pas prendre”*. Pour la première fois dans l'histoire de la civilisation occidentale, l'angoisse du futur n'est plus équilibrée par l'utopie et l'espoir d'un monde meilleur mis en perspective par l'esprit religieux (le christianisme) ou laïque (le socialisme).

Aussi, à partir d'un constat pessimiste, le Développement durable tente de recréer une perspective optimiste assurant un avenir réjouissant à notre humanité: *“La seule manière d'assurer à l'humanité un avenir plus sûr et plus prospère consiste à appréhender et résoudre conjointement et harmonieusement les problèmes de l'environnement et du développement. Nous devons satisfaire les besoins essentiels des communautés humaines, améliorer le niveau de vie général et protéger et gérer plus efficacement les écosystèmes”*.

⁴ dans “12 questions d'actualité sur l'environnement”, Ministère de l'environnement, 1996/ Le Développement durable: une clé pour le XXIème siècle par Bernard Esambert, Président de l'Institut Pasteur, premier Président de la Commission Française du Développement durable.

Pessimisme écologique ou optimisme écologique; ces deux attitudes admettent la crise de l'environnement et la nécessité de la résoudre. Mais les perspectives sont profondément différentes et aboutissent à deux conceptions antagonistes de l'environnement et du développement durable: la soutenabilité forte, la soutenabilité faible. La première est portée par les environnementalistes; la seconde par les économistes.

Selon ces derniers, la croissance économique est dite soutenable si elle assure au minimum la non-décroissance du bien-être des générations futures mesuré par le potentiel de consommation de biens marchands et de biens environnementaux par habitant. La soutenabilité forte, en revanche, aboutit à l'approche dite "conservationniste". La croissance est soutenable si le stock de capital naturel reste constant.

Actuellement, les politiques environnementales dominantes se fondent prioritairement sur l'utilisation d'instruments économiques, au premier rang desquels figure la fiscalité, afin de minimiser les coûts engendrés par la protection de l'environnement et la préservation des ressources naturelles. Le but est de ne pas pénaliser la croissance conçue comme le seul vecteur de bien-être des générations présentes et futures. L'option de la soutenabilité faible est donc favorisée, malgré la véhémence de la critique des environnementalistes.

Les interrogations suscitées par la crise de l'environnement aboutissent souvent à des antagonismes irréductibles. Celui opposant économistes et environnementalistes est un des principaux. Le point d'achoppement porte sur le rôle de la nature, au sens juridique, dans les politiques à conduire. Pour les économistes, l'artificialisation des écosystèmes, donc le développement, est le but à poursuivre pour aboutir à un monde meilleur mais au détriment de la nature; pour les environnementalistes, ce monde meilleur n'est envisageable qu'en conservant cette nature à des niveaux ne menaçant pas sa pérennité. Les débats suscités par cette controverse sont innombrables et s'appuient sur des traditions politiques et historiques fort diverses.

Sans être développé présentement, ce point critique de la philosophie de l'environnement permet néanmoins de souligner l'ampleur des interrogations initiées par ces problématiques nouvelles qui débordent largement l'espace de discussion traditionnel de la philosophie occidentale qui, sur de nombreux points, se retrouve dans la situation de l'accusée.

4 : Environnement: de l'aménagement au SurEnvironnement

Depuis plus de trente années, tout a été dit, tout a été écrit sur la crise de l'environnement. Malgré cela, aujourd'hui encore, de fortes personnalités continuent d'alerter l'opinion publique sur les risques de l'ultradéveloppement et à exprimer les principales interrogations contemporaines portant sur l'avenir de notre civilisation. Le réchauffement climatique est en une. Cette crise est multidimensionnelles et fait l'objet d'innombrables publications, d'interventions, de débats, etc. Les mentionner supposerait un effort gigantesque.

Sous l'expression de crise de l'environnement s'agglutinent une immensité de préoccupations où le confort des uns s'associe aux ambitions éthiques des autres pour engager des confrontations avec le modèle socio-économique dominant ou le conforter.

Quelles sont les interrogations fondamentales regroupées sous l'expression de crise de l'environnement ?

On évitera d'évoquer les attitudes fondées sur la défense d'intérêts privés et que le recours à un barbarisme anglo-saxon désigne par 'effet Nimby' (Not in my back yard). Ceux-ci sont tout à fait légitimes, mais ne relèvent pas d'une démarche d'environnementaliste. Pas de référence, non plus, à ceux qui s'engouffrent dans la terminologie environnementale par opportunisme.

La première réponse est que cela concerne ce qui environne quelque chose en l'aménageant ou en le dégradant, selon les points de vue. Mais, géographes et historiens montrent que l'espace français, ainsi que d'autres régions de la planète, ont été modelés depuis des millénaires. La conception de l'environnement fondée sur l'aménagement du territoire n'est donc pas suffisante pour qualifier les nouvelles problématiques de l'environnement, même si les politiques qui en sont issues ont une influence décisive sur le traitement de la crise de l'environnement. Mettre des fleurs sur un balcon égaye une théorie de façades ternes. Quelques arbres judicieusement plantés embellissent un paysage. Garantir la propreté d'une ville est aussi un préalable à l'esthétique. Cependant, assimiler l'environnement à l'aménagement du territoire et à l'embellissement des paysages, quels qu'ils soient, est-il suffisant pour caractériser l'environnement ? La réponse est non. Ces derniers aspects sont fondamentaux pour évoluer dans un cadre de vie agréable et fonctionnel, mais l'aménagement de l'œcoumène est une caractéristique de toutes les grandes civilisations qui ont inscrit leur présence dans la substance de l'écosphère. Retenir cette approche reviendrait donc à nier les spécificités de la crise écologique contemporaine.

Le recours au mot environnement prolonge aussi les attitudes hygiénistes du 19ème siècle. Pourtant, c'est avec la civilisation romaine que débute l'implantation de l'hygiène du milieu. Les Romains construisent des aqueducs permettant d'amener l'eau pure jusqu'aux agglomérations, installent des égouts permettant aux villes, jusqu'alors fort sales, d'être s'assainies. Toutes les civilisations se sont préoccupées de l'hygiène du milieu. De nombreux documents utilisés par la Direction des affaires sanitaires et sociales - la DASS- utilisent encore une telle dénomination.

Que ce soient les Chinois, les Grecs, les Romains et les autres grandes civilisations, toutes favorisaient l'hygiène par l'évacuation des déchets loin des centres de vie. Lutèce, il y a 2000 années, disposait déjà d'un égout collecteur; en 1636 le réseau des égouts voûtés de Paris est évalué à 25 km; puis 130 km en 1854; 536 en 1870. En 1894, la loi Poubelle supprime les fosses d'aisance et généralise le tout à l'égout dans Paris. Le réseau des égouts dépasse aujourd'hui les 2000 kilomètres. La pollution est rejetée loin des lieux où vivent les hommes.

Au dix-neuvième siècle, le souci d'éliminer les microbes s'affirme avec la création du mouvement hygiéniste. Un des plus célèbres représentants de ce courant, Elwin Chadwick, étudia les conditions de vie de la population ouvrière et publia en 1842 un ouvrage portant sur « l'environnement sanitaire des populations ouvrières de Grande-Bretagne ». Les travaux de biologistes comme Louis Pasteur (1822-1895) en France, Joseph Lister (1827-1912) en Angleterre aboutirent à une révolution sanitaire dans les grandes nations européennes.

Malgré les succès de ces pratiques attestés par la croissance de la durée de vie moyenne (43 ans en France en 1913), le courant hygiéniste est supplanté, ces trente dernières années, par le courant environnementaliste qui l'absorbe et le transcende. Eloigner la nuisance n'est pas suffisant.

La grande différence entre l'attitude des hygiénistes et celle des environnementalistes est que les premiers traitaient la pollution en la rejetant loin des endroits où sa présence était nuisible, alors que la pratique environnementaliste postule désormais que le loin est toujours le près de quelqu'un d'autre, ceci en raison de la consciencisation de la finitude de l'écosphère.

Ainsi, des civilisations de l'Antiquité jusqu'à l'apogée du mouvement hygiéniste, l'eau polluée était rejetée loin de ses pôles d'utilisation pour éviter les pandémies. Puis, dans les années 1960, à cette préoccupation épidémiologique s'ajoutèrent celles concernant la rareté de cette ressource.

Cela conduisit à la nettoyer par des procédés industriels; les capacités naturelles du milieu à assumer cette fonction d'épuration étant insuffisantes. Désormais, l'obligation de ne pas polluer s'exprime dans toute la législation. Mais au contraire de préoccupations pratiques qui motivaient les attitudes hygiénistes passées, le traitement des eaux polluées, même faiblement, s'impose désormais au nom du respect de la nature qui devient objet d'une éthique de l'environnement. Alors que la loi de 1964 sur l'eau avait pour objet de lutter contre la pollution, la loi de 1992 érige l'eau à travers l'Art. 1 comme *"patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. L'usage de l'eau appartient à tous dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis"*. Parmi les innovations du nouveau Code pénal entré en vigueur le 1er mars 1994, on citera l'article 410-1 qui prévoit parmi *"les Intérêts Fondamentaux de la Nation, l'équilibre de son milieu naturel et de son environnement"*.

Enfin, une troisième attitude fondée sur la conservation de la nature est envisageable pour qualifier l'environnement. Intégrée à toutes politiques de l'environnement, elle n'est pourtant pas récente. Déjà au milieu du 19ème siècle, les Américains créaient des parcs nationaux, véritables sanctuaires pour une faune sauvage détruite par l'extension de la civilisation. Le bison fut l'emblème de cette politique qui ne débuta en France que dans les années 1960 avec la création du Parc de la Vanoise (1963). La protection du monde animal sauvage en est le but. L'émoi provoqué par la chasse aux bébés phoques dans les années 1970 relève de cette composante de la crise de l'environnement s'interrogeant sur nos rapports à l'animal.

En s'arrêtant à cette étape de la crise, le recours au concept d'environnement n'est que le prolongement d'attitudes anciennes consubstantielles à l'activité humaine comme l'aménagement, induites par des exigences pratiques comme l'hygiène ou motivée par l'émergence d'une éthique dont l'homme n'est plus l'unique objet : la Nature.

Ces attitudes ont été amalgamées dans l'expression de crise de l'environnement, exacerbées par des évolutions économiques au Nord, démographiques au Sud jamais connues jusqu'alors. Mais la seconde moitié du XXème siècle a été aussi à l'origine d'une crise de l'environnement irréductible à ces acceptations les plus courantes.

B : La découverte de l'environnement

Une des découvertes fondamentales de la seconde moitié du XXème siècle est l'impact des activités humaines sur l'écosphère. Cette prise de conscience induit un changement de nos rapports avec celle-ci exprimé par une multitude d'auteurs.

Ainsi le philosophe allemand Hans Jonas (1903-1993) dans "Le principe de responsabilité" publié en 1979 attribue à l'homme une responsabilité à protéger la Nature conférée par sa puissance technique qui, selon la vieille ambition de René Descartes (1596-1650), le rend désormais 'maître et possesseur' de celle-ci. Les écosystèmes artificiels dans les pays développés ne sont plus menacés par la Nature, mais la détruisent. Mais cette domination de la technique sur la Nature a une contrepartie: l'impact des activités anthropiques est si fort qu'il risque, par rétroaction, de fragiliser, voire de détruire nos écosystèmes artificiels.

L'exemple le plus manifeste de cette perception est le rôle des émissions anthropogéniques sur l'évolution du climat. La thèse est cohérente. Depuis la révolution industrielle, l'activité humaine réinjecte dans l'atmosphère du gaz carbonique autrefois piégé par la photosynthèse et 'fossilisé' sous forme de charbon ou de pétrole. L'utilisation de ces combustibles serait à l'origine d'une augmentation régulière du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère. Parallèlement, depuis plus d'un siècle la température moyenne augmente sur le globe. L'élévation du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère, dû au recours aux énergies fossiles, modifie son bilan radiatif. Comme ce système réagit avec des fortes hystérèses, il est à craindre que nous n'ayons pas encore subi l'impact des gigatonnes de gaz à effet de serre injectés dans l'atmosphère depuis des décennies. Le réchauffement futur serait donc certain.

Cet impact macroscopique fait l'objet de discussions acharnées entre les certitudes des uns, généralement les membres du Groupement intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), ultramajoritaires, et les autres. Pour la première fois de son histoire l'humanité discute de son impact sur un mégasystème naturel qu'est l'atmosphère. Conventions internationales, principes juridiques innovants sont autant de réponses à une crise qui n'est pas seulement factuelle, mais participe à une remise en question de notre modèle de développement. La notion de Développement durable cherchant à équilibrer les aspects économiques, sociaux et environnementaux du développement figurent parmi ces réponses.

Cette notion d'impact consacre aussi l'idée que les grands cycles biogéochimiques sont désormais inaptes à traiter les émissions polluantes. En effet, tant la quantité de ces émissions que leur qualité saturent les cycles naturels alors qu'auparavant celles-ci y étaient traitées sans aucune interrogation. De nombreux écologues soulignent les services rendus par cette nature que des économistes tentent de chiffrer monétairement. Ainsi, la rivière a toujours été présentée comme une source d'eau et un moyen de transport pour les populations qui s'installaient sur ses berges. Puis, elle a été vue comme un moyen d'éloigner et de traiter les pollutions.

Face aux bouleversements engendrés par la seconde révolution industrielle, après la Seconde guerre mondiale, il est nécessaire de concentrer ces processus biogéochimiques de traitement des nuisances dans le temps et dans l'espace. C'est le principe de la station d'épuration. Le modèle de référence de la réaction qui a suivi ce constat est la loi de 1976 sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Cette loi repose sur la notion d'impact qu'il est nécessaire de réduire. Elle organise la réglementation encadrant l'exercice d'une activité polluante. Une des caractéristiques de cette législation est le recours aux études d'impact. Cette approche repose sur des modèles mettant en rapport un organisme, écosystème, objet et un ... environnement, un milieu qui l'entoure. Traditionnellement, l'un et l'autre sont perçus comme interagissant ce qui conduit à l'inséparabilité d'un système et de son environnement. Or, la crise écologique révèle que ce dernier n'est plus seulement transformé, mais dégradé par l'activité du système. Cette conviction induit des politiques de l'environnement fondées sur la dépollution afin de limiter les impacts sur les milieux récepteurs.

Deux remarques permettent de souligner que les politiques de dépollution cherchant à limiter les impacts ne bouleversent pas fondamentalement nos pratiques sociales.

La première est que le souci de préserver le voisinage des nuisances générées par l'activité économique n'est pas une préoccupation nouvelle. Déjà Grecs et Romains adoptaient des réglementations sur les nuisances. En France, dès le Moyen Age, des mesures étaient prises pour préserver la salubrité des villes, gérer l'enlèvement des immondices et l'écoulement des eaux usées. La loi de 1976 sur les établissements classés en France a comme ancêtre avéré l'ordonnance du 30 avril 1663 réglementant les industries. Plus tard, le droit des établissements polluants fut modifié par la loi du 19 décembre 1917 relative aux établissements dangereux, insalubres ou incommodes et d'autres pour aboutir à la loi ICPE de 1976.

La seconde remarque est plus sensible. Elle repose sur l'idée que si l'organisme de référence est conçu de dimensions finies, le milieu dont il est séparé par une frontière, lui, est de dimensions infinies. C'est à dire qu'il est toujours possible d'y recourir à quelques précautions près, notamment la dépollution.

Or, la mutation que nos sociétés modernes, au sens philosophique du terme, ont réalisée est le basculement d'un monde conçu initialement comme infini dans un monde désormais perçu comme fini.

La législation n'a pas encore intégré cette révolution. Après bien des incertitudes et débats, la notion d'environnement est éludée par le Code de l'environnement. L'article L 110-1, figurant dans les principes généraux, énonce : «*Les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, la qualité de l'air, les espèces animales et végétales, la diversité et les équilibres biologiques auxquels ils participent font partie du patrimoine commun de la nation (...)*». L'environnement est donc assimilé à un milieu, à ce qui environne le créateur de pollutions qui détruisent cet environnement. Cette approche se révèle donc insatisfaisante car elle n'exprime pas la totalité des enjeux de la crise de l'environnement contemporaine. Elle a une autre dimension révélée par :

- la découverte de la finitude de l'écosphère déjà abordé;
- le recours à des SurEnvironnement comme fondement de nos pratiques sociales et cognitives.

1 : Approches 'milieu' et approches 'environnement'

a : Le SurEnvironnement

Les chapitres précédents ont abouti à la conclusion que sous le vocable 'environnement' s'amalgament des conceptions et des démarches aux motivations souvent antagonistes. La thèse développée dans ces lignes est que l'absence d'une organisation conceptuelle précise participe à cette confusion, le risque étant que les préoccupations bien réelles à l'origine de cette profusion d'idées et d'actions soient minimisées.

Parmi les différentes approches suggérées pour sérier ce concept ambivalent d'environnement, l'objet de cet ouvrage, dans une première étape, est de distinguer les enjeux relevant du binôme Etre/Milieu, de ceux fondés sur le trinôme Moi/Environnement/SurEnvironnement. Cette distinction induit une séparation entre des approches relatives à l'étude des milieux et celles concernant l'environnement. Pour les distinguer, nous les dénommons :

- 'approches milieux'
- 'approches environnementales'.

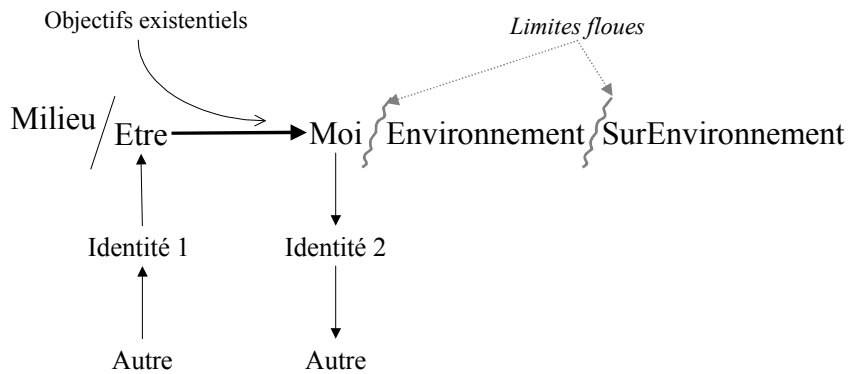
C'est la prérogative du discours scientifique de s'intéresser aux relations Etre/Milieu pour produire des connaissances. *A contrario* les rapports SurEnvironnement/Environnement/Moi obligent à créer de nouvelles grilles de lecture de l'environnement intégrant, sans prérogative hiérarchique, les connaissances issues des sciences de la nature aux discours des sciences humaines (droit, économie, sociologie, histoire, philosophie). Cela oblige à explorer de nouvelles méthodes de pensée fondées sur les notions de pluri- et transdisciplinarités reconnues déterminantes pour résoudre les problématiques associées à la crise écologique.

Ces dernières à l'origine des notions de Développement durable, d'écomanagement, d'écoproduction, d'écologie industrielle, etc., sont à l'origine d'une multitude de discours dont le mot 'environnement' est le plus petit commun dénominateur. Le discours sur l'environnement est multiforme et se nourrit de paradigmes différents quand ils ne sont pas antagonistes.

Les récents développements de la science, dont la thermodynamique ou les mathématiques, imposent d'introduire de nouvelles approches dont les termes d'écosystème, de flux, de structures de non-équilibre, de complexité, de linéarité, de non-linéarité, d'holisme, d'interactions, de couplages, d'incomplétude, d'indéterminisme, etc. structurent de nouveaux paradigmes.

Associés aux principaux enseignements de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs, et notamment au concept d'entropie, l'ensemble permet d'élaborer une nouvelle grille de lecture de la crise écologique et de formaliser la problématique fondamentale de l'environnement à partir du schéma et des assertions suivants.

Le modèle global se résume en une figure associant plusieurs mots-concepts et leurs définitions:



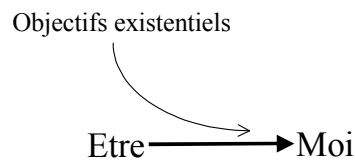
Dans un style télégraphique, nous tentons de les exposer en opérant quelques digressions. Affectés d'une majuscule, ils se distinguent des noms communs et ont le statut de nom propre. Ce modèle est le premier axe fort structurant le discours exposé dans ces lignes. Enfin, malgré tout le soin apporté à leur présentation, l'explication de ces concepts révèle la dimension réductrice de ce texte. Ils appellent de plus larges commentaires et discussions que les quelques phrases jetées sur ces pages. Leur but est néanmoins de proposer présentement le concept de SurEnvironnement pour définir une caractéristique fondamentale de la crise de l'environnement contemporaine dont ce livre est l'objet.

1) L'Être évoluant dans un Milieu est ce qui produit de l'existence pour l'Autre à travers une Identité1.

Autre → Identité 1 → Etre/Milieu

L'Être et le Milieu sont donc objets pour l'Autre. Ce dernier tente d'accéder à leur 'réalité' à travers une Identité1. De l'exactitude de ses représentations dépend sa survie instantanée et sur le long terme. Ainsi, pour un biologiste conçu comme Autre, la bactérie est l'Être qu'il étudie. Elle évolue dans un Milieu.

2) L'Être, quand il est une structure vivante dotée de la faculté de choisir, détermine des Objectifs Existentiels. La conjonction des Objectifs Existentiels et de l'Être s'exprime à travers le Moi. Le Moi est donc l'expression de l'Être et de ses Objectifs Existentiels. Le but primaire de toute structure vivante est de vivre.



3) Le Moi tend à être reconnu par l'Autre uniquement à travers une Identité2 voulue, alors que l'Identité1 est perçue. La seule ambition du Moi est d'être reconnu à travers ses Objectifs Existentiels. Aussi, le Moi se forge-t-il une Identité2 pour que son existence soit admise et reconnue par l'Autre (cette digression n'est pas fondamentale pour la grille de lecture qui est présentée dans ces lignes (a)).

Moi → Identité2 → Autre

4) L'Identité² voulue par le Moi est différente de l'Identité¹ perçue par l'Autre sur l'Être.

Identité¹ ≠ Identité²

Même remarque qu'en (a).

5) La réalisation des Objectifs Existentiels du Moi nécessite un Environnement, c'est à dire un espace noo-spatio-temporel de dimensions finies structuré et ordonné afin de favoriser son existence actuelle et future à travers la réalisation d'Objectifs Existentiels. L'Environnement est ce qui permet l'épanouissement du Moi, aussi le protège-t-il. Pour entretenir la dualité Moi/Environnement, le Moi doit trouver les ressources nécessaires à son développement et à la construction de son Environnement, mais aussi évacuer tout ce qui fragilise le couple Moi/Environnement.

Tout système vivant se caractérise par des échanges permanents avec l'extérieur de celui-ci. Aussi, le SurEnvironnement, contrairement à l'Environnement, est taillable et corvéable à merci. C'est ce qui n'existe pas et qui pourtant se révèle nécessaire. C'est ce constat qui caractérise la crise de l'environnement contemporaine. Ce SurEnvironnement est pour le Moi exploitable sans limites. A ce titre, il est le réceptacle aux déchets produits par l'ensemble Moi-Environnement.

L'Environnement s'intercale donc entre le Moi et le Sur-Environnement. Il est structuré aux fins de favoriser la réalisation des Objectifs Existentiels portés par le Moi. Selon l'ambition de ces Objectifs Existentiels, le Moi devra élaborer une structure, un Environnement, plus ou moins complexe. Le niveau de structuration de l'Environnement dépend donc de la nature des Objectifs Existentiels à réaliser. L'Environnement nécessaire pour le Moi dont l'Objectif existentiel est d'aller sur la Lune n'est pas le même que celui d'un cueilleur de fraises des bois.

6) A la permanence d'une ligne mathématique est opposée la notion de "Limites floues", car cet état n'est pas figé temporellement, ni spatialement. Les contraintes exercées par le Milieu sur l'Etre se modifient sans cesse, obligeant celui-ci à changer ses Objectifs Existentiels, donc le Moi qui les réalise. Des limites existent donc, mais leur tracé est incertain car les périmètres respectifs du Moi et de l'Environnement évoluent sans cesse.

Malgré ces réserves, le constat s'impose que le Moi protège son Environnement. Sans lui, pas de réalisation d'Objectifs Existentiels. Sans cet Environnement, comment le Moi pourrait-il être reconnu par l'Autre en tant que Moi ? Détruire l'Environnement du Moi, c'est nier son désir d'existence, car sans cet Environnement, il est dans l'incapacité de réaliser ses Objectifs Existentiels. Le SurEnvironnement est donc tout ce qui n'est ni le Moi, ni l'Environnement. Pour le Moi, l'Environnement doit être structuré pour réaliser les Objectifs existentiels qui le fondent. Quant au SurEnvironnement, qu'importe...

Selon cette approche fondée sur des nouveaux concepts, et bien qu'utilisant des bases phonétiques connues, il existe donc une différence forte entre la notion de Milieu et celle d'Environnement.

b : Le Milieu et l'Environnement

On parlera de Milieu pour décrire l'espace multidimensionnel dans lequel évolue un Etre. Le Milieu s'impose donc à l'Etre, sa modification transformant les conditions d'existence de l'Etre. Une autre façon de décrire l'ensemble Etre et Milieu est d'utiliser des termes issus de l'écologie en distinguant système/asystème; l'asystème étant le Milieu.

Nous évitons volontairement de recourir au terme d'environnement, alors que c'est ainsi que la littérature désigne ce qui entoure... L'influence de l'Être sur le Milieu est faible car dès que celle-ci atteint un niveau critique lui conférant une capacité à le modifier, le Milieu devient alors Environnement dès lors que cette évolution contribue à renforcer les conditions d'existence de l'Être réalisant ses Objectifs existentiels, c'est à dire le Moi.

Nous nous retrouvons par conséquent, au sein d'une même entité conceptuelle: l'environnement, en présence d'une séparation nette entre l'évolution-dégradation du Milieu et la construction d'un Environnement. Cette dégradation du Milieu correspond à la modification de l'asystème faisant référence à un système auquel nous avons attribué une existence par l'activité d'une conscience distinguant dans des phénomènes un ensemble homogène de ce qui l'entoure. La construction et l'entretien de l'Environnement sont à distinguer conceptuellement des évolutions-dégradations du Milieu. Ces dernières ne sont, par conséquent, qu'une partie de ce que recouvre la conception actuelle des problématiques de l'environnement.

Tout organisme vivant a besoin de s'alimenter, de se protéger, mais aussi d'éliminer des déchets. Ces fonctions physiologiques primaires s'imposent à tous. La structuration d'un Environnement est alors indispensable pour réaliser les fonctions vitales d'alimentation et de protection. Mais le SurEnvironnement est tout aussi essentiel pour recevoir les déchets. Ces derniers sont toujours exportés dans le SurEnvironnement car leur accumulation dans l'Environnement risquerait de détruire l'organisme qui les produit. Mais, alors que l'Environnement est fini, le SurEnvironnement est infini. Or, l'évolution de l'écosphère fait qu'il n'existe plus aucun endroit au monde où il soit possible de déverser des déchets sans polluer, au sens anthropique, quelqu'un. Polluer a une autre signification que dégrader un milieu. Il s'agit d'une action qui altère le cadre de vie, c'est à dire l'Environnement d'autres Moi.

Le grand paradoxe que les environnementalistes ont à surmonter est de lutter contre les pollutions, alors qu'empêchés de rejeter leurs déchets, les organismes pollueurs périraient. Un essai de définition du 'problème d'environnement' doit donc être envisagé à la lueur de ces nouvelles conceptualisations.

c : Catégories des 'problématiques' de l'environnement

Sur le fondement des définitions avancées ci-avant, les questions d'environnement relèvent:

- soit de la dégradation d'un Milieu affectant les conditions d'existence d'un Etre,
- soit d'un conflit entre deux Moi par référence à un noo-espace-temps qui représente, pour un des deux Moi, un Environnement, pour l'autre Moi, un SurEnvironnement.

A cet espace-temps s'ajoute, dans le cas de l'homme, tout ce que celui-ci produit comme idéologies, philosophies, cadres spirituels dans lesquels évoluent des Moi. L'Environnement et le SurEnvironnement sont par conséquent définissables en termes d'espaces; c'est le lieu géographique, la région, le pays, etc.: l'espace physique du Moi. En termes de temps; le passé, le présent, le futur, c'est à dire la dimension temporelle de l'Environnement. En termes spirituels; ce sont les philosophies, les religions, les idéologies auxquelles ont croit, que l'on respecte, qui guident la conduite des Moi. L'expression "noo-espace-temps" comprend ces trois aspects que l'on retrouve liés dans l'Environnement, c'est à dire l'aspect spatial, l'aspect temporel et l'aspect spirituel.

La dimension spirituelle de notre humanité est exprimée par le terme "noosphère" ou sphère de l'esprit. Elle se scinde en une multitude de nootopes. A la biosphère; en écologie l'ensemble des formes vivantes, est opposé le biotope; un ensemble de facteurs climatiques et géographiques s'intégrant dans un paysage.

La noosphère est un terme utilisé pour décrire la sphère de l'esprit, c'est à dire tout ce qui est produit par l'esprit humain et qui contribue ainsi à la modification des données naturelles de la planète.

A la lueur des Nouveaux Concepts, les problématiques de l'environnement admises communément sont scindables en deux catégories:

- celles relevant de la relation Etre / Milieu;
- celles relevant de la relation
Moi / Environnement / SurEnvironnement.

Parler de “problématique de l'Environnement” nécessite la présence simultanée de deux Moi et d'un unique noo-espace-temps considéré séparément comme Environnement ou comme SurEnvironnement par chacun des Moi en référence. Ainsi, la terminologie proposée ici considère que le Milieu est une entité faisant référence à l'Etre qui évolue dans celui-ci. Le Milieu d'un Etre -notion objective car Milieu et Etre sont alors considérés comme objets de connaissance pour l'Autre- est ce qui intervient constamment dans l'existence de l'Etre. La modification de ce Milieu provoque un changement dans les conditions d'existence de l'Etre et dans sa nature propre. Ce changement entraîne parfois la mort de l'Etre, car l'Etre et le Milieu sont en interactions incessantes. L'Etre agit sur le Milieu et réciproquement, mais ces changements ne s'opèrent qu'à la marge. Le Milieu est donc donné à l'Etre. L'Environnement fait référence à un Moi. L'Etre ne choisit pas son Milieu et même parfois le subit. En revanche, l'Environnement est le résultat des choix existentiels d'un Etre qui trouve son expression dans le Moi.

La pollution par le plomb d'origine anthropique, injecté dans l'atmosphère urbaine, est un bouleversement du Milieu qui modifie les conditions d'existence des Etre qui y évoluent.

Au contraire, selon les Nouveaux Concepts, la disparition des ours en France est un problème d'Environnement car de la survie de cet animal ne dépend pas la survie des hommes qui vivent près de lui. Selon l'approche proposée dans ces lignes, ceux-ci, comme les loups d'ailleurs, font partie de l'Environnement spirituel d'un ou de plusieurs Moi, mais aussi du SurEnvironnement d'autres Moi. Tout noo-espace-temps est par conséquent à la fois Milieu, Environnement et SurEnvironnement.

Cet essai de définition a pour ambition de distinguer deux approches possibles d'une même problématique regroupée jusqu'alors dans une même expression : "problème d'environnement". Cependant, la distinction, quoique facile à faire d'un point de vue formel, est beaucoup plus délicate dans la pratique. Problème de Milieu et problème d'Environnement recourent parfois une même réalité. Toutes les approches intégrant plus ou moins les deux notions sont par conséquent possibles. Par ailleurs, ce développement n'est valable que dans la mesure où les problèmes de Milieu, à l'instar des problèmes d'Environnement, font référence à l'homme. C'est la seule condition préliminaire.

On citera comme exemple pour éclaircir ces propositions, l'ambiguïté soulevée par l'expression "pollution volcanique". Les définitions utilisées pour caractériser les concepts d'environnement ou de pollution sont insatisfaisantes, car elles ne rendent pas compte que la dégradation de l'environnement et la pollution sont les résultantes des activités anthropiques. Sinon quelle différence conceptuelle établir entre l'émission de dioxyde de soufre dans l'atmosphère à la suite d'une éruption volcanique et celle consécutive à l'exploitation de centrales thermiques ? Le résultat est strictement le même, mais dans le premier cas il s'agit d'un phénomène naturel alors que dans l'autre, l'homme en est à l'origine.

La dégradation ou la transformation d'un Milieu induit parfois la modification profonde de l'Être qui évolue en son sein, cette modification pouvant conduire à une issue fatale. Or, cette conséquence se produit parfois sans que la prise de conscience de l'Être concernant ce phénomène soit établie. La pollution de l'air ou de l'eau par le plomb a des conséquences fâcheuses pour les organismes sans que ceux-ci soient conscients des effets que l'ingestion de cet élément chimique provoque sur leur métabolisme.

Le problème de Milieu est par conséquent une conscience que l'Autre a de l'objet de son attention et qui, par l'introduction d'un facteur nouveau, entraîne une transformation du Milieu avec comme conséquence un changement dans la nature de l'Être. Ce changement pouvant être minime ou bien fatal. Seul l'Autre en est conscient dans ce cas. Les modifications du couple Être/Milieu ne sont que des modifications de l'objet de la conscience de l'Autre.

Dans l'hypothèse d'un problème d'Environnement, nous quittons le monde de l'objet pour rentrer dans le monde du sujet et des sujets. Le problème d'Environnement est pour le Moi la destruction de son cadre noo-spatio-temporel par les nuisances d'un autre Moi (après avoir exposé les apports conceptuels de la thermodynamique moderne, ce modèle sera complété en recourant à la notion d'entropie). Le conflit est inévitable car il n'est jamais agréable pour un Moi de voir son existence remise en question par les activités d'autres Moi prenant les fondements de la réalisation de ses Objectifs Existentiels pour un dépotoir, c'est à dire un SurEnvironnement.

La première critique que l'on pourrait porter à cette organisation du concept 'environnement' est d'être intemporelle. En effet, les communautés humaines se sont toujours développées dans des Milieu d'une part et par la construction d'Environnement d'autre part.

La conclusion qui s'impose alors est que la fin du deuxième millénaire n'aurait rien apporté de fondamental avec l'émergence des préoccupations environnementales, sinon une acuité particulière concernant la dégradation de la biosphère. Or, nous voudrions exposer une autre idée fondamentale pour les environmentalistes: la découverte de la finitude de cette écosphère d'un point de vue physique qui entraîne la disparition des SurEnvironnement tant sur le plan physique que moral.

3 : La disparition des SurEnvironnement

La crise de l'environnement est née de la découverte de la finitude de l'écosphère et du constat de la disparition des SurEnvironnement. Cependant, cette disparition des SurEnvironnement est loin d'être intégrée à nos réflexions. La majorité de nos pratiques sociales reposent encore dessus. Néanmoins, l'artificialisation de l'ensemble de l'écosphère et la crise de l'environnement qu'elle a induite favorisent l'émergence d'une nouvelle morale fondée sur la suppression des SurEnvironnement comme fondement du développement.

Cette évolution est due à des changements essentiels survenus aux cours de la seconde moitié du XXème siècle. Parmi les principaux, nous citerons l'explosion démographique qui fait que chaque espace est occupé par des hommes et que la nature sauvage, jusqu'alors conçue comme le SurEnvironnement fondamental, est désormais encadrée par un arsenal législatif répressif pour pouvoir survivre. En outre, la médiatisation généralisée de l'actualité de la planète participe à l'intégration du reste du monde dans nos Environnement. Cette évolution de l'écosphère a favorisé l'émergence de cette nouvelle morale qui refuse de favoriser le développement des uns au détriment des autres. Elle s'exprime dans le concept de Développement durable qui étaye désormais toute la législation relative à l'environnement, mais intègre aussi les aspects économiques et sociaux de nos pratiques.

Face à la finitude révélée de notre planète obligeant à admettre qu'il n'y a plus de SurEnvironnement, chaque Moi est soumis à une conscience universelle exprimée par la législation lui interdisant d'entrevoir l'infinité d'un SurEnvironnement pour assurer la réalisation de ses Objectifs Existentiels à partir de la structuration d'un Environnement choisi. Or, un rapide parcours de la philosophie occidentale montre que le modèle de développement occidental est fondé sur l'existence de SurEnvironnement dont les manifestations sont multiples, mais dont l'antagonisme Homme-Nature ou plutôt Culture-Nature en est l'expression la plus aboutie. 3000 années d'organisation philosophique sont délicates à bouleverser en quelques décennies. La philosophie grecque a créé la notion de nature (*physis*), objet de la philosophie. La religion judéo-chrétienne a consacré la primauté de l'homme sur cette nature. L'une et l'autre ont par conséquent favorisé la création de SurEnvironnement. Aussi, pour l'environnementaliste, l'histoire de la philosophie occidentale est l'histoire d'une rupture Nature/Culture que l'artificialisation de l'ensemble de l'écosphère et la crise de l'environnement qu'elle a induite obligent à interroger. D'occidentale, la problématique est devenue mondiale dans la mesure où nos pratiques sociales sont devenues la référence absolue pour l'humanité entière. La mutation qu'opèrent la Chine et l'Inde, civilisations millénaires, en est la preuve.

Cette suppression des SurEnvironnement soulève une problématique nouvelle. Comment assurer la pérennité de nos Environnement alors que le noo-espace-temps susceptible de supporter des SurEnvironnement s'est singulièrement restreint depuis plusieurs années ?

Nous aboutissons ainsi à une définition de la problématique de l'environnement se distinguant des problématiques du Milieu consubstantielles à toutes entités vivantes. Il s'agit alors de déterminer les conditions de gestion des SurEnvironnement, donc leur intégration aux Environnement.

C'est dans ces termes que se pose la problématique de la réintégration des éléments naturels dans la sphère de nos Environnement. Ainsi, le retour de la grande faune sauvage en France n'est pas la conséquence de politiques utilitaristes, mais plutôt le résultat d'un changement de perceptions des ours et des loups dans la culture française. La dimension noosphérique de l'Environnement s'en trouve renforcée.

Les assureurs ont contribué à souligner l'importance de la notion de dommage écologique pur qui concerne la nature au sens juridique. Auparavant, cependant, de nombreux auteurs avaient perçu que de cette conception de la Nature dépendait le rapport que l'Homme établissait avec elle. Comment alors, à travers un exemple simple, montrer les différences entre le Milieu et l'Environnement/SurEnvironnement ? Prenons l'exemple d'une maison où habite une famille.

Celle-ci est construite pour permettre à cette famille de vivre; bien si possible. Elle est le résultat d'une action volontaire, c'est donc un Environnement mais dont toutes les composantes ne sont pas maîtrisées: le climat, les voisins, la ville, etc. Tout ce sur quoi la famille a peu d'influence, est le Milieu. Où se situe le SurEnvironnement alors ? Ailleurs. Par exemple, il commence dans la cuisine et plus particulièrement dans l'évier qui évacue salissures de tous ordres; dans les toilettes qui servent parfois à éliminer un peu de peinture ou d'autres déchets dont cet endroit n'est pas la destination. Et puis il y a les poubelles qui recueillent les miasmes de toute nature et participent au rangement en éliminant ce qui ne sert plus à rien; les fenêtres qui évacuent les mauvaises odeurs dans l'infini et permettent le renouvellement de l'air, etc. Une famille vivant dans une maison, c'est à la fois un système intégré à un Milieu: l'Etre, objet d'études, mais aussi un Moi dont l'ambition de vivre nécessite un Environnement, localement une maison dont l'entretien est garanti par le recours à un SurEnvironnement. Mais il y a les voisins...

Pour résumer, la thèse développée dans ce livre est que l'environnement aujourd'hui n'est pas réductible à l'aménagement, à l'hygiène, à la conservation qui furent les attitudes historiques traditionnelles développées pour organiser... l'environnement. L'utilité de ces réponses n'est pas contestable, mais au cours de années 1970, une nouvelle conception des problématiques associées au vocable environnement est apparue. Elle est fondée sur la notion d'impact d'une structure sur son entourage. Elle aussi cependant révèle vite ses limites pour obliger à la transcender et à engendrer une seconde approche. Pour qualifier dès à présent ces deux approches nous utiliserons l'expression de Milieu pour les typologies d'approches fondées sur la conception de l'environnement reposant sur l'impact, pour réserver l'usage du mot environnement aux problématiques réellement nouvelles. Approches 'milieu' et approches 'environnementales' sont les deux axes autour desquels est construit ce texte.

L'artificialisation croissante de l'écosphère par la croissance démographique d'une part, et le développement économique d'autre part, confronte cette artificialisation à des limites écosystémiques. Le défi des environnementalistes, sous l'éclairage de ces concepts, est par conséquent de garantir à tout système vivant la possibilité d'exister, mais en supprimant les impacts délétères sur le Milieu et/ou le recours à un SurEnvironnement.

Deux approches recouvrent donc la notion d'environnement.

La première a comme pierre angulaire la notion d'impact avec comme caractéristique à la fin du deuxième millénaire que les activités anthropiques altèrent d'une manière irréversible les grands cycles biogéochimiques. La réponse politique à cet aspect de la crise de l'environnement est la limitation des impacts par un encadrement réglementaire des activités polluantes, dont la loi de 1976 sur les établissements classés est la référence, ou par l'introduction de principes juridiques innovants dans le droit positif. Nous qualifions cette approche, d'approche 'milieu'.

La seconde déborde la dimension impactante des activités anthropiques pour obliger à créer une nouvelle grille de lecture des problématiques de l'environnement fondée sur le néoconcept de SurEnvironnement. Là est l'originalité de la crise de l'environnement contemporaine. Nous la qualifions d'approche 'environnement'.

4 : L'intégration des SurEnvironnement

Les défis de l'approche 'environnement' consistent donc à (ré)intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives. Cela oblige à développer un paradigme apte à favoriser le développement de grilles de lecture intégrant cette exigence. C'est la définition que nous proposons de la problématique de l'environnement, en soulignant qu'il n'y a plus de SurEnvironnement. Or, le modèle socio-économique qui s'est élaboré depuis 3000 années de civilisation fondée sur la philosophie grecque et la religion judéo-chrétienne a rompu avec l'ancienne alliance Homme-Nature pour concevoir les SurEnvironnement comme fondement du développement, c'est à dire l'artificialisation des écosystèmes.

Ce développement repose sur l'idée d'infini, caractéristique majeure du SurEnvironnement. Ce dernier fournit les ressources et reçoit les déchets issus de l'activité de nos écosystèmes artificialisés.

Aussi, toutes les initiatives fondées sur la notion d'empreinte écologique, de développement durable, d'écologie industrielle, etc. utilisant des mots préfixés par 'éco' ont pour vocation à participer à la diminution des impacts, mais surtout à la réintégration des SurEnvironnement dans nos pratiques sociales. Ecoconception, écoproduction, écomarketing, etc. et toutes les techniques développées dans le cadre de l'écomanagement tendent vers ce but.

Tous les néologismes qui ont ponctué l'histoire de l'environnement depuis plus de trente années expriment cette volonté d'intégration des SurEnvironnement aux Environnement et donc la suppression de ceux-ci comme support-exutoire du développement. Y recourir prouvent que ceux-ci ont pour vocation d'exprimer autre chose que l'hygiène du milieu, son aménagement et même la dépollution.

Face à la globalisation, à la découverte de la finitude de notre monde, à l'émergence d'un village planétaire, le concept de Développement durable remet sciemment en question un modèle de développement bâti au détriment de SurEnvironnement. Tous les travaux sur le Développement durable traduisent une volonté institutionnelle de concevoir le développement de l'humanité dans une perspective géographique finie et surtout de ne pas faire supporter à des SurEnvironnement les conditions de la réalisation des objectifs existentiels de Moi et de l'entretien de leurs Environnement. Cette approche suggère par conséquent que les développements futurs ne se fassent plus à partir du dualisme Environnement/SurEnvironnement, mais par la suppression de ce dernier pour l'ensemble des noo-espace-temps. Les travaux faits sur le Développement durable expriment la volonté de concevoir le développement de l'humanité dans une perspective noo-spatio-temporelle finie qui intègre les SurEnvironnement aux Environnement des Moi dominants.

Les volontés d'internalisation des coûts sociaux sur le plan économique, l'extension de la notion de tiers sur la plan juridique, l'élargissement de la dimension temporelle des politiques figurent parmi les manifestations les plus révélatrices de cette évolution, même si elles sont encore très anthropocentrées. Elles se résument par la volonté d'intégrer les SurEnvironnement dans le noo-espace-temps de chaque Moi/Environnement.

Toute problématique de l'environnement se résume alors à déterminer la réalisabilité et les conditions d'intégration des SurEnvironnement dans nos Environnement, étant établi que nos sociétés modernes rendues responsables de la crise de l'environnement se sont élaborées à partir du dualisme Environnement/SurEnvironnement.

La crise de l'environnement n'est donc pas seulement à l'origine d'une extension des pratiques hygiénistes ou d'aménagement confrontés à la saturation des écosystèmes par le développement économique ou démographique. Elle conduit à modifier profondément notre rapport à la connaissance et à nos pratiques sociales.

Le recours au dualisme Environnement/SurEnvironnement permet alors d'entrevoir les modifications que cette crise de l'environnement induit. Cela se traduit par la volonté d'intégrer les SurEnvironnement de nos pratiques sociales, mais aussi par une remise en question des philosophies morales et naturelles dominantes fondées sur le recours à l'infini comme conditions de création et d'entretien d'Environnement.

La conclusion de ce chapitre est que l'enjeu contemporain de la crise de l'environnement est de déterminer les conditions d'intégration des SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives. Est-il alors possible de favoriser une croissance globale de l'artificialisation des écosystèmes garante de notre survie en rompant avec ces pratiques ? Les assureurs confrontés aux enjeux de l'environnement ont participé à cette problématisation en précisant de nombreux concepts usuels et en permettant de souligner que le SurEnvironnement fondamental que le modèle occidental a créé est la Nature au sens juridique, *res nullius*, les choses nulles ou biens inappropriés.

5 : Du SurEnvironnement au dommage écologique pur

En juin 1992 à Rio de Janeiro, les participants au Sommet de la Terre soulignaient la nécessité de prendre en compte l'environnement comme facteur incontournable du développement économique et social, consacrant à cette occasion la notion de Développement durable. A la même époque, au début de l'année 1993, les principaux réassureurs opérant en France annoncèrent aux sociétés d'assurance qu'ils ne renouvèleraient pas au 1er janvier 1994 les dispositions des traités de réassurances concernant le risque 'environnement'. Par cette décision, ils exprimaient leur refus de s'engager résolument dans l'assurance des atteintes à l'environnement.

Cette attitude des assureurs et l'émergence concomitante du concept de Développement durable révèlent un antagonisme opposant en quelque sorte un monde réel, pratiqué par les assureurs, à un monde nécessaire élaboré au cours de grandes manifestations internationales. Il souligne les difficultés soulevées par des conceptions divergentes de la prise en compte de l'environnement, mais surtout les obstacles techniques rencontrés pour réaliser les but des environnementalistes recherchant les conditions d'intégration des SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives.

Ces obstacles sont le produit d'une histoire dont l'aboutissement est l'ensemble des écosystèmes artificiels rendus responsables de la crise de l'environnement et dont le concept de Développement durable, aujourd'hui, est une tentative de solution. Mais alors que ces lignes tentent d'apporter leur écot à la résolution des problématiques de l'environnement et au Développement durable, préoccupations récentes, la pratique assurantielle a plus de 3000 années d'existence. Les historiens considèrent que les premiers systèmes d'assurance datent de l'époque de la construction des pyramides en Egypte.

Le concept d'assurance est aujourd'hui bien défini. Toutes les définitions utilisées rendent compte du même objectif: garantir par une mutualisation les conséquences financières de sinistres affectant des personnes ou des objets assurables. Ce modèle répond bien aux nécessités de gestion et de durabilité des écosystèmes artificiels dont le fonctionnement repose sur des règles juridiques dont la propriété est le pivot.

Pour l'assureur, est assurable ce qui est susceptible... de répondre aux critères de l'assurabilité. L'opération d'assurance détermine donc un espace d'optimisation économique de la socialisation de la gestion de certaines catégories de risques: les risques assurables.

L'étude de l'apport des techniques d'assurance à l'internalisation des dommages environnementaux montre que l'assureur participe partiellement à cette internalisation, mais son champ d'intervention est limité à la sphère des écosystèmes artificialisés. Aussi, l'espace d'intervention de l'assureur dans le domaine de l'environnement est volontairement limité en raison du cadre juridique, économique et technique dans lequel il évolue. Celui-ci ne permet pas, en l'état, d'internaliser les destructions accidentelles du "stock de capital naturel". Or, celui-ci est identifiable au SurEnvironnement dont nous avons vu qu'il est à la fois essentiel dans le modèle de développement critiqué au nom de l'environnement, et donc qu'il est la pierre angulaire d'une réelle qualification des enjeux contemporains de la crise de l'environnement.

Les expériences américaines et allemandes sur l'indemnisation des dommages à l'environnement et les risques qu'elle fit courir aux assureurs opérant dans ces pays, ainsi que les incertitudes juridiques spécifiques à la France, furent les principales raisons qui les amenèrent à isoler ce risque des garanties de base Incendie et Responsabilités civiles. Jusqu'à la crise de 1993, les assureurs n'avaient pas bien identifié le risque 'atteintes à l'environnement' et le garantissaient sans traitement particulier à travers ces deux garanties.

La prudence de la profession suscita une multitude de réactions révélatrices de l'expectative des assureurs face à ce risque, désormais bien identifié, mais à l'origine de nombreuses interrogations. La principale fut l'absence d'un concept 'environnement' précis. Pour suppléer cette carence, les assureurs ont créé leurs propres définitions de l'atteinte à l'environnement et de la pollution distinguant la pollution accidentelle, la pollution graduelle, la pollution chronique autorisée, la pollution historique, la pollution volontaire et la pollution future. Ce faisant, ils ont identifié un certain nombre de problématiques non encore résolues à ce jour. Les plus importantes sont:

- la quantification et la qualification des dommages à l'environnement,
- les régimes de prescriptions applicables,
- les rapports entre les seuils réglementaires et les engagements de responsabilité civile,
- l'alternative entre un régime de responsabilité civile classique fondé sur la notion de faute et un régime de responsabilité civile objectif fondé sur la notion de dommage,
- mais surtout la notion de dommage écologique pur qui est au cœur de l'économie de l'environnement.

Sur le plan juridique, la problématique la plus importante est donc la qualification précise du dommage à l'environnement, une distinction étant faite entre les dommages causés à des biens patrimoniaux et ceux échappant à la sphère marchande, qui par conséquent ne peuvent faire l'objet d'aucune estimation monétaire. Alors que les premiers ne soulèvent pas de difficultés insurmontables pour les estimer selon les pratiques actuelles, ce qui permet aux assureurs de les intégrer dans le champ de l'assurable, les seconds relevant de la qualification de dommages écologiques purs affectant des biens inappropriés constitutifs du capital naturel, sont actuellement exclus des conventions d'assurance en raison de leur non reconnaissance par le droit commun.

L'analyse de la jurisprudence dans ce domaine aboutit à la conclusion que l'environnement, assimilé au statut juridique de *res nullius*, est peu ou pas pris en compte comme base d'indemnisation. Cette carence des pratiques juridiques nationales est à l'origine, à l'échelle internationale, de l'adoption de textes volontaristes dédiés à l'indemnisation de la totalité des dommages à l'environnement. On citera comme dernier exemple la Directive relative à la prévention et à la réparation des dommages environnementaux adoptée en avril 2004 après vingt années de discussions au sein des institutions européennes. Celle-ci prévoit la prise en compte possible des dommages à la biodiversité. A ce jour, elle est la dernière tentative pour intégrer la nature dans des principes d'indemnisation après d'autres tentatives avortées.

Cette distorsion entre une pratique juridique nationale restrictive, issue d'une histoire, et une volonté politique exprimée par des textes internationaux crée une incertitude que les assureurs ne peuvent et ne veulent pas gérer. De plus, l'absence de reconnaissance juridique limite l'estimation économique et par conséquent rend l'évaluation statistique et monétaire du risque incertaine. Les quelques éléments disponibles pour estimer les dommages à l'environnement sont révélateurs de la faiblesse de ceux-ci ou alors de leur mauvaise appréciation. Or, stabilité juridique, estimation économique et évaluation technique du risque sont indispensables à l'assureur pour exercer son métier. Le risque d'atteintes à l'environnement, pour le moment, étant inaccessible à leurs méthodes, les assureurs ont préféré isoler celui-ci, le sérier et le traiter conformément à leurs usages, créant leurs propres définitions et concepts. Ceux-ci permettent de préciser ce qui rentre dans le champ de l'assurable et ce qui ne peut en l'état y être éligible.

Les assureurs pratiquent leur métier à partir de branches d'assurances inscrites dans le Code des assurances fondées sur des catégories admises par le droit:

- les hommes (assurance-vie)
- les choses (assurances Incendie, Accident, Risques Divers)

Cette distinction juridique trouve son origine dans les réflexions des philosophes et notamment d'Emmanuel Kant (1724-1804) qui distinguent les personnes, des choses. Dans les "Fondements de la métaphysique des mœurs", E. Kant met les objets naturels au rang des instruments quand ils sont utilisables. Quant à ceux qui ne sont pas utilisables, ils ne sont rien. Le Code civil de 1804 consacre cette distinction entre personnes et choses en leur associant les principes de responsabilité délictuelle, quasi délictuelle reposant sur la capacité à être une personne et à posséder des choses.... dont on est aussi responsable. Conçu comme le fondement de la liberté et de la démocratie, le droit de propriété a fait l'objet d'innombrables débats et de controverses avec aujourd'hui les problématiques de l'environnement en toile de fond. Celui-ci relevant, *a priori*, de la catégorie des choses, les assureurs, se fondant sur la pratique judiciaire, distinguent alors les biens relevant du statut de *res propriae* (biens appropriés) de celui de *res nullius* (biens inappropriés).

L'assureur, en tant qu'acteur social fort de nos sociétés, est sollicité pour participer à l'intégration de l'environnement dans les activités des sociétés modernes. Or, celles-ci ne lui fournissent pas le cadre lui permettant d'exercer son métier. Un des points d'achoppement est celui posé par l'indemnisation des dommages écologiques purs. Il suppose une intégration de la nature dans la sphère des activités humaines, alors que toute notre civilisation s'est forgée à partir d'une rupture avec ce monde naturel.

Les philosophes de l'environnement montrent que cette séparation a commencé avec leurs prédécesseurs de la Grèce antique, avec l'ancien testament pour, à travers René Descartes (1596-1650), Francis Bacon (1560-1626) et d'autres, aboutir au Code civil et à l'exclusion de la Nature comme objet du droit commun. Or, cette nature est le SurEnvironnement fondamental que nos sociétés ont créé sous le qualificatif de 'choses nulles'.

Changer d'attitude suppose, à l'échelle macroscopique, une intégration de la Nature dans la sphère des activités humaines, alors que toute la civilisation rendue responsable de la crise de l'environnement s'est forgée à partir d'une rupture avec ce monde naturel, donc la création d'un SurEnvironnement. Il est alors possible d'entrevoir l'histoire de notre modèle de civilisation comme une évolution dont le but est de fonctionner à partir de SurEnvironnement, que ce soit à l'échelle individuelle, régionale ou mondiale, ce modèle ayant acquis une suprématie due à son efficacité politique à éliminer les autres modèles.

Ainsi, les obstacles rencontrés par les assureurs pour garantir les atteintes à l'environnement et notamment le dommage écologique pur, participent à une consolidation du concept de SurEnvironnement. Mais cette clarification philosophique ne facilite pas pour autant l'intégration des SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives confrontés que nous sommes à la finitude de l'écosphère. Le paradigme dans lequel se sont édifiées nos pratiques sociales fondées sur le recours à des SurEnvironnement se révèle inadapté aux nouveaux défis associés à la crise écologique contemporaine. Aussi, la nécessité d'un changement de paradigme est devenue une antienne des environmentalistes et des scientifiques partageant leurs vues.

Partie II

Vers une épistémologie de l'environnement

Après que la première partie ait été développée à partir du concept de SurEnvironnement et de la définition qui caractérise les enjeux contemporains de la crise de l'environnement, - intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives-, la seconde s'articule à partir de l'antagonisme opposant le paradigme classique au paradigme écosystémique.

A : Le paradigme

Bien qu'en progrès, surtout chez les environmentalistes, la notion de paradigme est peu répandue dans la littérature scientifique française alors que la référence à ce mot est régulière dans la littérature anglo-saxonne. Cela ne signifie pas qu'il n'existe pas d'études ou d'ouvrages sur ce concept, mais sa notoriété est limitée à ceux qui en font un objet d'étude. Le paradigme classique serait si bien intégré dans la culture française qui l'a formalisé par les réflexions de Pierre-Simon Laplace (1749-1827) et d'Auguste Comte (1798-1857), qu'il est rarement envisagé que d'autres paradigmes puissent participer à l'élaboration de connaissances ou de discours en rupture avec ceux forgés à partir des éléments de celui-ci. La structure de ce texte reposant sur l'articulation entre le paradigme classique et le paradigme écosystémique, il est souhaitable de saisir l'histoire de ce mot.

Plusieurs conceptions s'opposent. Ainsi, sa première signification est issue de l'œuvre de Platon (-428/-347). Il a alors un sens pédagogique et propédeutique. Le paradigme est l'objet «facile» sur lequel on s'exerce avant de traiter d'un objet ressemblant au premier, mais plus difficile. Est paradigme ce que l'on montre à titre d'exemple.

L'historien des sciences et épistémologue Thomas Kuhn (1922-1996) utilise à son tour le terme de paradigme pour rendre compte de la manière dont se développent les sciences.

Dans son ouvrage sur la Structure des révolutions scientifiques (traduction française, Paris, 1972), il caractérise comme paradigme de la science à une époque donnée un ensemble de convictions qui sont partagées par des communautés scientifiques. Le paradigme est alors l'unité de base qui permet d'élaborer des épistémologies, discipline qui porte sur l'étude des paradigmes que Th. Kuhn définit comme *“les règles admises et intériorisées comme “normes” par la communauté scientifique à un moment donné de son histoire pour délimiter et problématiser les faits qu'elle juge dignes d'étude”*.

Dans le prolongement de cette approche, nous définirons le paradigme comme: *“un ensemble d'assertions irréductibles, non démontrables et admises comme vraies qui participent à la construction de connaissances ou de discours - selon que l'on est positiviste ou constructiviste- et à l'élaboration de pratiques”*.

Cette définition du paradigme oblige à préciser quelques points.

Le premier est que chaque paradigme est le sous-système d'un autre paradigme plus large. Il n'y a donc pas un ou deux paradigmes, mais des dizaines voire plus. Le choix fait dans cet ouvrage est de les réduire à deux.

Le second point est que l'élaboration d'un paradigme se fait à partir de choix épistémologiques entre des assertions le structurant. La notion d'assertion suppose comme préalable la détermination d'une binarité de propositions antagonistes qui obligent à opérer un choix sur la base de cette polarité.

Prenons un exemple simple pour illustrer ce point. Le temps est-il circulaire ou linéaire ? Depuis longtemps, on oppose la conception linéaire du temps qui serait le choix de la civilisation occidentale à un temps circulaire pour lequel auraient opté les civilisations asiatiques. Les discours construits sur ces notions opposées du temps sont innombrables comme d'ailleurs les ouvrages d'épistémologies ou de philosophies qui traitent de cette différence et de ses conséquences sur l'élaboration de discours, de pratiques ou de religions.

La conception du temps est fondamentale dans l'élaboration de connaissances ou de discours, mais à un moment, elle oblige à opérer un choix dans l'alternative opposant un temps circulaire à un temps linéaire. Le paradigme classique et le paradigme écosystémique reposent sur le choix d'un temps linéaire: le temps occidental. Ces deux paradigmes sont donc intégrés dans un paradigme plus large qui caractérise la civilisation occidentale.

L'exemple du temps montre que l'on ne peut pas, dans la civilisation occidentale, retenir à la fois l'une et l'autre polarité antagoniste comme fondement d'un discours quel qu'il soit. Il faut en retenir une et exclure l'autre. Axiome, proposition, assertion, composante, postulat, etc. Le mot importe peu pour caractériser les constituants d'un paradigme dès lors que le principe d'un choix épistémologique préalable est admis. Cette posture a comme origine les mathématiques élaborées à partir des postulats euclidiens et notamment à partir de celui qui établit qu'une assertion et son contraire ne peuvent être vraies simultanément (principe de non-contradiction). Toute la conception intellectuelle du monde qui prévaut en Occident repose sur ces postulats niant la possibilité d'antinomie; approche que les civilisations orientales n'ont pas éludé avec notamment la figure du Ying et du Yang, exprimant que le tout est fait d'opposition et d'harmonie.

L'élaboration d'un paradigme se fait donc à partir de choix sur des problématiques fondamentales sous forme d'antagonismes irréductibles, - exemple le temps linéaire ou circulaire - qui aboutissent à des propositions irréductible comme : le temps est linéaire. L'ensemble des propositions, composantes ou axiomes admis et intériorisés par ceux chargés d'élaborer des discours, constitue un paradigme. Ces paradigmes nourrissent alors toutes les composantes de la noosphère et les débats qu'ils suscitent.

Actuellement, les choix épistémologiques qui structurent nos pratiques cognitives dominantes sont issues de la mécanique céleste et de l'analyse mathématique.

Les succès pratiques de ces disciplines ont favorisé l'émergence d'un paradigme qui domine toute la philosophie contemporaine. Baptisé paradigme classique, paradigme mécaniste ou paradigme laplacien selon les auteurs, celui-ci induit nos pratiques sociales et cognitives. Or, depuis le XIX^{ème} siècle, époque de consolidation de ce paradigme, la physique et les mathématiques ont créé les conditions d'interrogations de ses fondements. Nous citerons les mathématiques fondées sur la complexité, la logique et le hasard ainsi que la physique quantique et la thermodynamique des phénomènes dissipatifs. Les connaissances issues de ces disciplines récentes participent à une subsumation du paradigme classique et à l'émergence concomitante d'un nouveau paradigme que nous baptisons paradigme écosystémique.

A travers les derniers développements de la thermodynamique, notamment ceux portant sur les structures dissipatives, mais aussi à partir des interrogations de nombreux mathématiciens sur l'espace de compétence de leur discipline, il est possible d'identifier plusieurs domaines où les composantes du paradigme écosystémique prennent à contre-pied celles du paradigme classique. On relèvera le rôle du désordre dans la structuration de la matière, l'intelligibilité des phénomènes, le rôle de la connaissance pour l'action et la conception du temps. L'introduction d'un désordre consubstantiel à la matière, formalisée par la notion d'état marginal de la physique des phénomènes dissipatifs, oblige à renoncer à l'espérance d'une connaissance ontologique, postulat du paradigme classique.

B : Les enjeux épistémologiques de la thermodynamique

1 : Préambule

Confrontés aux limites du discours mécaniste développé pour formaliser le mouvement des orbites, les physiciens s'intéressant à l'infiniment petit introduisirent des notions en rupture avec celles prévalant en mécanique céleste. Ainsi, Niels Bohr (1885-1962) en 1913, bien que proposant un modèle de l'atome directement inspiré du système solaire, fait intervenir les quanta dans la détermination de ses états possibles. Mais au lieu de considérer que ces changements s'effectuent de manière continue, il envisage des quantités discrètes pour formaliser les modifications de position des particules. Erwin Schrödinger (1887-1961), quant à lui, substitue à une représentation homomorphique de l'atome des fonctions d'onde reposant sur la probabilité de présence de ses constituants. Enfin, Werner Heisenberg (1901-1976) en 1927 formule le principe d'incertitude après avoir démontré mathématiquement qu'il est impossible de préciser simultanément la position et la vitesse d'une particule quantique quelconque, donc à l'échelle de l'infiniment petit. La conclusion qui s'imposa à des philosophes comme Karl Popper (1902-1994) fut l'obligation d'admettre un 'indéterminisme métaphysique'.

Les controverses suscitées par la réalité des phénomènes observés dans l'infiniment petit, confronté à l'idéal laplacien qui fonde le paradigme classique, furent commentées par d'innombrables personnalités. Peu de temps après d'autres physiciens participèrent à la subsumation de ce paradigme en étudiant les échanges d'énergie dans les systèmes; objet de la thermodynamique.

Alors que la mécanique est la science de référence du paradigme classique, la thermodynamique participe à la construction du paradigme écosystémique.

Mais alors que la mécanique est achevée au milieu du XIX^{ème} siècle, la thermodynamique, elle, ne fait que débiter son parcours. Cette dernière, des origines à nos jours, répond à deux préoccupations: l'une pratique relevant des sciences de l'ingénieur et l'autre davantage tournée vers la philosophie. Quelles sont ces préoccupations ? La première porte sur le rendement des machines à feu, c'est à dire l'optimisation de la capacité à obtenir un travail au sens physique. Successivement, les notions d'énergie, d'énergie utile, d'énergie libre, d'enthalpie, d'enthalpie libre et aujourd'hui d'exergy, d'émergie furent les concepts inventés pour formaliser cette préoccupation.

En parallèle, les réflexions pratiques des ingénieurs et des physiciens sur les rendements avaient abouti à la création du concept d'entropie comme étant la variable d'état d'un système limitant la conversion de l'énergie en travail. Cette irréversibilité de la croissance de l'entropie a été formalisée dans le second principe de la thermodynamique qui énonce que tout système isolé tend vers un niveau maximum d'entropie. Or, cette dernière s'oppose à l'efficacité énergétique. Les environmentalistes ont fait de l'entropie la pierre angulaire de leurs discours car, initialement elle a été conçue comme une menace pesant sur l'existence des systèmes. Mais depuis de nouveaux travaux ont montré le rôle constructif de cette entropie. Sa gestion d'un point de vue philosophique, que les environmentalistes associent souvent aux déchets, est un élément central de leurs réflexions et de leurs pratiques.

Rappelons aussi que la crise de l'énergie des années 1970 participa à l'émergence du concept 'environnement'; les nations industrialisées découvrant avec effroi que leur existence, que leurs ressources dépendaient de sources d'énergies situées dans des territoires dont elles n'avaient plus le contrôle politique.

Les concepts de structure dissipative, de néguentropie, d'exergy, de non linéarité, de non-équilibre, etc. provenant d'auteurs différents sont venus participer à l'enrichissement de cette réflexion et à l'élaboration de grilles de lecture sur le fonctionnement des écosystèmes quels qu'ils soient et par là, à l'élaboration du paradigme écosystémique dont les composantes sont antagonistes à celles du paradigme classique issu de la Mécanique céleste.

2 : De Carnot à la mort de l'univers

En physique, la notion d'énergie joue un rôle fondamental. Elle apparaît d'abord en mécanique où elle signifie capacité de travail. La première forme d'énergie définie est le travail mécanique : produit scalaire d'une force et d'un déplacement. Un système mécanique pouvant fournir du travail contient du travail en 'réserve', c'est-à-dire de l'énergie : - potentielle , si elle est due à la position des constituants du système dans l'espace ; - cinétique , si le corps est en mouvement comme des masses d'air pour mouvoir un bateau à voile ou maintenir en l'air un planeur. La loi de conservation de l'énergie, valable en mécanique, exprime que la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique est constante. Cependant, l'observation montre que la majorité des systèmes macroscopiques sont l'objet de frottements et d'apparition de chaleur qui dissipent cette énergie. La chaleur apparaît alors comme une forme de l'énergie.

En 1824, la publication de l'ouvrage de Sadi Carnot (1796-1832) "*Réflexions sur la puissance motrice du feu*" établit les bases d'une discipline nouvelle de la physique. A cette époque, S. Carnot, comme ses contemporains, était fortement impressionné par la supériorité politique de l'Angleterre sur la France qu'il attribuait à une large utilisation de la vapeur comme source d'énergie.

Dans un contexte de compétitions fortes, la thermodynamique comme science du feu et de ses applications devint un facteur de succès politique car elle permettait d'optimiser la création de la puissance et son utilisation. Alfred James Lotka (1880-1949), en 1922, à travers la loi d'énergie maximum, concevra l'énergie comme un élément déterminant de la compétition inter et intra espèces dont Charles Darwin (1809-1882) avait souligné le rôle dans les relations entre espèces vivantes.

C'est William Thomson (1824-1907) qui a inventé le mot 'thermodynamique' au milieu du XIXème siècle. Cette discipline embrasse l'étude de toutes les transformations qui s'accomplissent à l'échelle macroscopique. Trois catégories de systèmes sont concernées par cette physique:

- les systèmes dits ouverts, parce qu'ils peuvent échanger de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur;
- les systèmes fermés, qui n'échangent que de l'énergie avec le monde ambiant;
- les systèmes isolés, privés de tout échange.

Les systèmes vivants, qu'ils soient microscopiques ou macroscopiques sont des systèmes ouverts.

Les fondements de la thermodynamique reposent sur deux 'lois empiriques'. L'une, appelée premier principe de la thermodynamique, introduit le concept d'énergie et exprime une propriété de conservation impliquant que l'énergie, considérée sous toutes ses formes, doit rester constante au cours de la transformation d'un système isolé. L'autre, appelée second principe, introduit le concept plus subtil d'entropie et exprime une propriété d'évolution impliquant que, dans un système isolé, l'entropie ne peut que croître, ou demeurer constante à l'état d'équilibre.

La notion d'entropie fut introduite dans la thermodynamique en 1854, par le physicien allemand Rudolf Clausius (1822-1888) et devint le pivot de l'étude macroscopique des processus d'évolution au sein des milieux hautement complexes à l'échelle moléculaire. Selon le second principe de la thermodynamique, il est impossible de décrire un cycle moteur au moyen d'une seule source de chaleur.

Les travaux de Ludwig Boltzmann (1844-1906), en théorie des gaz, relatifs à ce même concept d'entropie, interprété du point de vue mécanique à l'échelle moléculaire, ont permis d'assimiler la notion d'accroissement d'entropie à l'évolution ordre-désordre qui caractérise tout système isolé. La relation entropie-désordre conduit alors à une interprétation de la loi de croissance de l'entropie. Elle montre, en effet, qu'un système isolé évolue nécessairement et irréversiblement vers des états de plus en plus probables et de moins en moins ordonnés sous l'effet des chocs moléculaires, jusqu'à son état final d'équilibre qui est ainsi le plus probable. La théorie de L. Boltzmann fait clairement apparaître les collisions comme la source de l'irréversibilité. Cette constatation conduit à une interprétation statistique du second principe de la thermodynamique, qui en limite la validité aux systèmes complexes, c'est-à-dire composés d'un grand nombre de paramètres moléculaires. Dans ce dernier cas, un processus hautement improbable, comme la séparation spontanée des deux constituants d'un mélange gazeux, s'interprète comme une impossibilité pratique. En introduisant la probabilité en thermodynamique, L. Boltzmann a initié des recherches sur la thermodynamique du non-équilibre et se trouve être un des initiateurs de la théorie de l'information, de la mécanique statistique et d'une réflexion plus générale sur l'entropie et l'irréversibilité.

Auparavant, en publiant en 1850 un ouvrage intitulé *Abhandlungen über die mecanische Wärme Theorie*, R. Clausius exposa deux conclusions cosmogoniques fondamentales qu'imposeraient le premier et second principe de la thermodynamique: l'énergie du monde est constante; l'entropie du monde tend vers un maximum. Cette généralisation, traumatisante pour ses contemporains, fit l'objet de nombreuses controverses se résumant par la question suivante: comment notre monde est-il possible alors que sa tendance naturelle serait d'aller vers le désordre ? La mort thermique de l'Univers paraissait, à la fin du dix-neuvième siècle, inéluctable.

Une multitude d'auteurs participèrent au développement de la thermodynamique. Mais, en dépit de toutes ces contributions à une doctrine de portée générale, le succès recueilli par une telle discipline strictement phénoménologique devait être limité au seul domaine des états d'équilibre, faute d'informations plus complètes que la seule inégalité de Clausius ($dQ/T \leq 0$) propre aux processus irréversibles. Les questions soulevées par les conclusions de Clausius ne furent traitées qu'à partir des années 1920 avec le développement d'une thermodynamique des processus hors équilibre. Depuis, cette discipline s'organise en deux catégories: la thermodynamique d'équilibre; la thermodynamique du non équilibre. Cette dernière distingue les états qualifiés proches de l'équilibre des états marginaux; des notions nouvelles apparaissent venant enrichir la portée du premier et du second principe de la thermodynamique.

3 : Du désordre aux structures dissipatives

En 1922, le physicien belge Théophile de Donder (1872-1957) établit la notion d'affinité chimique et ouvrit la voie aux travaux de Ilya Prigogine (1917-2003) et de ses équipes.

Puis en 1931, Lars Onsager (1903-1976) exposa les lois de réciprocité sur les coefficients phénoménologiques intervenant dans les lois de cinétique linéaire associant les courants irréversibles J_i (chaleur, diffusion...) aux forces généralisées X_i (gradients thermiques, de potentiels...). Aussi, aujourd'hui, la thermodynamique se présente sous trois aspects qui ont été élaborés l'un après l'autre.

La première, la plus connue, est la thermodynamique des états d'équilibre qui s'organise à partir de concepts et de relations entre des variables d'état, mais concerne uniquement les systèmes fermés dont l'évolution est la conséquence d'une intervention extérieure. Elle a trouvé son origine dans l'étude des machines à feu ou moteurs thermiques pour lesquels elle participe à l'élaboration de modèles puissants. C'est la thermodynamique enseignée.

La deuxième concerne les phénomènes gouvernés par les cinétiques linéaires et les relations de symétrie de Lars Onsager qui y sont associées. C'est la thermodynamique des processus irréversibles linéaires.

Enfin, la troisième, d'origine plus récente, correspond à la thermodynamique des processus irréversibles non linéaires. Cette dernière participe à la compréhension des états éloignés de l'équilibre thermodynamique où interviennent les causes d'instabilité sous forme d'états marginaux pouvant éventuellement donner naissance à des structures dissipatives créatrices d'ordre. Elle apporte une contribution importante pour l'approche physico-chimique du fonctionnement des structures vivantes.

Ces trois thermodynamiques ne sont pas inséparables. Il n'y a pas un domaine phénoménologique où s'appliqueraient l'une ou l'autre de ces thermodynamiques. L'apport de chacune d'entre elles est fondamental pour modéliser le fonctionnement des systèmes. Seule leur importance relative change selon la nature de ceux-ci.

a : Les trois thermodynamiques

Le développement de la thermodynamique se fonde sur une multitude de recherches. Ainsi, le principe d'équivalence de la chaleur et du travail est généralement attribué au médecin allemand Julius Robert von Mayer (1814-1878) qui l'a formulé pour la première fois en 1842 dans ses 'Remarques sur les forces inanimées de la nature', montrant par ce titre qu'en tant que médecin, il restreignait son propos aux phénomènes abiotiques.

Cependant, à ce qui est qualifié de premier principe de la thermodynamique sont souvent associés les noms de James Prescott Joule (1818-1889), de Benjamin Thompson (comte Rumford, 1753-1814) et aussi de Sadi Carnot (1796-1832), connu surtout pour sa contribution fondamentale au second principe.

La thermodynamique postule qu'à tout système physique sont associées une énergie et une entropie. L'énergie prend deux formes: la chaleur et le travail. Cette discipline s'organise à partir d'une séparation entre le système et le milieu dans lequel il évolue et dont il est séparé par une limite, une frontière. Le système est alors considéré en équilibre local avec le milieu dès lors que les variables d'état (pression, volume, etc.) qui le caractérisent sont différentes de celles du milieu. Cet équilibre local est en réalité du non-équilibre en regard d'un système qui à l'origine est à l'équilibre thermodynamique. L'entropie et l'énergie interne sont deux variables d'état dont les valeurs sont différentes entre le système et l'asystème.

a- 1 : La thermodynamique d'équilibre

- Le premier principe ou principe d'équivalence

Pour un système fermé, le principe d'équivalence, appelé aussi principe de conservation de l'énergie, conduit à l'expression générale suivante (dans un système unifié d'unités): $U = Q + W$. U est l'énergie interne du système; Q est la chaleur reçue par le système, et W est le travail fourni au milieu extérieur. Le premier principe de la thermodynamique exprime dans sa généralité une propriété de conservation de cette énergie, car, pour un système isolé du monde extérieur, on a $Q = 0$ et $W = 0$. D'où le nom de principe de la conservation de l'énergie. Toute modification de l'énergie interne d'un système isolé impose un apport ou un retrait de chaleur et/ou de travail fourni ou pris sur le milieu extérieur. Dans ce cas, les processus à pression constante comme la respiration par exemple, le terme travail est équivalent à $W = p.V$ (p : pression, V : volume). Le terme calorifique de la définition de l'énergie interne prend alors le nom d'enthalpie de symbole H : $H = U - p.V$. La variation d'enthalpie d'un système chimique n'est donc rien d'autre que la chaleur de réaction à pression constante. La variation d'enthalpie est affectée d'un signe négatif ou positif selon que le système perd ou gagne de l'énergie. Cette variable d'état du système établit la 'dénivellation d'énergie' existant entre les états initial et final du système considéré, quels que soient les processus qui relient ces deux états.

Le premier principe établit l'impossibilité du mouvement perpétuel, donc d'un système qui produirait du travail continu ou de l'énergie cinétique à partir de rien. D'autres grandeurs thermodynamiques issues de l'étude des systèmes en équilibre contribuent à l'élaboration du paradigme écosystémique.

- Le second principe ou principe d'entropie

Alors qu'il est aisé de transformer de l'énergie mécanique, chimique, électrique, etc., en énergie calorifique avec un rendement de cent pour cent, l'inverse est impossible. La fraction qui peut être convertie en énergie 'utilisable' est qualifiée d'énergie libre de Helmholtz (F): $F = U - T.S$ (T: température absolue (degré Kelvin); S: l'entropie). L'énergie libre (ou enthalpie libre) est, par définition, l'énergie que l'on peut récupérer sous forme de travail. L'enthalpie libre de Gibbs (G) du système est définie par: $G = H - T.S$ (H: enthalpie). Ces deux nouvelles fonctions d'état F et G ont été qualifiées de potentiel thermodynamique. Puis, l'étude des systèmes ouverts a abouti à la notion de bilan entropique:

$$dS = d_eS + d_iS.$$

Le terme d_eS représente la contribution du milieu extérieur à l'accroissement ou à la diminution de l'entropie; c'est le flux entropique reçu ou évacué par le système. Le terme d_iS correspond à l'accroissement d'entropie engendré par les processus irréversibles internes; c'est la production d'entropie (P): $P = d_iS/dt \geq 0$. Le second principe impose un signe non négatif, positif ou nul, à cette source. L'introduction de l'entropie dans l'expression du second principe de la thermodynamique permet d'écrire ce dernier sous la forme d'un bilan, représenté symboliquement par l'égalité :

$$dS/dt = d_eS/dt + d_iS/dt ; d_iS/dt \geq 0$$

Le premier terme du membre de droite désigne le flux entropique, dû à la contribution du milieu extérieur sous forme de flux de conduction et de convection ; son signe n'est généralement pas défini.

Le second terme représente l'ensemble des effets dissipatifs engendrés par les processus irréversibles internes; il porte le nom de production d'entropie; ici le signe est essentiellement défini positif, et traduit la condition imposée à toute évolution par le second principe. Le signe d'égalité correspond à des transformations réversibles. Dès lors, dans tous les cas, les transformations irréversibles apportent une contribution positive à l'accroissement d'entropie. Donc l'entropie ne peut que croître dans un système par suite des transformations irréversibles qui s'y produisent. Dans un système isolé ($d_e S = 0$), la croissance de l'entropie ne s'arrête que lorsque le système atteint l'équilibre thermique. L'entropie est donc un véritable "indicateur d'irréversibilité".

La production d'entropie exprime la dimension irréversible de l'évolution d'un système et s'interprète comme un critère d'évolution. Pour un système isolé, l'état d'équilibre correspond à un maximum de l'entropie, mais à production d'entropie irréversible minimale. Les états stationnaires de non-équilibre relevant du domaine de la thermodynamique linéaire possèdent cette même dernière propriété, mais alors le minimum n'est plus nul.

- Fluctuations et équilibre

Dans les systèmes à l'équilibre thermodynamique, le désordre-entropie est à l'origine de fluctuations qui écartent temporairement le système de l'équilibre. Mais, cette situation est limitée dans le temps car la réponse du système est un retour à l'équilibre, caractérisé par une valeur extrême du potentiel thermodynamique. Les systèmes en équilibre thermodynamique sont par conséquent des systèmes stables dans le temps. Ce n'est plus le cas des systèmes soumis à des conditions de non-équilibre. De tels systèmes se caractérisent par une diminution locale de l'entropie, mais pas de sa disparition.

Aussi, la thermodynamique envisage deux situations pour les structures de non-équilibre qualifiées aussi de structures dissipatives:

- les situation de quasi-équilibre qui correspondent à des états stationnaires des systèmes où les relations linéaires entre les constituants dominant;
- la thermodynamique non linéaire; cette non linéarité conduit le système à adopter des configurations évolutives au cours du temps selon les contraintes auxquelles il est soumis.

La distance à l'équilibre thermodynamique est un élément déterminant pour comprendre le fonctionnement des systèmes. La variable d'état 'exergy' a été introduite dans les discours sur la thermodynamique du non-équilibre pour en rendre compte. Notons que le premier système de non-équilibre est la biosphère terrestre nourrie du flux solaire. Selon cette approche, l'évolution du vivant serait la résultante de processus de sélection et de phénomènes d'auto-organisation. La capacité à optimiser la gestion des flux 'néguentropiques' étant à la base de cette évolution.

a- 2 : La thermodynamique du non-équilibre

- La thermodynamique linéaire

La thermodynamique du non-équilibre linéaire est caractérisée par la prévalence de relations linéaires entre les flux et les forces auxquels le système est soumis et dont L. Onsager a défini l'espace de validité par des relations de réciprocité.

Cet espace relève du domaine linéaire de non-équilibre, mais dans l'hypothèse que le système est localement en équilibre avec le milieu dans lequel il se situe. Dans un système linéaire, les effets sont proportionnels aux causes. En termes qualitatifs, ces relations de réciprocité expriment que si une force est responsable d'un flux, alors une autre force conduira aussi à un autre flux; les binômes flux-forces s'équilibrent. Par exemple, la loi empirique de Joseph Fourier (1768-1830) expose que, dans un système siège d'un gradient de température (à l'exclusion de toute autre force), le flux de chaleur est proportionnel au gradient.

L'élément fondamental de la thermodynamique linéaire est la proportionnalité des relations entre les composants et les flux au sein du système où dominent les rétroactions négatives: le retour à l'équilibre. Le coefficient de proportionnalité (dans le cas de la loi de Fourier: la conductivité thermique) est un cas particulier des constantes L_{ij} , appelées coefficients de transport. Ils caractérisent la réponse du système envisagé aux stimuli extérieurs.

L. Onsager a établi, en 1931, une loi fondamentale qui relie ces nombres entre eux : les coefficients de transport obéissent (en l'absence de champs magnétiques) aux relations de réciprocité :

$L_{ij} = L_{ji}$. Les relations d'Onsager sont valables pour des processus irréversibles qui se produisent au sein de milieux gazeux, liquide ou solide. Ainsi, dans le domaine linéaire, l'irréversibilité est associée au désordre. Cependant, en situation de non-équilibre linéaire, les fluctuations décroissent. L'état stationnaire dans lequel est maintenu le système est dû à des flux d'échange d'énergie ou de matière entre le système et le milieu. Un système en non-équilibre, donc éloigné de l'équilibre thermodynamique, peut évoluer spontanément vers un état caractérisé par une hétérogénéité, et donc par une complexité croissante. La thermodynamique a aussi montré que ce rôle constructif de l'irréversibilité est d'autant plus important que le système évolue loin de l'équilibre thermodynamique.

Un élément fondamental de la thermodynamique linéaire pour l'élaboration du paradigme écosystémique est le théorème du minimum de production d'entropie à l'état stationnaire pour un système soumis à des contraintes données inventé par Ilya Prigogine et Paul Glansdorff dans les années 1940. Celui-ci est ainsi formulé: *“dans un système dominé par le régime linéaire, la production interne d'entropie (irréversible) atteint une valeur minimum à l'état stationnaire de non-équilibre”*. Dans le régime linéaire, le système évolue vers un état stationnaire dont la production d'entropie est constante. Ce théorème du minimum de production d'entropie à l'état stationnaire exprime un principe dont la portée est strictement limitée au domaine des processus irréversibles linéaires, mais fondamental pour la constitution du paradigme écosystémique. En effet, la stabilité des états stationnaires est la conséquence de cette production minimum d'entropie.

Les relations d'Onsager et les lois linéaires de même type ont cependant un domaine de validité limité. C'est seulement au cours des années 1960 que l'on a commencé à étudier systématiquement la thermodynamique non linéaire où les régimes simples prédits par les lois linéaires deviennent instables, le système « sautant » sur d'autres branches d'évolution qui peuvent être totalement différentes, au fur et à mesure de son écart à l'équilibre thermodynamique. Loin de l'équilibre, les états stationnaires peuvent perdre leur stabilité. Il peut apparaître ainsi spontanément des structures spatiales ou des oscillations à partir de systèmes parfaitement homogènes au départ. Ces structures dissipatives jouent un rôle déterminant, aussi bien en hydrodynamique qu'en chimie ou en biologie.

- La thermodynamique non-linéaire

Les conditions de stabilité d'un système à partir de l'hypothèse d'un équilibre local sont déterminées par la différentielle seconde de l'entropie.

En adoptant cette expression comme fonction de Liapounov, il est possible d'en déduire un critère de stabilité du système par rapport aux petites perturbations, autour du processus irréversible considéré et soumis à des contraintes fixes.

$$\delta^2 S < 0 ; d(\delta^2 S) / dt \geq 0$$

Ce critère de stabilité implique, dans les cas où il est réalisé, la régression des fluctuations qui ont engendré l'écart à l'équilibre stationnaire. Le système est stable et le reste malgré la présence de fluctuations. Cet équilibre stationnaire est différent de l'équilibre thermodynamique, car il établit que la fonction entropie localement est inférieure à celle du milieu.

Autour d'un état d'équilibre thermodynamique, mais aussi autour d'un état de non-équilibre linéaire ou d'équilibre stationnaire, la stabilité est identiquement assurée en vertu du second principe. Cependant, plus le système évolue loin de l'équilibre thermodynamique plus ce principe d'équilibre peut être mis en défaut. Les fluctuations ne sont plus nécessairement amorties. La stabilité n'est donc plus la conséquence de lois générales; tout au contraire, les fluctuations peuvent croître et envahir le système tout entier dès lors que l'amplitude de la fluctuation est supérieure à la 'longueur de cohérence' du système. C'est l'état marginal. Cette notion de longueur de cohérence exprime le fait que l'homogénéité d'un système est déterminée par sa capacité à 'résorber' les fluctuations dues à l'entropie du système, donc selon l'équivalence désordre-entropie de Boltzmann, issues du désordre.

Or, rappelons que le terme $d_i S$ de l'entropie est toujours positif ou nul. Des structures dissipatives ou organisations spatio-temporelles nouvelles peuvent émerger dans de telles situations. Le non-équilibre confère à la matière des propriétés de structuration qui demeurent impossibles à l'équilibre.

La dimension irréversible de l'évolution des systèmes par la croissance de la fonction $d_j S$ et les fluctuations qu'elle génère loin de l'équilibre ont un rôle constructif, mais imprévisible. Ces nouveaux états de non-équilibre apparaissent aux points de "bifurcation". A ces points, le système peut évoluer vers plusieurs états qualifiés aussi de branches thermodynamiques. Le retour à l'état d'équilibre thermodynamique en est un. Ces bifurcations débouchent sur des auto-organisations différentes de celles dont elles sont issues. Mais, alors que les lois de la thermodynamique d'équilibre n'envisagent comme évolution qu'une dégradation (entropie-désordre) du système, loin de l'équilibre, les conséquences d'un état marginal sont quelque peu inattendues puisque, à l'inverse de la dégradation classique par dissipation, le régime qui s'établit peut être plus structuré que le précédent, plus complexe. Cet accroissement de structure est tantôt spatial et donne lieu à une structure dissipative, tantôt temporel sous la forme de cycles limites.

Un grand nombre de possibilités existe. Le mouvement cellulaire de Bénard, prenant naissance au sein d'une couche horizontale de fluide chauffée par le bas, constitue l'un des premiers et des plus édifiants exemples de telles structures. Aussi, aujourd'hui, le principal intérêt de la thermodynamique des phénomènes irréversibles se rapporte au lien avec les processus biologiques, c'est à dire le monde vivant dans toutes ses manifestations. Ces travaux permettent d'apposer une grille de lecture et de comprendre la variété immense des structures dans le monde naturel ou humain avec comme aboutissement en écologie l'assimilation, l'identification des écosystèmes à des structures dissipatives.

b : Les structures dissipatives

Au voisinage de l'équilibre, les fluctuations disparaissent dès leur formation et peuvent donc être ignorées. Toutefois, dans la région non linéaire, certaines d'entre elles peuvent s'amplifier à proximité d'un premier état critique et, conformément à des lois stochastiques, venir perturber l'état macroscopique établi et le déstabiliser. Il en résulte un changement de branche ou bifurcation vers un nouvel état stable pouvant être plus structuré que le précédent devenu instable et, dès lors, éliminé. Des perturbations d'origine extérieure peuvent avoir le même effet. Ainsi, lorsque le système rentre en crise, c'est à dire sort des conditions d'équilibre pour le moment définie par les relations de Onsager et le théorème de Prigogine-Glansdorff, celui-ci peut évoluer vers une organisation plus complexe. La complexité apparaît alors comme une réponse du système pour 'sortir' d'un état transitoire désordonné.

Toutes les structures vivantes exigent une dissipation constante d'énergie et de matière. I. Prigogine leur a donné le nom de structures dissipatives. Elles concernent aussi des structures ordonnées abiotiques comme les cellules de Bénard déjà évoquées. L'atmosphère terrestre en est une aussi .

Du point de vue de l'Ecole de Bruxelles, la question du vivant n'est pas centrée sur l'information et son traitement (l'organisme étant considéré comme une traduction de l'information génétique) mais sur l'"auto-organisation" de la matière loin de l'équilibre. Les propriétés générales de l'auto-organisation loin de l'équilibre, et notamment la cohérence collective, surgissent spontanément dans une population désordonnée à l'équilibre. Les bifurcations où les fluctuations deviennent susceptibles de transformer le régime d'activité globale du système, et sa sensibilité ont suscité des échos dans les domaines les plus divers.

Entre autres, le fait que des facteurs insignifiants à l'équilibre peuvent jouer un rôle déterminant dans les possibilités de structuration du système loin de l'équilibre.

A partir des années 1980, un grand nombre de centres interdisciplinaires, se référant aux dynamiques non linéaires ou à la complexité, ont entrepris de développer ces concepts dans le domaine de l'économie, de l'écologie, des sciences sociales, etc. Ces approches sont soutenues par les membres de l'Ecole de Bruxelles. Toutes ont en commun de s'intéresser aux structures dissipatives.

Ce terme "structure dissipative" a donc été créé dans les années 1960 pour souligner que loin de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire dans des systèmes traversés par des flux de matière et d'énergie, peuvent se produire des processus de structuration et d'organisation spontanées au sein de ces systèmes, qui deviennent le siège de "structures dissipatives". L'irréversibilité jouerait finalement un rôle constructif et devenir source d'ordre. Une structure dissipative naîtrait du désordre, sa stabilité n'étant que la résultante globale de son activité dissipative à partir des flux qui la nourrissent.

L'étude des structures dissipatives n'oppose donc pas l'ordre au désordre, elle s'intéresse aux conditions d'évolution de celles-ci, étant établi qu'elles sont la résultante d'une dialectique ordre-désordre. Les fluctuations consubstantielles aux systèmes selon les circonstances, soit régressent (zone de stabilité), soit s'amplifient (zone de bifurcation) et induisent une évolution du système vers un nouvel état d'équilibre doté d'une capacité d'annihilation des effets des fluctuations. La thermodynamique des structures dissipatives vient alors nourrir les discours des biologistes constatant la complexification constante des organismes vivants au cours des âges.

c : L'usage de la thermodynamique

De la recherche de la puissance motrice aux structures dissipatives, la thermodynamique conçue comme science de l'énergie, puis de l'entropie, a enrichi de ses concepts des domaines immenses de la philosophie naturelle. Ainsi, la biologie, dans le prolongement de la théorie darwinienne, s'est appropriée les principaux concepts de la thermodynamique pour concevoir les organismes vivants, des procaryotes jusqu'aux écosystèmes naturels ou artificiels, comme des structures dissipatives.

Les biologistes considèrent que la vie se caractérise par deux propriétés: la reproduction et l'autoconservation. Cette dernière consiste à surmonter les conséquences du second principe de la thermodynamique, car bien que systèmes ouverts, les organismes vivants n'échappent pas aux lois qui régissent les systèmes fermés. Cette gestion de l'énergie induit que l'énergie totale d'un système comprend une part utilisable et une part dégradée qui correspond à l'augmentation irréversible de l'entropie. Celle-ci mesure le degré d'usure de l'énergie, ainsi que le degré de désordre d'une structure organisée.

D'après le second principe de la thermodynamique, l'entropie d'un système fermé ne peut que croître, ce qui entraîne une diminution de l'organisation. Ce principe posait donc une incompatibilité considérée comme irréductible entre l'évolution dans le domaine physique et l'évolution dans le monde vivant. La réponse fut que tout apport d'énergie extérieure (énergie solaire ou énergie résultant du catabolisme) à un organisme vivant entraîne la diminution locale de l'entropie et l'accroissement de l'organisation, mais sans pour cela échapper aux conséquences du second principe qui oblige tout système à évoluer ou à mourir (principe de désordre). Au contraire de la physique, les sciences de la vie ou humaines admettent la complexification croissante des structures au cours du temps. Ceci étant admis, une question fondamentale est de comprendre à quelle exigence écosystémique cette complexification répond.

Ces interrogations conduisent tout naturellement à la téléologie, c'est-à-dire la réalisation d'un but ou d'une fin. Mais, nous éliminerons de cette dissertation toute référence téléologique pour se borner aux faits et aux modèles qui aboutissent au paradigme écosystémique.

Nonobstant ces remarques, tous les biologistes s'accordent sur le fait que les êtres vivants sont des transformateurs d'énergie traversés par un flux de matière et d'énergie.

c - 1 : Les concentrations d'énergie

Ce sont des réactions photochimiques dues au flux solaire qui permettent la synthèse de molécules organiques par les plantes, à partir du gaz carbonique de l'atmosphère et de l'eau, et le dégagement d'oxygène (synthèse chlorophyllienne). La chlorophylle joue le rôle d'un catalyseur dans cette réaction. Les organismes animaux brûlent les molécules organiques grâce à la respiration et reforment du gaz carbonique.

Pratiquement, toute l'énergie chimique actuellement utilisée (charbon et hydrocarbures) provient de la transformation de l'énergie solaire, par des processus photochimiques et biologiques, en végétaux pour le charbon, en micro-organismes marins pour le pétrole. Ainsi, les végétaux, absorbent de la lumière et la convertissent en chaleur et en énergie chimique (énergie de liaison), au cours de la photosynthèse. Les animaux utilisent cette énergie chimique et la convertissent en travail (mouvements) et en chaleur.

Pour leur entretien et leur développement, pour extraire du milieu où ils vivent les aliments dont ils se nourrissent, les êtres vivants ont besoin d'énergie. Selon leurs caractéristiques trophiques, la source d'énergie à laquelle ils recourent est différente.

La première étape est réalisée par les végétaux chlorophylliens qui utilisent la lumière et élaborent, par photosynthèse, des composés carbohydrogénés – glucose, amidon – qui possèdent une énergie libre de formation élevée. Leur fabrication est due à la réduction du gaz carbonique par l'eau.

c - 2 : Les oxydo-réductions

Les oxydoréductions sont des réactions chimiques couplées par lesquelles une substance se réduit en prélevant des électrons à une autre qui s'oxyde. Elles sont essentielles pour transférer l'énergie d'un élément à un autre. Les composés organiques dont sont constitués les êtres vivants sont en général des substances réduites par rapport aux composés oxydés du monde minéral. L'assimilation de ces derniers implique donc globalement une réduction, alors que le retour à l'état minéral traduit une oxydation. Les oxydoréductions sont ainsi des processus métaboliques qui permettent de passer progressivement de l'état réduit à l'état oxydé ou réciproquement.

Elles provoquent des échanges d'énergie, de quelques joules à quelques dizaines de joules, pour assurer des dénivellations métaboliques suffisantes mais compatibles avec le maintien des structures et des activités cellulaires. Les oxydoréductions exergoniques (descente thermodynamique), comme il s'en trouve dans la respiration et dans la photosynthèse, produisent fréquemment des réducteurs et de l'ATP (Adénosine TriPhosphate), augmentant les réserves mobiles en pouvoir réducteur et en énergie. Ces réserves sont alors disponibles pour les synthèses et autres activités vitales. Cependant, tout flux d'énergie avant de 'traverser' les chaînes alimentaires doit être capté; c'est la fonction de la photosynthèse de concentrer les flux d'énergie solaire. Ainsi, les structures vivantes vivent grâce à des flux d'énergie qu'elles dissipent en produisant de l'entropie. C'est la vision moderne des écosystèmes.

Les écosystèmes sont conçus comme des structures dissipatives nourries de flux. Ce sont donc des structures vivantes soumises aux mêmes contraintes thermodynamiques que toutes les autres structures vivantes. Or, le second principe prévoit qu'un système isolé évolue dans le temps vers le désordre alors qu'en biologie et en sociologie, l'idée d'évolution est associée à une croissance de l'organisation et à la formation de structures de plus en plus complexes. Celles-ci sont des systèmes ouverts car elles dissipent de l'énergie.

Une question fondamentale sur l'évolution des organismes et des écosystèmes est de comprendre les conditions de leurs évolutions contraires aux lois de la thermodynamique d'équilibre. C'est à cette problématique que tente de répondre la thermodynamique du non-équilibre qualifiée de thermodynamique des structures dissipatives. L'analyse du rôle de la non-linéarité en thermodynamique, exposé ci-avant et qui a conduit au concept de structure dissipative, a permis de répondre à ces questions.

Les systèmes biologiques sont par conséquent des systèmes ouverts échangeant de la matière et de l'énergie avec le milieu dans lequel ils évoluent. En tant que structures dissipatives, ils se caractérisent par une organisation spatiale et temporelle. Les phénomènes d'auto-organisation les plus communs sont, soit l'apparition d'états stationnaires multiples, soit l'évolution vers un régime d'oscillations entretenues correspondant à un cycle limite autour d'un état stationnaire devenu instable à la suite d'une bifurcation. Les exemples biologiques les plus connus de tels phénomènes sont le cycle de la glycolyse, l'agrégation des amibes acrasiales, la morphogénèse, etc.

Une autre caractéristique des systèmes vivants est leur capacité à stocker de l'information et d'adapter leur comportement en fonction des stimuli reçus du milieu.

Cette adaptation est essentielle pour le développement et la survie d'un organisme et se fonde sur les travaux de A. J. Lotka qui a établi que l'un des facteurs de succès d'un organisme vivant est son aptitude à générer de l'énergie libre (l'énergie utile pouvant aboutir à un travail), qualifiée de loi d'énergie-maximum. Dans une optique néo-darwinienne, la viabilité des organismes vivants dépend de leur capacité à maximiser cette énergie utile. Aussi, à côté des concepts d'énergie et de matière apparaît celui d'information. Ceux-ci se révèlent déterminants pour l'élaboration d'un paradigme écosystémique structuré à partir des notions suivantes.

d : Les notions incontournables

d - 1 : Information et néguentropie

Couramment, la définition technique d'une information est la même que celle d'une entropie changée de signe (ou néguentropie : « moins » le logarithme d'une probabilité). L. Szilard (1929), G. N. Lewis (1930) et L. Brillouin (1949) ont été à l'origine d'une réinterprétation de l'entropie comme un défaut d'information. Déjà Aristote (-385/-322) avait réfléchi à une conception de l'information notamment à partir de la notion de hasard. L'information y est ainsi conçue comme acquisition de connaissance mais aussi pouvoir d'action ou d'organisation. En d'autres termes, l'information ne serait pas exclusivement d'origine expérimentale. Henri Poincaré (1854-1912) a résumé cette approche en écrivant qu'« *une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison* ». Selon une perspective positiviste, l'information est intégrée à un mode de représentation du Réel (connaissances), qui permet d'agir sur ce Réel. Aussi une théorie sur l'information a comme préalable le but qui lui est assigné.

Aujourd'hui, deux théories de l'information s'opposent: la théorie de l'information de Shannon et la théorie algorithmique. La première après avoir connu une période de prospérité connaît désormais un relatif retrait. Selon la deuxième, plus actuelle, la valeur de l'information de 's' est la longueur du plus petit programme (en mode binaire) nécessaire à une machine M pour reconstituer la chaîne de caractères constitutive de 's'. Cette théorie de l'information est à l'origine de la théorie de la complexité d'Andreï Nikolaïevitch Kolmogorov (1903-1987). Précisons cependant que les théories sur l'information font l'objet "*d'utilisation parfois délirantes de ce mot*" (Delahaye, 1994, p23). Aussi, nous ne définirons pas l'information, mais ferons référence au cadre dans lequel s'inscrivent les nouveaux concepts. L'information y est alors conçue comme perception de l'Autre, mais aussi production de Moi. A chacun d'utiliser cette information aux usages qu'il conçoit.

Le mot néguentropie fait partie des termes qui apparaissent dans la littérature sur les relations entre thermodynamique et phénomènes du vivant, mais dont l'usage est susceptible de provoquer l'ire de physiciens puristes. Il est ainsi tout à fait absent de la littérature de l'Ecole de Bruxelles dont I. Prigogine est l'autorité morale. Cependant, le concept qu'exprime ce mot est indispensable pour élaborer le paradigme écosystémique, puis les principes de fonctionnement des écosystèmes, aussi, nous ne pouvons l'ignorer, malgré la suspicion dont il fait l'objet.

Deux ou trois auteurs sont associés à la création de ce terme. Léon Brillouin (1956, Science and Information Theory) l'a proposé pour remplacer les expressions d'«entropie négative» ou «entropie changée de signe»; ceci en même temps que Norbert Wiener (1894-1964, Théorie de l'information) et Erwin Schrödinger.

Ce dernier, dans son ouvrage 'What is Life?' publié en 1945 montrait qu'en contradiction avec les conséquences du second principe de la thermodynamique, toute organisation vivante s'élaborait à partir de flux d'entropie négative que nous qualifierons désormais de 'flux néguentropiques'. Par conséquent, au contraire des processus abiotiques décrits par la thermodynamique d'équilibre, la vie d'organiserait sous la contrainte du second principe, mais en le transcendant temporairement.

Rappelons que la thermodynamique de non-équilibre tente de réaliser un rapprochement entre ces phénomènes antagonistes: d'une part, la croissance vers le désordre formalisée par le second principe et l'interprétation que Boltzmann en a faite, dont la conséquence cosmogonique est «la mort thermique de l'univers»; d'autre part, l'émergence du vivant et la complexification croissante de ses manifestations, des organismes procaryotes jusqu'au gigantesque écosystème artificiel que la mondialisation produit. Le métabolisme des organismes vivants manifeste en effet leur capacité, non seulement de maintenir dans le temps leur complexité structurale et fonctionnelle, mais, bien plus, de la multiplier en la transmettant à leur descendance. Les approches probabilistes du concept d'entropie développées par Ludwig Boltzmann, Josiah Willard Gibbs (1839-1903) et James Clerk Maxwell (1831-1879), permirent d'envisager qu'un ordre biologique constant ou croissant n'est pas impossible, mais très improbable d'un point de vue physique dominé par la thermodynamique d'équilibre. Puis Schrödinger affirma la nécessité de comprendre les phénomènes de structuration des organisations vivantes à partir de leurs propriétés de non-équilibre auto-entretenu. Cette intuition fut relayée par les travaux de Ludwig von Bertalanffy (Théorie générale des systèmes, 1968), Norbert Wiener (1894-1964, Cybernétique), Lars Onsager et Ilya Prigogine (Études des états stationnaires et des systèmes loin de l'équilibre thermodynamique).

La fonction primordiale du métabolisme est alors la propriété de maintenir des structures et des fonctions à travers un flux constant de matière, d'énergie et d'informations.

Comment comprendre thermodynamiquement ce flux par rapport à cette conservation d'ordre ? E. Schrödinger écrivit dans "What is Life ?" *«Quel est donc ce précieux quelque chose incorporé à notre nourriture qui nous sauve de la mort ? Un organisme vivant accroît constamment son entropie — ou crée de l'entropie positive — et ainsi tend à se rapprocher de l'état dangereux d'entropie maxima, qui est la mort.*

Il ne peut s'en maintenir éloigné, c'est-à-dire rester en vie, qu'en soutirant continuellement de l'entropie négative, ce qui est en réalité quelque chose de très positif [...]. Donc, un organisme se «nourrit» d'entropie négative. En d'autres termes [...], la chose essentielle en métabolisme est que l'organisme réussisse à se débarrasser de toute l'entropie qu'il ne peut s'empêcher de produire». L'étude du métabolisme d'un point de vue thermodynamique fait apparaître clairement que les organismes vivants constituent des systèmes ouverts. Dès lors, le second principe de la thermodynamique ne se présente plus comme dans un système fermé où l'énergie libre tend à disparaître, si bien que la désorganisation croissante traduit la tendance vers l'équilibre. Dans les systèmes ouverts, il n'y a pas de véritable équilibre. On parle d'état stationnaire. En opposition avec l'«entropie» des systèmes fermés, l'état stationnaire, dû à une réorganisation continue, évacue une partie de l'entropie produite. Cet état stationnaire métastable est évoqué sous le nom d'homéostasie en biologie.

d - 2 : Exergy

Cette idée d'informativité d'objets, qu'ils soient matériels ou spirituels, a induit les notions de négentropie, d'ordre, de diminution locale d'entropie. Puis, de nombreux auteurs ont émis l'idée que tous les processus naturels ou humains, notamment les échanges économiques se réalisent entre des systèmes de différents niveaux d'entropie.

Georgescu-Roegen (1906-1994) dans les années 1970 a conçu les échanges à partir de flux entre des systèmes de basse entropie vers des systèmes de haute entropie. Depuis, cette innovation a été précisée et améliorée. Intuitivement, il existe par conséquent une variable d'état de tout système qui exprime son niveau d'entropie, son ordre et dont les valeurs déterminent sa performance. En effet, la première loi de la thermodynamique établit qu'à l'échelle macroscopique que nous connaissons dans la biosphère, il n'y a création, ni de matière, ni d'énergie. Or, la deuxième loi de la thermodynamique affirme que tout processus tend vers un état maximal d'entropie qui constitue l'équilibre thermodynamique.

Toute structure organisée est donc à la fois soumise à ce principe, mais y déroge en s'éloignant de l'équilibre thermodynamique. Cette idée d'écart à l'équilibre a conduit à introduire dans le discours de la thermodynamique le concept d'exergy (Ayres, 1998). Cette dernière se définit comme le maximum de travail qu'un système peut produire en regard du milieu dans lequel il évolue. Plus l'exergy d'un système est élevée, plus le travail potentiel que celui-ci peut fournir est aussi élevé. L'exergy a donc une relation directe avec la notion d'énergie libre utilisée dans la thermodynamique d'équilibre. En situation d'équilibre thermodynamique, ces deux variables sont équivalentes (Ruth, 1995). Cette variable intensive, non mesurable, exprime l'écart à l'équilibre d'un système. Plus l'exergy d'un système dissipatif est différente de son milieu, plus sa distinguabilité augmente.

Elle est inversement proportionnelle au niveau d'entropie du système, mais est corrélée dans une relation proportionnelle à la production d'entropie, à l'ordre du système, à sa complexité. Elle exprime la capacité d'un système à fournir de l'énergie utile. Aussi, la notion d'énergie du langage courant est en réalité l'exergy, c'est à dire l'énergie utile transformable en énergie mécanique et en force.

L'exergy se définit ainsi comme le maximum de travail en quantité qu'un système peut fournir à son environnement qui serait proche de l'équilibre thermodynamique. L'exergy est proportionnelle à la future production d'entropie potentielle. Elle est la mesure de l'écart à l'équilibre thermodynamique et permet d'apprécier le degré de distingabilité d'un système avec son milieu. Elle est proportionnelle au contenu en informations du système. Elle n'est pas une variable conservative comme l'énergie, mais est 'incluse' dans les matériaux. C'est le travail potentiel extractible d'un système.

d - 3 : Homéostasie

Comme toutes substances, les êtres vivants obéissent aux mêmes lois chimiques et physiques que la matière inerte. Les lois de la gravitation universelle s'appliquent aux oiseaux et aux hommes. Les uns comme les autres, mais avec des aéronefs, volent, contredisant temporairement les conséquences de cette loi. Sans gravitation, il serait impossible de voler.

Les organismes vivants se trouvent comme tout objet matériel, soumis aux contraintes du milieu dans lequel ils évoluent. L'étude du vivant montre que plus ces êtres vivants sont évolués, plus se manifeste leur indépendance vis-à-vis du milieu.

C'est Claude Bernard (1813-1878) qui dans ses *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* a écrit la célèbre phrase: «*La fixité du milieu intérieur est la condition de la vie libre, indépendante; le mécanisme qui la permet est celui qui assure dans le milieu intérieur le maintien de toutes les conditions nécessaires à la vie des éléments*». L'homéostasie permet par conséquent de s'affranchir relativement et temporairement des contraintes du milieu physique, dont le principe d'entropie, au même titre que de la loi de la gravitation universelle.

d - 4 : Non-linéarité

Le plus simple pour sensibiliser à la notion de non-linéarité est d'admettre que dans un processus linéaire $1 + 1 = 2$ en base 10 alors que $1+1 = ?$ et parfois 2 dans un processus non-linéaire.

L'allégorie de la rivière polluée pour caractériser l'introduction de la non-linéarité dans l'étude des problématiques de l'environnement montre aussi combien il est nécessaire d'opérer une rupture avec les pratiques intellectuelles fondant les sciences traditionnelles.

Une rivière à l'eau claire est bordée d'arbres sains. Une usine s'installe qui pollue la rivière. Les arbres dépérissent. Pour améliorer leur situation, des travaux sont entrepris pour dépolluer la rivière. Les arbres crèvent. Un processus linéaire aurait voulu que la dépollution permette que les arbres recouvrent leur vigueur d'antan, mais la non-linéarité du phénomène de pollution sur la santé de ceux-ci a abouti à des conséquences opposées aux objectifs initiaux.

D'un point de vue plus formel un processus est qualifié de non-linéaire quand la dérivée d'une variable par rapport à une autre est non-nulle. Ce point de vue ne rend cependant pas compte de celle qui prévaut dans les sciences de l'environnement.

En effet, la non-linéarité en mathématiques ne correspond pas à la non-linéarité qui alimente les discours sur l'environnement. La non-linéarité de l'analyse mathématique est une linéarité de ce dernier point de vue.

La linéarité se fonde essentiellement sur le principe de causalité qui établit que chaque événement a une cause (principe de causalité) et sur une approche déterministe des phénomènes établissant que cette causalité est accessible à l'entendement et que les mêmes causes provoqueront les mêmes effets. Cette approche a été synthétisée sous le principe de raison suffisante. Ce corpus philosophique définit le paradigme classique.

Toute notre éducation repose sur une approche linéaire des phénomènes. Poser un problème, quel qu'il soit, à un impétrant de 5 ans ou de 25 ans relève toujours de la même démarche. La solution existe et l'étudiant performant doit la trouver à partir de son cours, et si possible vite. C'est ce qu'attend son professeur. Imaginons la réaction des enseignants si les étudiants se mettaient à répondre aux questions à partir de schémas non-linéaires ? Par exemple: combien de temps mettra la baignoire pour se vider ? Réponse: 12 pommes ou "il fait beau".

Toutes nos représentations du réel sont fondées sur des représentations linéaires des phénomènes. Les dernières évolutions de la science alimentent un discours qui dénonce cette situation et propose de nouvelles représentations où la non-linéarité s'exprime, notamment dans les phénomènes dissipatifs.

Cette non-linéarité bouleverse tous les discours jusqu'alors fondés sur la linéarité. Ainsi, l'anthropologue américain Ian Tattersall, auteur de *L'Émergence de l'homme* (Gallimard, 1999), récuse toute linéarité de l'évolution des espèces et insiste sur les découvertes récentes de fossiles d'hominidés inconnus jusqu'alors. Selon lui, il faut oublier l'image classique d'un arbre généalogique fait d'un tronc régulier sans branches mortes, qui fait se succéder tous nos ancêtres jusqu'à nous.

Il faudrait plutôt imaginer un buisson touffu, avec des branches multiples, dont de nombreuses mortes. *Homo sapiens* aurait alors émergé comme une petite brindille terminale, sans pour autant être au sommet de l'arbre. En fait, il n'y aurait pas eu naissance de l'homme, mais plutôt émergence à la suite d'imprévus et du jeu de hasards et d'adaptations.

Ce discours est dans la droite ligne de la thèse de Jacques Monod (1910-1976) exprimée dans "Le hasard et la nécessité", mais au lieu d'élaborer des théories matérialistes sur l'apparition de la vie et de l'homme à partir de représentations linéaires des phénomènes, les auteurs inspirés par les thèses portant sur la non-linéarité des phénomènes intègrent cette nouvelle conception du réel dans leurs théories, que ce soit en biologie, en physique, en économie, etc. Le débat est par conséquent largement ouvert sur le dualisme linéarité/non linéarité. Il fonde l'opposition entre le paradigme écosystémique et le paradigme classique et ne peut faire l'impasse d'une réflexion sur la notion de hasard. En effet, il existe une identification de fait entre la notion de hasard associée à celle de non-linéarité et celle de déterminisme associée à celle de linéarité. Le hasard est-il alors le produit de notre ignorance, ou est-il consubstantiel à l'évolution de la matière, notamment vivante ?

d - 5 : Hasard

L'acceptation la plus commune du hasard serait la limite au-delà de laquelle l'esprit humain ne peut plus trouver des causes à toutes les coïncidences des raisons naturelles des phénomènes, comme à leur prédictibilité. Antoine Cournot (1801-1877), un des premiers théoriciens des probabilités, a avancé une définition du hasard proche de celle d'Aristote qui fonde la conception généralement admise. Pour lui, le hasard est "*la combinaison ou la rencontre de phénomènes qui appartiennent à des séries indépendantes, dans l'ordre de la causalité, [...] ce qu'on nomme des événements fortuits ou des résultats du hasard*".

Dans le domaine de la physique, avant les controverses suscitées par la thermodynamique des phénomènes dissipatifs, Albert Einstein (1879-1955) défendait l'idée d'un hasard par ignorance et Niels Bohr celle d'un hasard par essence. Pour le premier, Dieu ne peut pas jouer aux dés et *“il nous faut admirer humblement l'harmonieuse beauté de la structure de ce monde, dans la mesure où nous pouvons la saisir”* (1945). Pour le second, au contraire, la mécanique quantique enseigne que *“le hasard est dans l'essence des phénomènes, au niveau de l'infiniment petit”*.

Qu'en est-il dans les sciences de la vie ? Pendant longtemps, l'idée admise était que la diversité et le foisonnement des formes, la variété et l'enchevêtrement des processus ne sauraient longtemps cacher l'ordre de la création voulu par Dieu, ou celui du déterminisme naturel. Jean-Baptiste de Monet de Lamarck (1744-1829) cherche à donner aux processus biologiques des explications physico-chimiques. Dans l'Histoire naturelle des animaux sans vertèbres, il écrit que *“le plan des opérations de la nature à l'égard de la production des animaux est clairement indiqué par cette cause première et prédominante qui donne de la vie animale le pouvoir de composer progressivement l'organisation, et de compliquer et de perfectionner graduellement, non seulement l'organisation dans son ensemble, mais encore chaque système d'organes particuliers, à mesure qu'elle est parvenue à les établir.*

Or, ce plan, c'est-à-dire cette composition progressive de l'organisation, a été réellement exécutée, par cette cause première, dans les différents animaux qui existent”.

Comme dans les sciences physiques, le hasard n'apparaît tardivement dans le discours sur la vie qu'avec les travaux de Charles-Robert Darwin (1809-1882). La sélection darwinienne opère sur des variations individuelles et héréditaires qui ne sont pas adaptées, *a priori*, à une situation ou à une fin particulières.

Bien évidemment, ces positions ont suscité de nombreuses controverses que ce travail évoque. Elles sont révélatrices de l'opposition entre les deux paradigmes ou plutôt de la contestation du paradigme classique.

d - 6 : Complexité

Considérant la complexité des êtres vivants, Mayr et Simon (1962) définissent « *les systèmes complexes comme étant ceux où l'ensemble est plus grand que la somme des parties, non pas dans un sens ultime et métaphysique, mais dans le sens pragmatique important qu'étant donné les propriétés des parties et les lois de leurs interactions, il n'est pas facile d'en inférer les propriétés de l'ensemble* ». Une telle complexité existe à tous les niveaux depuis le noyau cellulaire jusqu'à la cellule, l'organe, l'individu, l'écosystème. Seul le vivant possède des possibilités de métabolisme variées exigeant la présence d'une énergie fabriquée, parfois mise en réserve, et aussi des pouvoirs de croissance et de différenciation.

Les approches mathématiques développées dans le chapitre suivant ne rendent pas compte de la propriété fondamentale de la complexité qu'est la notion de propriétés émergentes: "*le tout est plus (ou moins) que la somme des parties*". Aussi nous retiendrons désormais que la complexité d'un Etre conçu comme système est fonction du nombre d'éléments (quantité, qualité), du nombre de relations (quantité, qualité) entre ces éléments et de leur densité dans un espace multidimensionnel. Cette définition qualitative permet d'intégrer le temps et donc l'histoire comme déterminants de la complexité, rejoignant ainsi les enseignements de la thermodynamique des phénomènes dissipatifs qui établit que l'identité d'un système est, non pas la conséquence des causes qui en sont à l'origine (principe de raison suffisante), mais le résultat de son évolution.

Face à la complexification du vivant et particulièrement des systèmes nerveux, de nombreux auteurs ont émis l'idée que le niveau d'entropie ou de production d'entropie est une mesure de sa complexité; celle-ci étant équivalente à l'information que contient l'organisme ou la machine. Cette relation entropie-complexité-information procède d'une volonté de rompre avec l'attitude vitaliste dont les postulats sont encore actifs dans la pensée moderne de la biologie qui établit que les organismes vivants échapperaient aux lois de la thermodynamique. Cette rupture épistémologique a conduit les biologistes à appréhender les phénomènes du vivant à partir de concepts non-vitalistes et de remarquer, par exemple, que la production d'entropie est maximale pendant la reproduction et la différenciation cellulaire; phases au cours desquelles les processus d'informativité de la matière sont forts.

d - 7 : Information et complexité

Nonobstant la définition de la complexité que nous proposons, celle-ci a suscité une réflexion de biologistes dont l'approche, jusqu'aux récents développements des mathématiques, était fondée sur une approche qualitative. En effet, les organismes vivants transmettent une information génétique à leur descendance, information génétique, selon la théorie de l'évolution, elle-même produit d'une histoire. La notion de complexité s'appuie par conséquent sur les théories de l'information, qui elles mêmes enrichissent les discours sur la biologie et l'écologie.

L'observation montre que le processus évolutif a conduit à la production d'organismes de plus en plus complexes qui ne seraient, selon les sociobiologistes, que des moyens de transmission de l'information génétique.

Celle-ci est portée par la suite des bases A, T, C, G; une suite donnée dans un gène est transmise d'individu en individu le long d'un phylum. La mort des organismes sans descendance stoppe évidemment la transmission de l'information. Aussi, l'adaptation des organismes à leur milieu, en favorisant leur survie et leur reproduction, va dans le sens d'une meilleure transmission de l'information génétique. Pour les biologistes inscrits dans cette approche, ce lien entre l'évolution des êtres vivants et leur autonomie vis-à-vis de l'environnement physico-chimique est fondamental. C'est à ce niveau que la théorie de l'information initiée par Claude E. Shannon a suscité des travaux dans les années 1950 à 1970 pour réduire l'étude des structures complexes (biologiques ou non) à la théorie de l'information. Bien que contestée aujourd'hui, les idées émises à partir de ceux-ci continuent cependant de structurer de nombreuses réflexions dans le domaine de l'environnement.

L'un des principaux apports de Shannon réside dans la possibilité de dissocier quantité et signification de l'information: la quantité d'information contenue dans un message peut être mesurée indépendamment de toute référence au sens de ce message. Il y a par conséquent un antagonisme entre un discours sur la biologie: l'écologie, qui souligne l'importance de la diversité dans le vivant, et la théorie mathématique de l'information, qui repose sur une mesure universelle de l'information portée par le matériel génétique. Nous retrouvons encore une fois l'antagonisme fondamental entre des phénomènes diversifiés et des causes de ces phénomènes dont la simplicité est le postulat de base, alors que la physique récente réintègre la complexité, jusqu'alors située en dehors du champ phénoménologique.

C'est à l'aide des concepts issus de la théorie de l'information que les biologistes tentent de comprendre comment l'évolution a pu produire des organismes de plus en plus complexes, alors que l'organisation de l'information génétique est quasiment identique chez toutes les espèces vivantes, mais que les organismes les plus simples sont apparus avant les plus complexes.

La théorie dominante actuellement est issue de l'écologie. Elle envisage l'apparition des organismes complexes comme un effet de coévolution entre les espèces et leurs niches écologiques. Chaque nouvelle espèce rendant plus complexe le milieu dans lequel vivent les autres, favoriserait l'émergence d'espèces plus complexes en réponse. Une espèce donnée ne peut alors exploiter qu'une fraction du milieu qui est alors qualifiée de niche écologique.

Une fois une niche "remplie", les possibilités de reproduction dans cette niche deviennent sévèrement limitées, quelles que soient les capacités potentielles de reproduction des organismes concernés. Cette limitation vient de la compétition avec les autres membres de l'espèce qui partagent la même niche. Une fois que toutes les niches susceptibles d'être occupées par des formes simples le sont effectivement, la sélection naturelle a pu favoriser des formes plus complexes même si, à première vue, elles étaient moins efficaces en termes de reproduction. La capacité à tirer profit des ressources d'un milieu est donc un facteur déterminant de l'évolution et de la complexification des espèces. Celle-ci se réalise sous l'action de la compétition elle-même ou par l'effet de l'hétérogénéité et des changements du milieu. A la différence des constituants des écosystèmes naturels, un des éléments fondamentaux de l'évolution des écosystèmes artificiels est que ceux-ci modifieraient les milieux dans lesquels ils évoluent pour améliorer cette efficacité. C'est la notion d'Environnement développée dans la première partie.

Les derniers développements de la biologie tentent d'associer les notions d'information, de complexité et de structure. Mais, les théories sur l'information ou sur la complexité achoppent à modéliser les structures vivantes avec la même pertinence que pour le mouvement des orbites dans le domaine de la mécanique céleste. Sommes-nous capables de connaître la complexité algorithmique d'un écosystème, d'un organisme vivant ou d'une partie de cet organisme ? Pour le moment, la réponse est négative. Cela signifie que la quête d'élégance et de simplicité qui a contribué à l'élaboration du paradigme classique rencontre des limites dans l'élaboration d'un discours sur les structures complexes. Cependant, ce paradigme puissant et éprouvé continue d'alimenter le discours scientifique, qui lui-même est à l'origine des autres discours, notamment dans les sciences et pratiques de l'homme.

Mais que ce soit dans le paradigme classique ou dans le paradigme écosystémique, beaucoup d'auteurs résument l'évolution dans les écosystèmes artificiels ou naturels à une croissance de la quantité d'information présentes dans les gènes qui déterminerait le niveau de complexité de l'organisme, ou dans les cerveaux, les bibliothèques, les machines et tout support susceptible de stocker de l'information. Selon cette approche, il existerait une relation directe entre informations et complexité. L'évolution technique donne de bonnes manifestations de cette évolution. L'évolution de la complexité des machines à feu - les moteurs thermiques - est le meilleur exemple à proposer car il concerne l'utilisation de l'énergie et donc de l'entropie. Celle-ci conceptualise le désordre du système; sa dimension chaotique. Depuis, des mathématiciens lui ont associé les notions d'indécidabilité et d'indémonstrabilité.

C : Rôle des mathématiques dans le paradigme écosystémique

1 : Préambule

Pour la rentrée de septembre 2001, le nouveau programme de physique de 1ère Scientifique diffusé aux enseignants comprenait en introduction du chapitre “Qu’est ce que la physique: science de la nature ?” le préambule suivant: *”Les mathématiques jouent un rôle plus profond en physique que dans les autres sciences: le grand architecte semble être mathématicien”*. En 1988, pourtant, Jean-Paul Delahaye écrivait dans le magazine La Recherche: *“La science du XXème siècle présente une caractéristique fascinante: elle en vient à découvrir ses propres limites. L'exemple le plus connu est celui de la mécanique quantique où le principe d'incertitude de Heisenberg impose des bornes à la notion de mesure. Plus déconcertants encore peut-être sont les résultats démontrés depuis 1930 en mathématiques concernant l'impossibilité de certaines démonstrations, car ils pourraient assigner une limite à la pensée elle-même. Un pas nouveau dans cette voie vient d'être franchi par G. Chaitin: il a construit par des moyens informatiques une équation qui échappe à jamais au pouvoir des mathématiques”*.

C’est Gregory Chaitin qui écrivait lui-même dans ce même magazine en décembre 2003: *“La complexité du monde vivant est-elle réellement explicable par l'évolution de programmes simples ? Comment rendre compte de l'impression de complexité croissante que donnent l'évolution des espèces, celle de l'homme... et celle de la science ? On peut soutenir que la vie renforce beaucoup l'hypothèse de la complexité infinie d'un monde dont une large part resterait à jamais incompréhensible”*.

Que d'opposition entre le catéchisme rédigé par l'Education nationale destiné aux pasteurs de la science classique et les dernières réflexions de mathématiciens contemporains. Ils sont toujours nombreux à poursuivre leur quête d'outils pour penser la Nature dans toutes ses manifestations, mais d'autres considèrent que leur art est engagé dans une impasse, ou pour le moins, doit s'exercer dans des espaces soigneusement bornés. Or, cette prééminence des mathématiques dans le discours scientifique est la conséquence de choix épistémologiques qui de Platon à Einstein ont participé au formidable développement de la science et que relaient dans leur sacerdoce quotidien les enseignants de tous niveaux. Ce sont ces choix épistémologiques qui sont interrogés par le développement même des mathématiques et de la physique au cours du XXème siècle.

Le chapitre précédent a souligné l'émergence de concepts issus de la thermodynamique et de l'écologie comme le désordre. Or, une démarche ontologique fondée sur le désordre est par essence non déterministe, intègre la non-linéarité, les bifurcations, les états marginaux et par conséquent oblige à s'interroger sur la place des mathématiques dans le paradigme écosystémique dont les maîtres-mots sont désordre et complexité. Comment formaliser ce désordre, cette complexité ? Est-il possible d'élaborer des mathématiques du chaos qui rompent avec une approche probabiliste ou déterministe ne considérant le désordre que comme une anomalie ou un manque de connaissance ?

Depuis les Grecs, le rôle des mathématiques dans l'acquisition ou la formalisation de connaissances a été alimenté par les plus grands esprits d'aujourd'hui et d'hier. Il est incontournable d'évoquer les principaux enjeux de ce débat car la place des mathématiques dans la société française est immense. Sans doute plus qu'ailleurs.

Pour s'en convaincre, il n'y a qu'à comparer le pourcentage de médailles Fields acquises par des francophones par rapport à celui des prix Nobel de science issus du même espace culturel. Sur les 43 médailles Fields décernées depuis 1936, 11 sont allées à des mathématiciens français.

En France, tout discours n'intégrant pas un minimum de sémantique mathématique est donc a priori jugé suspect de laxisme. Ces mathématiques jouent un rôle essentiel dans le paradigme classique et quelles que furent les motivations à l'origine de leur prééminence, force est d'admettre qu'il est impossible d'éluder leur rôle dans le paradigme écosystémique. C'est l'objet de ce chapitre d'y répondre et de montrer comment la détermination des composantes principales de ce dernier paradigme apporte un élément de réflexion dans le débat millénaire portant sur ces mathématiques.

Aussi, après avoir retracé les principales étapes de l'histoire des mathématiques fondées sur l'ambition ontologique, nous évoquerons les doutes créés par les théorèmes autolimitant leur rôle. Puis, nous montrerons les limites actuelles de ces dernières à formaliser l'aléa et la complexité d'émergence.

2 : Les mathématiques: voie royale vers la connaissance

Tout d'abord il y eut Platon (-428/-347) et son ambition de parvenir par les Idées à l'essence des choses. Les mathématiques permettent cette aspiration. Platon est donc considéré comme le premier philosophe à avoir postulé à l'intelligibilité du monde car il a une structure cohérente, elle-même créée par un dieu garant de cette unicité. Cette rupture théologique dans un panthéon polythéiste suppose l'existence d'un Dieu unique. Cette idée est une constante de la civilisation occidentale qui, intégrant le dieu unique des juifs, a fait coïncider la philosophie platonicienne et la religion judéo-chrétienne.

Cette ambition platonicienne est relayée par l'association des mathématiques et de la théologie chrétienne qui de Saint-Augustin (354-430) à Georg Cantor (1854-1918) a conçu les mathématiques comme la voie royale permettant d'accéder à Dieu.

Qu'ils soient laïcs ou religieux, de nombreux auteurs ont soutenu l'idée de mathématiques véritables sources de connaissances. Ainsi, au XVII^{ème} et au XVIII^{ème} siècle, en particulier, plusieurs défenseurs du christianisme ont souligné que les mathématiques fournissaient une occasion privilégiée de s'approcher de Dieu. Le Révérend Père Bernard Lamy, prêtre de l'Oratoire s'exprimait ainsi dans le préambule de ses "Eléments de géométrie" publié en 1685: *"C'est Dieu qu'il faut regarder en toutes choses et l'étude de la Géométrie doit y porter. On y trouve de grands sujets de penser à lui. Tout ce qu'on voit de beau dans cette science touchant les figures, leurs raisons et leurs proportions se remarque ensuite dans les Ouvrages de la Nature, ce qui donne lieu d'admirer celui qui en est l'Ouvrier. (...) Outre le plaisir spirituel que donne la Géométrie pour insinuer du mépris pour les voluptés et par là nous rendre plus propres pour la morale de l'Evangile (...), elle nous fait encore connaître quelle est la vaste étendue de la Science que possèdent ceux qui voient Dieu, et de quel plaisir ils jouissent en découvrant tant de vérités dans la Divine Essence"*. Dans un autre livre (Entretiens sur les sciences), le Père Lamy notait que les Pères de l'Eglise avaient vanté l'utilité de cette science dont *"l'Écriture parle avec éloge"* et *"que Moïse avait apprise des Egyptiens et Daniel des Chaldéens"* (Thuillier, 1987).

Plus près de nous, Georg Cantor, héros des formalistes, mathématicien allemand situé par ses origines familiales au confluent du judaïsme, du luthérianisme et du catholicisme, soumettait systématiquement ses inventions au jugement des autorités religieuses (Thuillier, Le petit savant illustré, 1980).

Cependant, malgré la persistance de cette recherche de Dieu par les mathématiques, la compréhension de l'univers et de la nature (*physis*) est devenue le but de la physique mathématique naissante.

Ainsi, dans le même esprit et dans la continuité d'une tradition authentiquement platonicienne Galileo Galilée (1564-1642) affirme, dans un célèbre passage, la structure géométrique de l'univers: *“La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux, je veux dire l'Univers, on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Or, il est écrit dans la langue mathématique et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques, sans le moyen desquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot”* (Il Saggiatore, 1632 dans dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, page 437).

Gottfried Wilhem Leibniz (1646-1716) dans “Discours de métaphysique”, publié en 1686 (Chaitin, 2003) écrit en français: *“On peut dire que, de quelque manière que Dieu auroit créé le monde, il auroit toujours été régulier et dans un certain ordre general. Mais Dieu a choisi celui qui est le plus parfait, c'est à dire celui qui est en même temps le plus simple en hypothèses, et le plus riche en phénomènes”*. Les lois de Dieu et les lois de la nature ne font qu'une.

Dans le prolongement de cette profession de foi, de prestigieux auteurs ont apporté leur pierre à cette forteresse philosophique qui continue à se développer de nos jours. Ainsi, dans ‘Le monde ouvert’ publié en 1932, Hermann Weyl (1885-1955) (Chaitin, 2003) développait la même idée: *“L'assertion que la nature est régie par des lois strictes est vide de tout contenu si nous n'ajoutons pas l'affirmation qu'elle est régie par des lois mathématiques simples [...]”*.

L'étonnant n'est pas qu'il existe des lois naturelles, mais que plus on avance dans l'analyse, plus fins sont [...] les éléments auxquels les phénomènes sont réduits, plus les relations fondamentales deviennent simples (et non plus compliquées, comme on s'y attendrait) et plus elles expliquent les faits avec exactitude”.

Cette conviction est relayée par des physiciens comme Albert Einstein dont le rêve fut d'unifier les quatre forces élémentaires (gravitation, forces électromagnétiques, interactions faibles, interactions fortes). Aujourd'hui, Stephen Hawking soutient aussi l'idée d'une unification possible des savoirs dans son ouvrage "Theory of everything". La diffusion de ces idées de simplicité dans un opinion publique qui y aspire crée un phénomène d'autoentretien de cet élément du paradigme classique.

Aussi, l'idée que les mathématiques, expression de la perfection, sont tout à la fois le langage et le chemin qui mène droit aux lois naturelles d'un monde parfait et intelligible que Dieu a créé, est un postulat incontournable de la science classique. En outre, le postulat fondamental qui se construit de Pythagore (-580/-500) jusqu'à aujourd'hui, en passant par Baruch Spinoza (1632-1677) et G. Leibniz est que ce monde est, malgré des manifestations phénoménologiques brouillonnes, assez simple.

Hier Dieu, la Nature au XVIIème siècle, la réalité archaïque aujourd'hui (A. Connes, La Recherche 2000), innombrables sont les auteurs à faire leur cet acte de foi. Pourtant, au sein même de cette tradition deux courants s'opposent entre ceux qui voient dans les mathématiques une création de l'esprit humain et ceux pour qui elles sont un outil conçu pour formaliser des phénomènes. Cette opposition s'organise entre deux catégories: les ontologistes, réalistes d'une part; les formalistes, puristes d'autre part.

Elle s'inscrit dans le débat plus large confrontant les vues des positivistes aux constructivistes dans le prolongement de la dimension inductive ou déductive de la science et de la connaissance; le dualisme kantien confrontant des connaissances *a priori* aux connaissances *a posteriori*.

Les formalistes postulent à un développement autonome des mathématiques, les connaissances issues de cette prospection fournissant des outils pour penser le réel. L'exemple le plus connu de cette approche est celle à l'origine de la notion d'espace courbe de Einstein imaginée dans le prolongement des mathématiques non euclidiennes, fondées, entre autres, à partir des travaux de Bernhard Riemann (1826-1866) et de Nikolaï Ivanovitch Lobatchevski (1792-1856). Selon les partisans de cette conception des mathématiques, notre rapport au monde sensible serait déterminé par les langages que nous avons élaborés d'une manière autonome. Aussi, dans ce que Jean-Louis Le Moigne (Que sais-je: les épistémologies constructivistes) regroupe dans l'expression d'épistémologies constructivistes, le formalisme prime sur l'ontologie. En revanche, pour les ontologistes, la création mathématique est une réponse à des problématiques concrètes. Les deux exemples de référence de cette approche sont le calcul différentiel développé par Isaac Newton (1642-1727) et Leibniz issu de l'étude du mouvement des planètes et les dérivées et transformées de Fourier issues de l'étude de la diffusion de la chaleur.

Alternativement ontologistes ou formalistes dominant le discours mathématique. Depuis David Hilbert (1862-1943), c'est l'approche formaliste qui prime, mais les derniers développements ramènent sur le devant de la scène l'approche réaliste dont les mathématiques des ondelettes constituent un des derniers cas de référence (Jean-Pierre Kahane, 2001).

Quels sont alors les présupposés qui étayent les positions des ontologistes et des formalistes ?

Une controverse célèbre entre Joseph Fourier (1768-1830) et Carl Jacobi (1804-1851) la résume. Les vues exprimées en 1822 par le premier dans son ouvrage sur la *Théorie analytique de la chaleur* sont sans équivoques: "*l'étude approfondie de la nature est la source la plus féconde des découvertes mathématiques. Non seulement cette étude, en offrant aux recherches un but déterminé, a l'avantage d'exclure les questions vagues et les calculs sans issue; elle est encore un moyen assuré de former l'analyse elle-même, et d'en découvrir les éléments qu'il importe le plus de connaître, et que cette science doit toujours conserver: Ces éléments fondamentaux sont ceux qui se reproduisent dans tous les effets naturels (...). Considérée sous ce point de vue, l'analyse mathématique est aussi étendue que la nature elle-même (...). Son attribut principal est la clarté... elle rapproche les phénomènes les plus divers, et découvre les analogies secrètes qui les unissent (...). Elle semble être une faculté de la raison humaine destinée à suppléer à la brièveté de la vie et à l'imperfection des sens (...)*".

Ainsi le développement des mathématiques dont l'Analyse est depuis Newton et Leibniz la branche la plus riche est, pour Fourier, fondée sur l'étude de la nature et permet d'en exprimer les lois les plus générales. Sa puissance réside d'abord dans son universalité: "*Elle suit la même marche dans l'étude de tous les phénomènes; elle les interprète par le même langage, comme pour attester l'unité et la simplicité du plan de l'univers, et rendre encore plus manifeste cet ordre immuable qui préside à toutes les causes naturelles*". Dans le prolongement de ces propos, J. Fourier introduit une technique d'analyse spéciale, appelée aujourd'hui Analyse de Fourier dont une partie, les séries de Fourier, a été étendue à une multitude de phénomènes concrets au moyen de calculs numériques. C'est pour formaliser les répartition de la chaleur au sein d'un corps solide que Fourier a imaginé cette technique mathématique à laquelle son nom est désormais associé: la loi de diffusion de la chaleur.

Pourtant, depuis la moitié du XIX^{ème} siècle l'approche formaliste-puriste s'affirme. En rupture avec les conceptions de Laplace et de Fourier, des mathématiciens comme Peter Gustav Lejeune-Dirichlet (1805-1859), C. Jacobi, D. Hilbert, G. Cantor vont chercher à formaliser les fondements d'une mathématique pure. Dans une lettre datée du 2 juillet 1830 adressée à Legendre, Jacobi expose ses vues: "*M. Fourier... nous fait reproche, à Abel et à moi, de ne pas nous être occupés de préférence du mouvement de la chaleur. Il est vrai que M. Fourier avait l'opinion que le but principal des mathématiques était l'utilité publique et l'explication des phénomènes naturels; mais un philosophe comme lui aurait dû savoir que le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain et que, sous ce titre, une question de nombres vaut autant qu'une question de système du monde*". Pour G. Cantor, "*les mathématiques sont entièrement libres dans leur développement et leurs concepts sont seulement soumis à la nécessité d'être non contradictoires et d'être rattachés par des définitions précises aux concepts introduits antérieurement (...). L'essence des mathématiques réside dans leur liberté*". Les formalistes préfèrent donc des mathématiques pures, libres, insensibles aux contingences des physiciens ou des ingénieurs.

Un non-mathématicien jetant un regard d'épistémologue sur cette opposition dirait que l'une de ces approches n'a jamais totalement éliminé l'autre et que les mathématiques se développent sur deux pieds. Il n'y a donc pas autant d'antagonismes que les mathématiciens l'imaginent. Certes, l'origine de la connaissance est controversée et fait l'objet de débats sans issues, mais l'une et l'autre approches reposent sur les mêmes postulats que sont la logique, le raisonnement, la déduction etc. et que, quels que soient les présupposés qui l'engendrent, le développement des mathématiques aboutit finalement à la constitution d'un véritable savoir.

Cette polémique opposant formalistes et ontologistes a cependant un mérite.

Elle pousse les mathématiciens à préciser leurs concepts, à expliciter les axiomatiques pour aboutir à des démonstrations impeccables. L'aboutissement de cette démarche est exprimée par David Hilbert qui, pendant le second congrès de mathématiques, tenu à Paris en 1900, a présenté une réponse à la conférence faite quatre ans auparavant par son grand rival, Henri Poincaré, dans laquelle ce dernier plaidait pour des relations étroites entre les mathématiques et la physique. Hilbert, lui, préférait tenter de « deviner le futur » des mathématiques, à travers un choix de 23 problèmes qui allaient, selon lui, marquer le cours des mathématiques du XXème siècle.

Ainsi, les formalistes (structuralistes) nient le caractère ontologique des mathématiques qu'ils considèrent comme un système de déductions logiques obtenues à l'extérieur d'un langage, à partir d'axiomes. Au contraire, les ontologistes, comme A. Connes, postulent à l'existence d'une réalité mathématique préalable à l'élaboration des concepts. La réalité y est indépendante de l'esprit. C'est aussi l'attitude positiviste. Pour les autres, les structuralistes, l'esprit précède le réel et donc appose ses visions sur des sensations. Cependant, les uns et les autres poursuivent le même but.

L'histoire des mathématiques apparaît alors comme un cheminement dont le paroxysme fut d'avoir espéré accéder à des lois d'une nature parfaite voulue par un Dieu parfait, indépendamment de toutes confrontations aux phénomènes pour aboutir aujourd'hui à une profonde interrogation sur leur espace de compétences. D'Evariste Galois (1811-1832) à Gregory Chaitin, des mathématiciens et des physiciens vont démontrer leurs limites, en particulier, et de la science, en général, comme vecteurs de connaissances.

3 : A la découverte des limites des mathématiques

Une des premières brèches ouvertes dans les ambitions ontologiques des mathématiques est due aux travaux de Niels Abel (1802-1829) et de Evariste Galois qui montrèrent au début du 19ème siècle qu'il était impossible de résoudre par radicaux les équations algébriques de degré supérieur à 5. Puis, le théorème de Rouché-Fontené renseigna sur l'existence et le nombre de solutions d'un système en précisant les conditions où le système possède une solution et une seule; admet une infinité de solutions, et enfin les cas où le système admet au moins une solution, ce qui détermine par conséquent les conditions de l'absence de solution. Ce dernier cas est celui où le rang (colonnes) du système est inférieur au nombre d'équations (lignes) et que les déterminants caractéristiques sont nuls. La traduction de ce théorème pour les non-mathématiciens est que, pour qu'un système ait au moins une solution, le nombre d'équations doit être au moins égal au nombre d'inconnues. D'un point de vue mathématique, la capacité d'un ensemble d'équations ou de systèmes matriciels à produire les solutions aux incertitudes qu'ils génèrent est limitée, entre autres, par ces deux théorèmes.

La révélation d'antagonismes irréductibles entre les conséquences philosophiques de discours mathématiques et l'étude de systèmes physiques naturels très simples comme le mouvement des astres visibles fut de tout temps un vecteur important de la philosophie naturelle. H. Poincaré fut parmi ceux qui formalisèrent le mieux les problématiques posées et leurs enjeux en remarquant dès 1899, que, même quand les lois de la mécanique classique s'appliquent, comme dans le problème des trois corps en mécanique céleste, la prédiction n'est pas toujours assurée. Les problèmes posés par la dynamique des systèmes à n-corps figurent parmi les défis majeurs lancés à l'analyse mathématique dont les succès les plus manifestes concernent l'évolution des systèmes à 2 corps.

Le premier grand ouvrage de Laplace, intitulé “Théorie du mouvement et de la figure elliptique des planètes” (1784), utilisa le fruit de recherches antérieures sur l’intégration des systèmes d’équations différentielles et la théorie des séries pour formaliser, par les mathématiques, les mouvements de planètes. Cet auteur s’intéressa au problème des trois corps reconnu par Leonhard Euler (1707-1783), Alexis Clairaut (1713-1765) et Jean d’Alembert (1717-1783) comme la pierre d’achoppement d’une théorie correcte du mouvement des planètes; la solution exprimée par les lois de Kepler ne convient qu’à un système de deux corps s’attirant mutuellement. Dans le prolongement des travaux de ses prédécesseurs, H. Poincaré détermina les conditions d’intégrabilité de ces systèmes à n -corps et conclut à leur non-intégrabilité. En termes communs, cela signifie qu’il n’est pas possible de retracer l’évolution d’un système dynamique, c’est à dire son passé et son futur, autrement que pour les systèmes à 2 corps.

Les conséquences épistémologiques de cette démonstration sont, au moins, au nombre de deux. La première est résumée par la majorité des physiciens qui comme Max Born (1882-1970) affirment qu’il “*serait vraiment remarquable que la Nature ait trouvé le moyen de résister au progrès de la connaissance en se cachant derrière le rempart des difficultés analytiques du problème à n -corps*”. Celle-ci a débouché sur de nombreux travaux dont l’hermétisme en limite la diffusion, même chez les plus érudits. La seconde est d’admettre une limite intrinsèque à l’usage des mathématiques à formaliser le fonctionnement des systèmes quels qu’ils soient. Ce courant de pensée s’appuie sur le théorème d’incomplétude de Kurt Gödel (1906-1978).

Celui-ci fut la réponse à l’ambition d’une série d’illustres mathématiciens comme Gottlob Frege (1848-1925), Giuseppe Peano (1858-1932), David Hilbert, mais aussi Euclide (-IV/-III siècle ?), plus de deux millénaires avant, pour déterminer des règles absolues de raisonnement et de démonstration en mathématiques.

Le but ultime était de trouver un système de raisonnement garantissant l'impossibilité de trouver une aporie dans les discours favorisant l'émergence de connaissances.

C'est en 1930 que Kurt Gödel établit que tout système formel qui ne démontre que des énoncés arithmétiques vrais est nécessairement incomplet, car certains énoncés arithmétiques vrais ne pourront y trouver de démonstration. Le pendant en physique du théorème d'incomplétude de Gödel est le principe d'incertitude de Heisenberg (1901-1976) énonçant qu'il n'est pas possible, à l'échelle de l'infiniment petit, de connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule. L'un et l'autre ont démontré les limites de leurs disciplines à répondre à leurs exigences ontologiques.

La conséquence du théorème d'incomplétude est fondamentale. Gödel l'a démontré en se fondant sur des propositions démontrables fausses et des propositions indémontrables vraies. Sa conclusion est qu'il est impossible de rendre compte de certaines règles de l'arithmétique sans déborder de l'axiomatique de référence de cette arithmétique. Ce théorème montre que l'autonomie d'un système mathématique formel est illusoire dans la mesure où les démonstrations nécessaires pour valider le contenu de ce système nécessitent de recourir à des énoncés qui lui sont extérieurs. Un système mathématique isolé ne peut donc servir de base aux démonstrations de ses principes. La démonstration d'un principe d'un système de degré donné doit donc recourir à un principe extérieur au système pour être réalisé. Ce théorème ruinait par conséquent l'espérance des mathématiciens formalistes dont D. Hilbert, au congrès de Paris de 1900, avait établi les ambitions: réorganiser les mathématiques sur le fondement d'un formalisme où toutes les propositions se déduiraient les unes des autres.

Malgré ce théorème, de nombreux mathématiciens continuèrent à postuler qu'il était possible de déterminer une procédure infaillible permettant de décider si un énoncé mathématique était vrai ou faux. Ce fut Alan Turing (1912-1954) qui montra que cet espoir était vain en imaginant une machine à calculer capable de réaliser tous les calculs possibles. Turing a démontré qu'il n'existe pas d'algorithme permettant de savoir si ce programme aurait une fin, donc aboutirait à une réponse.

G. Chaitin, quant à lui, a démontré qu'il n'est pas possible de prouver qu'une théorie est la plus simple possible, montrant ainsi que le monde des idées mathématiques est d'une complexité infinie (selon sa définition de la complexité exposée dans le chapitre suivant sur la complexité algorithmique) et n'est donc pas compréhensible. Pour G. Chaitin, la présence de ce chaos en mathématique limite les possibilités de compréhension des phénomènes fondés sur la compressibilité des théories; c'est le principe de simplicité, idéal de philosophes de la nature cherchant à révéler la nature simple de l'Univers formalisable par des lois simples exprimées dans le langage mathématique. Ce faisant, cet auteur associe les notions d'indécidabilité et d'indémonstrabilité des mathématiques à celle d'entropie des physiciens qui conceptualise le désordre du système, sa dimension chaotique.

Tout en étant conscient que la technique pour s'engager dans ces débats n'est accessible qu'à peu de personnes dans le monde, l'évocation de ces travaux montre cependant l'écart qui existe entre une mathématique popularisée et enseignée selon l'adage figurant dans les instructions pédagogiques destinées aux professeurs des lycées et la réalité, souvent hermétique, de la recherche en mathématique contemporaine. Cette mathématique popularisée est la résultante de choix épistémologiques faits par des auteurs comme Leibniz, Einstein, parmi d'autres innombrables.

Le postulat fondamental est d'exclure le désordre de la nature, alors que Chaitin, dans le prolongement de Gödel et de Turing affirme avoir démontré que Dieu joue aux dés en mathématiques, ce qui pose la question, comme pour le monde physique, de leur compréhensibilité.

Ces trois mathématiciens sont à l'origine de la notion d'indémonstrabilité en démontrant le caractère à jamais incertain des fondements des mathématiques. L'existence de ces indémontrables, de ces indécidables favorisa le développement de nouvelles mathématiques abandonnant l'espérance ontologique de leurs aînées. Elles furent, entre autres, à l'origine d'une appréhension de la notion de complexité, qui elle même était la conséquence logique du développement des sciences et particulièrement de la thermodynamique des systèmes évoluant loin de l'équilibre thermodynamique: les systèmes vivants. Cependant, cette appréhension mathématique de la complexité achoppe elle aussi à formaliser une des propriétés fondamentales des systèmes complexes que sont les émergences. Aussi, cette complexité mathématique se borne-t-elle à formaliser des phénomènes accessibles à une démarche fondée sur des algorithmes; donc la répétition; donc l'organisation et la logique ébranlée par les auteurs précités.

Les travaux de Gödel, Turing et Chaitin participent à une interrogation sur l'intelligibilité du monde et le pouvoir de la physique mathématique. Il y a donc un abîme entre la conception ontologique des mathématiques et la négation de ce pouvoir démontrée avec les outils à l'origine de l'espérance ontologique. C'est dans le prolongement des doutes créés par ces travaux que se situe la réflexion sur leur rôle dans la formalisation des phénomènes observés dans les structures dissipatives dont les maîtres-mots sont désordre et complexité. Il est donc nécessaire d'évoquer les discours sur la complexité et le désordre pour aboutir à une position sur le rôle des mathématiques dans le paradigme écosystémique.

4 : Désordre et complexité

Le postulat fondamental de la pensée scientifique classique est que le Réel est simple et intelligible, accessible par des voies déductives ou inductives par les mathématiques. L'immense majorité des scientifiques adhère à cette profession de foi qui permet l'espérance de la connaissance absolue. Or, la thermodynamique dont nous avons exposé le cheminement est arrivée à la conclusion que le désordre est consubstantiel à la matière et en garantit la pérennité et l'évolution. De leur côté, des mathématiciens et des physiciens affirment que ce hasard, dans leurs domaines respectifs, est aussi un constituant fondamental de la matière et des mathématiques. Au coeur de ces interrogations se trouvent les notions de complexité et de désordre, la première étant souvent assimilée à la seconde.

C'est cette première assimilation qui favorisa le développement des approches probabilistes. Pierre Simon de Laplace, dans son "Essai philosophique sur les probabilités" (1814) a posé les fondements de l'approche probabiliste pour rendre intelligible un réel chaotique quand celui-ci échappe aux lois déterministes: *"Tous les événements, ceux mêmes qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature, en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du soleil. Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, on les a fait dépendre des causes finales, ou du hasard, suivant qu'ils arrivaient et se succédaient avec régularité, ou sans ordre apparent; mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances, et disparaissent entièrement devant la saine philosophie, qui ne voit en elles que l'expression de l'ignorance où nous sommes des véritables causes (...). Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre.*

Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux."

Le hasard n'existe donc pas. Il est un concept inventé pour masquer l'ignorance où les difficultés techniques rencontrées pour formaliser des phénomènes complexes, désordonnés avec la même rigueur que le mouvement des orbites. Ainsi, cette attitude à l'origine du paradigme classique postule un réel intelligible, ordonné, mais inaccessible dans sa totalité à l'esprit humain. D'où le recours à une attitude réductionniste pour tenter de le déchiffrer par les probabilités.

5 : Complexité d'émergence

Pour sortir des impasses rencontrées par la mécanique statistique, les mathématiciens s'engagèrent parallèlement aux physiciens dans ces questions de désordre et de complexité. L'école russe dont Andreï Kolmogorov (1903-1987) est le représentant le plus connu contribua à ce débat en montrant que la complexité est réductible à une approche algorithmique en la dissociant du concept de désordre. Gregory Chaitin a poursuivi cette réflexion qui a cependant abouti aux conclusions déjà évoquées. Les mathématiciens distinguent alors la complexité aléatoire et la complexité organisationnelle. La complexité aléatoire a été envisagée dans le cadre de la théorie algorithmique de l'information engendrant la notion de complexité algorithmique. Cette dernière est proportionnelle à la taille du plus petit programme d'ordinateur permettant d'engendrer un phénomène jugé complexe.

La complexité de Kolmogorov-Chaitin est donc une complexité descriptionnelle fondée sur la notion d'aléa. On la définit $K(s)$ comme la longueur du plus court programme qui engendre une suite finie 's'. Ainsi, une partition de musique qui alignerait en do majeur une suite de ré d'une même durée est, selon cette approche, d'une complexité inférieure à celle d'une partition d'un compositeur fameux car, le programme engendrant la première partition est plus facile à obtenir que le second. Cependant, un alignement désordonné de notes de durées différentes, selon la définition de Kolmogorov-Chaitin, serait d'une complexité incommensurable. Pourtant, il est intuitivement perceptible que cela ne serait pas de la musique, mais du bruit.

Cette première définition est par conséquent insuffisante pour rendre compte de la complexité d'émergence. La notion de complexité organisée répond-elle alors à nos attentes ? Celle-ci est identifiée à la profondeur logique de Bennett définie comme le temps de calcul qu'il faut à une machine universelle M (machine de Turing) pour produire une suite 's' à partir de sa description minimale. Comme pour la complexité aléatoire, la complexité organisée repose sur l'idée qu'il existe un plus petit dénominateur commun dont la taille, la probabilité d'apparition ou le temps de calcul pour l'obtenir détermine la complexité. Toutes deux sont néanmoins fondées sur une approche algorithmique de la complexité consistant en la description de la plus courte longueur possible d'une séquence finie donnée. Ces approches mathématiques ne rendent donc pas compte de la propriété fondamentale de la complexité qui participe à la constitution des principes de fonctionnement des écosystèmes dans le paradigme écosystémique: l'émergence de propriétés du système de complexité donnée irréductibles aux propriétés de ses constituants. C'est la complexité d'émergence. Cette dernière approche de la complexité a, en outre, écarté le désordre de sa définition. Mais les physiciens évoluant dans le paradigme classique l'ont intégré dans le chaos déterministe.

6 : Le chaos déterministe

Comme pour les termes complexité et désordre, les adjectifs « chaotique » et « aléatoire » sont longtemps restés synonymes. Aujourd'hui le terme de chaos, c'est à dire le désordre absolu, se rapporte à une classe de phénomènes bien définis où l'imprédictibilité est certes présente, mais où, pour les physiciens à l'origine de la notion de chaos déterministe, n'en existe pas moins un ordre sous-jacent. Il est donc conçu comme une manifestation phénoménologique qui masque un ordre dissimulé.

Le postulat sous-jacent à cette approche du désordre est qu'une succession d'événements est qualifiée d'erratique ou d'aléatoire si elle n'obéit apparemment à aucune loi, à aucune régularité qui permettent de les prévoir. "Aléatoire" est alors synonyme d'"imprédictible" : c'est le désordre. Mais ce désordre est toutefois conçu dans le prolongement de l'approche probabiliste dans la mesure où il apparaît accessible à travers la loi des grands nombres. Le caractère désordonné est alors lié à la conjonction d'une multitude d'événements apparemment indépendants entre eux.

Pour les physiciens se pose alors une interrogation fondamentale: un comportement erratique ne peut-il avoir son origine que dans une loi des grands nombres ? Leur réponse est non. Chaos et déterminisme n'apparaissent pas alors antinomiques. Aussi, ce chaos déterministe se rencontre aussi bien dans les systèmes dynamiques (sans dissipation d'énergie vers l'extérieur) que dans les systèmes dissipatifs. Mais, dans ces derniers, la notion de chaos est intimement liée à celle d'attracteurs étranges. C'est à dire la convergence vers un état d'équilibre où les postulats du paradigme classique retrouvent leur pertinence.

La notion de chaos déterministe tente donc de travestir les fondements du paradigme classique pour y intégrer le désordre comme manifestation phénoménologique admise dans un univers dominé par l'ordre.

Cependant, ce désordre conserve son statut d'anomalie masquant un ordre inhérent à la matière⁵. Aussi, les tentatives des mathématiciens à travers la notion de complexité algorithmique ou des physiciens par le chaos déterministe pour répondre aux interrogations liées à l'émergence de la complexité et du désordre dans la philosophie naturelle sont une manifestation de leur volonté de se conformer aux présupposés de la science moderne. Elles s'inscrivent dans le paradigme classique dont les composantes apparaissent, malgré l'immixtion du désordre et de la complexité, de plus en plus marquées par l'ordre, le déterminisme et la simplicité dont rendent compte des lois-modèles répondant à cet idéal. Or, ces interrogations débouchent aussi sur de nouvelles conceptions en rupture avec ces présupposés. Le désordre y est alors consubstantiel à la matière et en constitue une des conditions de sa pérennité et de son évolution. La complexité d'un système n'est pas réductible à des lois de la nature valables pour tous les systèmes quels que soient leur niveau de complexité. Aussi, la place des mathématiques dans le paradigme écosystémique est-elle fragilisée en raison des limites que les mathématiciens lui ont assignées, mais aussi par le développement d'une physique des systèmes en non-équilibre thermodynamique qui entrevoit le désordre, les fluctuations, l'irréversibilité comme la seule source d'évolution vers des niveaux de complexité croissante. Comment alors bâtir des mathématiques non déterministes et non probabilistes ?

⁵ « Une cause très petite qui nous échappe détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas voir et alors, nous disons que cet effet est dû au hasard », R. Poincaré dans «Science et méthode ».

7 : Le désordre de la nature

Le chapitre sur la thermodynamique a exposé les deux catégories fondamentales de cette discipline: la thermodynamique d'équilibre, la thermodynamique du non-équilibre. Cette dernière s'organise aussi en deux catégories: la thermodynamique des états stationnaires (qualifiée aussi de proches de l'équilibre thermodynamique), la thermodynamique des états marginaux.

Une des fonctionnalités des mathématiques est de fournir des outils quantitatifs aux ingénieurs et aux scientifiques, mais dans un espace de compétence relevant de la catégorie des systèmes en situation ou proches de l'équilibre thermodynamique. Les systèmes dynamiques sont en équilibre thermodynamique. La place des mathématiques dans le paradigme écosystémique revient donc à s'interroger sur leur fonction dans des situations de non-équilibre thermodynamique en régime stationnaire ou marginal étant entendu qu'il n'y a pas d'espace phénoménologique distinct entre toutes ces catégories. Le désordre, assimilé aux fluctuations thermodynamiques dues aux irréversibilités dont l'évolution de l'entropie rend compte, devient alors un élément fondamental de la structuration et de l'évolution des écosystèmes. Les notions d'état marginal, de bifurcation sont beaucoup plus riches conceptuellement et phénoménologiquement que celle d'aléa du chaos déterministe. Dans le paradigme écosystémique, l'aléa n'est pas un épiphénomène, mais la condition nécessaire à la pérennité par le changement. La complexification d'une structure étant conçue comme une nécessité pour repousser les conséquences du second principe de la thermodynamique. L'aléa est alors vu comme un élément de l'exploration de l'espace des phases de tout système dissipatif que sont les écosystèmes pour explorer de nouvelles configurations plus complexes soumises à de nouvelles contraintes.

Est-il alors possible d'élaborer des mathématiques dont la raison d'exister a comme préalable l'ordre et le déterminisme alors que le nouveau paradigme relativise leur prééminence ?

Cette interrogation n'est pas résolue par les approches probabilistes. Ces dernières en effet postulent, elles aussi, à un déterminisme sous-jacent à la matière. Notons qu'elles se sont développées pour des systèmes abiotiques ou, pour le moins, des systèmes à l'état stationnaire. Les tentatives d'intégration du désordre dans le champ des mathématiques, notamment par le développement de la théorie de la complexité ou du chaos déterministe, ont abouti à l'émergence d'un doute sur leur capacité à intégrer cette nouvelle dimension car elles n'ont pas fondamentalement remis en question les fondements du paradigme classique. En effet, le mot 'désordre' recouvre des phénomènes qui s'opposent à l'ordre. C'est ce dernier qui a fait l'objet des premières démarches spéculatives pour en estimer le futur à partir de lois de la nature. Or, si les modèles/lois qui en sont issus permettent, pour des systèmes très simples à l'échelle humaine, de prédire leur évolution, ils se révèlent incapables d'estimer le changement. Pour les systèmes planétaires, perçus comme des exemples de pérennité, ce changement est inaccessible à l'échelle humaine. En revanche dès que les systèmes présentent un degré de complexité à l'origine de propriétés émergentes irréductibles aux propriétés de leurs constituants, notamment les systèmes dissipatifs, tant l'évolution que les changements deviennent délicats à appréhender.

Quelles sont alors les lois qui permettraient de deviner ces changements et les branches thermodynamiques que le système va emprunter ? Appréhendée avec les outils de la thermodynamique, la réponse qui vient immédiatement à l'esprit est de recourir aux lois de l'énergie pour réaliser ce but. Or, les systèmes dissipatifs poursuivent deux buts inconciliables simultanément: maximiser leur énergie utile; minimiser leur production d'entropie.

Comment alors déterminer une trajectoire représentée par une fonction mathématique, alors que celle-ci, si trajectoire il y a, va s'inscrire dans un espace borné par deux principes antagonistes ? Pour répondre à cette question, nous sommes confrontés à une indétermination, à une incomplétude que les derniers développements des mathématiques viennent conforter. Cela oblige par conséquent à recourir à d'autres formes d'expression pour modéliser ces situations et accepter qu'il y ait une part d'indétermination, avec comme certitude que la seule résultante est la complexification des systèmes. La complexité est par conséquent une variable d'état qui caractérise les systèmes dissipatifs.

Alors qu'il est d'usage de recourir au mot complexité pour exprimer des concepts foncièrement différents, il est important désormais de dissocier la complexité algorithmique qui participe à l'ambition mathématique, de la complexité des structures dissipatives que nous avons qualifiée de complexité d'émergence car sa manifestation la plus caractéristique est justement de favoriser des propriétés irréductibles à celles de ses composantes. A priori, il ne peut y avoir de plus petit programme pour décrire de tels systèmes. Quelles mathématiques alors développer pour relever ce défi ?

Le discours dominant reste que les mathématiques sont efficaces à formaliser les phénomènes par leurs capacités prédictives, qu'elles soient issues de démarches inductives ou déductives. Elles suggèrent la réalisation d'expérimentations ou d'observations et fournissent des résultats numériques qui, sous réserve d'une marge d'erreur, confortent les résultats empiriques. Aussi, pour qu'une théorie mathématique soit vraiment efficace, il faut qu'elle rende manifeste des phénomènes avec comme postulat corollaire qu'expliquer, c'est ramener la complexité des phénomènes à un très petit nombre de principes. Là se situe l'efficacité des mathématiques qui, à travers l'usage d'un formalisme limité, permet la prédiction.

Se pose alors une question qui hante la philosophie depuis l'époque grecque: comment un ensemble de symboles abstraits, articulés par un jeu de règles fondé sur la logique et la non-contradiction, a-t-il la capacité à rendre compte de phénomènes sensibles ? Le débat chez les mathématiciens est sans fin. La majorité s'engage dans une prospection qui déborde le champ traditionnel des mathématiques alors que d'autres, par prudence, tentent de le borner. Ce débat a concerné essentiellement une nature (*physis*) dont l'homme et la vie étaient exclus. En revanche, pour les structures vivantes, nombreux sont ceux, comme Eugène Wigner (1902-1994), à considérer que l'espérance de l'efficacité des mathématiques dans les sciences naturelles et de l'homme est déraisonnable.

Les mathématiques ont-elles alors la capacité à formaliser le rôle d'un désordre consubstantiel à la matière permettant son évolution ? C'est la question qui est posée en guise de conclusion à ce chapitre. Mais avant que les mathématiciens n'ouvrent de nouvelles perspectives ou dans l'ignorance de travaux sur ces questions, une approche qualitative et littéraire doit toutefois nous permettre de progresser dans la formalisation des principes de fonctionnement des écosystèmes conçus comme des structures dissipatives. Rappelons pour soutenir cette démarche, qu'à l'issue de ses expériences de 1804 sur la propagation de la chaleur dans une barre métallique, Joseph Fourier (1768-1830) écrit la "Théorie analytique de la chaleur" en recourant à l'analyse mathématique, particulièrement pour l'étude des phénomènes thermiques. A la même époque (1824) Sadi Carnot publie le résultat de ses réflexions dans "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance". Mais alors que J. Fourier utilise un arsenal mathématique qu'il invente en partie (séries de Fourier), S. Carnot renonce à l'analyse mathématique pour rendre compte de ses travaux. L'approche qualitative n'est pas inférieure à l'approche quantitative. Elles sont complémentaires.

D : Paradigme classique ou paradigme écosystémique

Les postulats épistémologiques du paradigme classique ont leur origine dans l'étude des astres. Mais depuis, les physiciens se sont intéressés à l'infiniment petit et aux phénomènes macroscopiques. Dans ces deux espaces phénoménologiques, le paradigme classique a montré ses limites. Ainsi, comme le modèle de la structure dissipative intègre le désordre comme une de ses composantes et non plus comme une ignorance, une illusion ou une exception, les fondements ontologiques et déterministes qui structurent le paradigme mécaniste, et donc la philosophie contemporaine, s'en trouvent subsumés.

Evoquer toutes les étapes et les enjeux de ce changement de paradigme supposerait des développements que ce livre ne peut supporter. Il est néanmoins possible de souligner quelques ruptures épistémologiques induites par l'émergence d'un paradigme écosystémique dont les postulats sont souvent antinomiques à ceux du paradigme classique, obligeant à une réflexion sur la fonction sociale de la connaissance. C'est l'intelligibilité de la nature qui est au cœur de ces interrogations.

Le paradoxe est qu'alors que les mathématiques et la physique s'interrogent sur la portée de leurs savoirs et de leurs méthodes, l'approche mécaniste et l'analyse mathématique, à l'origine des postulats épistémologiques du paradigme classique, irriguent tous les domaines de la philosophie, qu'elle porte sur la nature ou sur l'homme. Le plus important de ces postulats est que la connaissance est possible et qu'elle doit fonder l'action. Les chapitres précédents nous ont permis d'entrevoir comment ces disciplines participaient à la formation d'une nouvelle manière de produire des connaissances élaborées selon une axiomatique relevant du paradigme écosystémique. Mais, celui-ci ne génère pas les mêmes certitudes que le paradigme classique. Il comporte, entre autres, une composante réévaluant la conception du désordre et de sa fonction dans la structuration des systèmes dissipatifs.

Dans la science classique dont les modèles de référence sont la mécanique et l'analyse mathématique, le désordre est, au pire, un manque de connaissance sur la nature, au sens *physis* que les grecs lui donnaient, au mieux un phénomène transitoire masquant un ordre inhérent à cette matière qu'exprime la théorie du chaos déterministe. Ces postulats épistémologiques ont deux conséquences.

La première est que la connaissance est possible, c'est à dire que tous les phénomènes sont intelligibles. Ces connaissances contredisent le sens commun. L'argument de référence en faveur de cette thèse fut l'ébranlement de l'héliocentrisme: c'est la terre qui tourne autour du soleil, pas le contraire.

La seconde est que le futur est connaissable car la nature est postulée déterministe. Le monde scientifique dans son immense majorité adhère à cette profession de foi consolidée par les succès de cette pratique scientifique. La découverte de la planète Neptune par Urbain Le Verrier (1811-1877) en 1846 en est un. Par le calcul, l'astronome détermina l'emplacement d'une planète qui fut observée en se conformant à ses indications. Ceci frappa l'imagination du grand public en montrant la puissance de la science fondée sur l'analyse mathématique. Ces succès contribuèrent au cours du XIXème siècle à faire de la mécanique l'archétype des sciences expérimentales, sources de toute action technique efficace, et donc assimiler "science" et "mécanique".

Le paradigme mécaniste classique a alors dominé l'ensemble des champs du savoir et des pratiques du monde occidental car si cette méthode rencontrait autant de succès dans l'étude des astres, alors il fallait vite en transférer les principes à toute la noosphère et notamment à l'étude de l'homme et de ses activités. L'économie mathématique en est une des manifestations exemplaires.

Une autre composante du paradigme classique est mouvementée par le développement d'une thermodynamique du vivant⁶: le temps. Déjà, Henri Bergson (1859-1941) considérait le second principe de la thermodynamique comme la plus « métaphysique » des lois de la nature. Arthur S. Eddington (1882-1944) associait l'entropie à la flèche du temps. Une question fondamentale fut alors de réconcilier le concept d'irréversibilité exprimé par le second principe avec les lois de la Mécanique (classique ou quantique). Les travaux fondamentaux de L. Boltzmann y contribuèrent, mais le paradigme dans lequel il évoluait était encore le paradigme classique. Dans celui-ci, le temps n'affecte pas l'évolution des systèmes en mécanique, alors que les développements de la thermodynamique ont montré que la propriété d'invariance des lois de la dynamique par rapport au renversement du temps disparaît sous certaines conditions (I. Prigogine, 1972). Le non-équilibre thermodynamique et les situations d'irréversibilité qu'il induit conduisent à des ruptures de symétrie et rendent le système inhomogène. Dès lors, les régions qui diffèrent par leur composition deviennent, en général, le siège d'évolutions distinctes. On voit apparaître ainsi progressivement dans le cadre de la description thermodynamique une dimension historique du temps, imposée par l'ordre de succession des structures. La conception du temps à laquelle conduisait la mécanique classique ou quantique est bouleversée par la thermodynamique. Alors que le temps est un élément neutre dans l'évolution des systèmes décrits à partir des lois et modèles de la Mécanique, il en est l'élément fondamental dans la thermodynamique induisant l'hypothèse d'un temps relatif consubstantiel aux structures vivantes et à leur niveau de complexité. Le temps d'une bactérie n'est pas le temps du gigantesque écosystème industriel dans lequel nous vivons alors que le temps chronologique utilisé comme référentiel est le même. C'est le temps du paradigme classique.

⁶ Prigogine Ilya, "*La thermodynamique de la vie*", La Recherche, juin 1972

Comment, dès lors, réconcilier la réversibilité fondamentale exprimée par des lois de la nature issues du paradigme classique avec l'irréversibilité observée à l'échelle macroscopique ? Les mathématiques fourniront-elles le langage apte à réaliser cette ambition ?

Les problématiques issues de la confrontation du paradigme classique, mûre, au paradigme écosystémique, émergent, sont au cœur de la philosophie des sciences et débordent largement le cadre de cet ouvrage. En évoquer quelques unes a cependant l'avantage d'envisager une phénoménologie de l'environnement dans une perspective épistémologique nouvelle. La finalité de cette démarche ne doit cependant pas être oubliée: trouver les moyens d'intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales ce qui suppose de modifier nos pratiques cognitives; celles développées dans le cadre du paradigme classique étant souvent accusée d'être à l'origine de la crise de l'environnement.

Aujourd'hui, la critique majeure portée aux réflexions alimentant le paradigme écosystémique est qu'elles ne débouchent sur rien de concret. Effectivement, l'introduction du désordre dans une perspective temporelle crée des conditions d'incertitude éludées dans le paradigme classique. Il y a donc un choix épistémologique à opérer entre des modèles simples mais réducteurs, et des approches fondées sur la complexité intégrant une incertitude irréductible sur les phénomènes considérés.

Le débat n'est pas nouveau.

La critique portant sur l'espérance d'une connaissance ontologique est une des antennes de la philosophie environnementale radicale. Cette attitude a suscité des réactions dont l'appel de Heidelberg est une des plus connues.

Le 1er juin 1992, à l'occasion du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, un appel aux chefs d'Etat et de gouvernement réunis à cette occasion a été rendu public. Rédigé deux mois plus tôt à Heidelberg - d'où le nom sous lequel il est connu -, il dénonce *«l'émergence d'une idéologie irrationnelle qui s'oppose au progrès scientifique et industriel et nuit au développement économique et social »*.

L'élaboration d'une connaissance dans le paradigme écosystémique n'est pas une critique d'un discours scientifique construit dans le paradigme classique. Les développements de la physique et des mathématiques ont relativisé la portée de ce paradigme auquel est associé désormais un espace de compétence bien défini: celui des phénomènes dynamiques en équilibre thermodynamique, c'est à dire sans production d'entropie. Le paradigme écosystémique, encore en formation, est confronté aux mêmes exigences. Il lui est aussi associé un espace de compétence: celui des systèmes dissipatifs en non équilibre thermodynamique. Mais celui-ci intègre dans son axiomatique des notions écartées du paradigme classique comme le désordre, l'aléa, la complexité, la non-linéarité et tout ce qui contribue à relativiser la possibilité d'élaborer des connaissances absolues intangibles. Le paradoxe est que les connaissances élaborées sur les écosystèmes naturels ou artificiels sont souvent conçues dans le paradigme classique. Or, celui-ci s'est élaboré à partir de l'étude de systèmes dynamiques alors que les écosystèmes sont des systèmes dissipatifs.

La conclusion à cette mise en perspective épistémologique est que la physique et les mathématiques fournissent désormais des grilles de lecture aux praticiens confrontés à l'inconnaissable, à la non-reproductibilité et à l'aléatoire. D'où les interrogations d'environnementalistes portant leur regard sur des phénomènes *in vivo* et leurs doutes à fonder leur action sur la connaissance.

Force est d'admettre cependant que malgré ces incertitudes métaphysiques, les connaissances issues de la thermodynamique, des mathématiques, mais aussi de l'écologie et d'autres disciplines participent à la construction de grilles de lecture sur le fonctionnement des écosystèmes dont la finalité est de répondre à la définition des enjeux contemporains de la crise de l'environnement. Encore faut-il caractériser en quoi les problématiques de l'environnement diffèrent profondément des problématiques que la philosophie naturelle eût à traiter auparavant et qu'elle traita dans le paradigme classique avec le succès que l'on sait.

Conclusion générale: vers un phénoménologie de l'environnement

Les problématiques relevant de l'environnement ont des caractéristiques qui obligent à recourir à des modèles cognitifs complémentaires de ceux issus de la science classique. Ces caractéristiques participent à l'élaboration d'une phénoménologie de l'environnement.

La première caractéristique est que les phénomènes ne peuvent être reproduits *in vitro*. Ils mettent en jeu une infinité de composants et de réactions dans des conditions de réalisation ne favorisant pas leur reproductibilité.

La seconde caractéristique est qu'ils concernent essentiellement des systèmes dissipatifs avec comme grille de lecture privilégiée l'écosystème et les principes de fonctionnement qui lui sont associés.

La troisième est que les phénomènes naturels ne rentrent pas dans cet espace car l'objet des alarmes et des inquiétudes portent justement sur le rôle d'activités anthropiques sur les cycles biogéochimiques naturels⁷. Les controverses suscitées par le rôle des émissions anthropogéniques sur le climat illustrent cet aspect.

Les facteurs communs aux phénomènes de l'environnement sont le désordre-entropie et le non-équilibre. Le cadre usuel de la recherche s'en trouve donc bouleversé car les approches environnementales, à la différence des approches milieux, obligent à sortir des champs disciplinaires pour élaborer des grilles de lecture pluri- et transdisciplinaires sur les phénomènes à l'origine d'une crise environnementale.

⁷ nous sommes forcés de recourir à ce terme dans le cadre de ces lignes, mais la notion d'équilibre de la nature au regard des activités humaines ne peut se comprendre que par référence à une échelle de temps humain. Les géologues ou les paléontologues contestent cette vue montrant que cet équilibre n'existe pas quand le référentiel temporel est agrandi.

La séparation entre les sciences de l'homme et les sciences de la nature se révèle être un obstacle à une intégration des connaissances, même fragiles, dans une perspective écosystémique car les problématiques de l'environnement se situent à l'interface de ces deux espaces phénoménologiques.

Les approches milieux présentent aussi des caractéristiques modifiant sensiblement la pratique scientifique développée dans le cadre du paradigme classique. Il s'agit d'appréhender les phénomènes dans une perspective holiste alors que les succès de la science classique ont été obtenus par des approches réductionnistes dont René Descartes (1596-1650) est l'un des inventeurs. Dans le Discours de la méthode (1637), il adopte quatre préceptes dont celui "*de diviser chacune des difficultés que j'examinerois, en autant de parcelles qu'il se pourroit, et qu'il seroit requis pour les mieux résoudre; de conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connoître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connoissance des plus composés*". A cette approche réductionniste, dont les succès pratiques sont innombrables, est opposée une approche systémique dont le postulat de base est que la complexité des phénomènes participe à l'émergence de propriétés irréductibles à celle des composants du système étudié: la complexité d'émergence.

Aussi, l'environnementaliste rencontre deux obstacles majeurs pour fonder sa réflexion:

- l'absence de méthode pour penser les phénomènes de l'environnement selon les mêmes canons que la pensée classique dont l'objet est la *physis*, la Nature;
- la difficulté à élaborer des connaissances certaines portant sur des phénomènes complexes homme/milieu en non-équilibre à partir de modèles construits en laboratoires.

Prenons un simple exemple pour illustrer ce constat: la chimie de l'atmosphère. Chaque élément chimique, quel qu'il soit, interagit avec le milieu. Les conditions de stabilité ne sont donc jamais réunies surtout quand des émissions anthropogéniques modifient sans cesse la quantité de certains composés. Quelques réactions exemplaires ont bien été isolées comme celle ayant permis en 1995 à Paul Crutzen, Mario Molina et F. Sherwood Rowland d'obtenir le prix Nobel de chimie pour leurs travaux sur les processus qui modifient l'abondance de l'ozone dans les différentes couches de l'atmosphère. Mais ces résultats furent obtenus par le recours à des chambres d'expérimentation où les composés sont sélectionnés et les réactions contrôlées. La connaissance qui en est issue n'est qu'une approximation de ce qui pourrait se passer dans l'atmosphère si les mêmes conditions étaient réunies. Il est évident pour chacun que la complexité des réactions dans l'atmosphère n'a qu'un lointain rapport avec celles observées dans une chambre atmosphérique installée dans un laboratoire où les principaux paramètres sont contrôlés. Il en est ainsi pour toutes les études portant sur les couplages activités anthropiques/milieu. La connaissance obtenue l'est par des voies classiques réductionnistes alors que la réalité des phénomènes est sans doute beaucoup plus complexe pour ne pas dire inintelligible. Or, la majorité des pratiques environnementales est fondée sur le postulat d'une connaissance permettant l'action, fondement de la philosophie de la Modernité.

Nous citerons deux exemples en cohérence avec la thèse développée dans ces lignes: l'étude d'impact; le principe de précaution. Tous deux postulent à l'élaboration d'une connaissance comme préalable à l'action.

Pour réaliser une étude d'impact, que ce soit d'un produit ou d'une activité quelconque, les experts disposent de bases de données répertoriant des milliers de chiffres. Se pose la question de leur pertinence absolue d'une part, et de leur validité en situation naturelle d'autre part.

Les phénomènes identifiés se caractérisent par la non-linéarité d'une majorité de couplages, la présence d'un désordre irréductible qui, même quand il est sérié comme dans une expérience *in vitro*, est à l'origine d'une non-reproductibilité partielle de certains d'entre eux, etc. D'où la conclusion empirique qu'une connaissance concernant les évolutions d'un phénomène de l'environnement *in vivo* est très fragile. Malgré ce constat, en France, une des dimensions de la loi de 1976 sur les établissements classés pour la protection de l'environnement repose sur l'étude d'impact dont l'objet est d'évaluer les modifications d'un milieu induites par une installation industrielle relevant de cette législation.

Cependant, conscients de connaissances forcément incertaines ou lacunaires, les juristes de l'environnement ont imaginé le principe de précaution pour encadrer juridiquement l'incertitude, mais en le justifiant comme un principe d'action favorisant des recherches permettant d'aboutir à des connaissances certaines. Pris sous cet angle, le principe de précaution n'est pas, comme beaucoup de scientifiques ont pu l'exprimer, un déni de connaissance, mais simplement une précaution à prendre avant que les vecteurs de la connaissance aient une réponse définitive. Les débats sur cette question sont innombrables. Il est pourtant facile d'admettre que les principaux protagonistes postulent à une connaissance à révéler. Est-elle possible ?

La réponse avancée par ce livre est prudente. Elle se contente simplement de souligner que tant par l'évolution de disciplines phares de la science que sont les mathématiques et la physique, que par empirisme, de nombreux facteurs participent à un constat: les environmentalistes sont confrontés dans l'exercice de leur art à des obstacles épistémologiques comme celui de ne pouvoir fonder leur pratiques sur des connaissances exactes. L'origine de cette situation est l'infinité des éléments entrant en interactions par l'action d'un Homme artificialisant les milieux.

Cela aboutit, d'une part, à une infinité de situations à prendre en compte et, d'autre part, à la non-reproductibilité de ces situations compte-tenu de l'extrême variabilité des conditions initiales. C'est donc l'intelligibilité des phénomènes qui en débat.

L'environnementaliste conscient des difficultés épistémologiques inhérentes à son espace de compétence est toutefois obligé d'élaborer des politiques dont le but est d'intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives. L'évolution de la législation sur les déchets et l'impossibilité pour les assureurs de traiter le dommage écologique pur sont les deux modèles retenus pour éclairer les problématiques contemporaines associées à l'environnement et au Développement durable. Il s'agit de limiter le recours aux SurEnvironnement car nous évoluons désormais dans une écosphère conçue comme finie. Encore faut-il disposer d'outils pour penser ces problématiques en privilégiant le paradigme classique ou le paradigme écosystémique selon que l'un ou l'autre se révèle plus ou moins adapté.

Un autre problématique porte sur la notion de valeur. Le défi des environnementalistes, quels que soient leurs présupposés épistémologiques: classiques ou écosystémiques, est de trouver une méthode pour penser les flux au sein des écosystèmes artificiels autrement que par référence unique à la monnaie. Les économistes participent à cette ambition, mais n'abandonnent pas la monnaie pour donner un prix à la nature. Ils sont à l'origine de l'expression d'internalisation de coûts non monétarisés. L'usage de la Nature en est un. Les environnementalistes, eux, préfèrent concentrer leur discours sur les flux de matières, d'énergie ou d'informations en éludant la dimension monétaire. Malheureusement ces deux approches rencontrent très vite leurs limites. Malgré le recours à des méthodes fondées sur les choix des consommateurs, les économistes ne peuvent répondre à toutes les interrogations trouvant leur origine dans une prise en compte d'objets non monétarisés.

Quant aux approches énergétistes, elles peinent à se faire reconnaître dans des lieux, comme les tribunaux, habitués à monétariser les arbitrages.

Une première réponse proposée par cet essai est de compléter les approches monétaires ou énergétistes en recourant au concept de SurEnvironnement. Mais la problématique de la valeur n'en n'est pas pour autant résolue. En effet, le système dominant repose sur des fondements dont l'histoire est la matrice et qu'il est impossible de transformer d'un jour ou l'autre. La monétarisation des échanges en est le cœur.

La problématique de l'évaluation monétaire est donc fondamentale en environnement. Elle fait l'objet de travaux multiples par des approches économiques, donc monétaires, ou écologiques en se fondant sur les flux de matières et d'énergie dans une perspective écosystémique. Le but premier des économistes est l'internalisation financière de l'utilisation du capital naturel, au sens de *res nullius*, par des méthodes reposant sur les préférences des consommateurs. Ceux-ci doivent réaliser des arbitrages entre des biens manufacturés et des objets naturels. Mais, dès que ces biens inappropriés ne peuvent faire l'objet d'un arbitrage, en l'absence de consommateurs par exemple, ces méthodes se révèlent inopérantes. Aussi, recourir à une approche philosophique fondée sur le concept de SurEnvironnement permet d'exprimer les préoccupations des économistes tout en éludant les limites dues à la présence d'un consommateur comme arbitre qui fonde la valeur monétaire de la Nature.

Une priorité est le lien à établir entre les problématiques contemporaines de l'environnement et l'organisation actuelle du modèle socio-économique dominant en partant du constat suivant. Si il est postulé impossible de sortir de la monétarisation des échanges comme préalable à des choix, à quelques niveaux qu'ils se réalisent, il est en revanche possible de dépasser les différentes approches de la valeur émises par les théories économiques conçues dans le paradigme classique.

Nous disposons désormais d'un autre paradigme susceptible, lui aussi, de produire des conceptions de la valeur complémentaires de celles actuellement en cours.

Aussi, le prochain essai avancera l'idée d'une valeur écosystémique fondée sur la complexité relative des écosystèmes artificiels. Celle-ci sera déduite de principes de fonctionnement des écosystèmes conçus dans le paradigme écosystémique et dont l'identification de l'écosystème à une structure dissipative est la pierre angulaire. Le modèle de référence est le binôme Moi/Environnement apparaissant alors comme espace structuré par opposition à un SurEnvironnement dans lequel sont rejetés les flux entropiques. La découverte de la finitude de l'écosphère et le constat de la disparition des SurEnvironnement obligent à rompre avec cette pratique naturelle.

Bibliographie:

Annequin et Boutigny, "*Thermodynamique*", Vuibert, 1976

Atias C., J.L. Le Moigne, "*Sciences et conscience de la complexité*", Librairie de l'Université, Aix en Provence, 1984

Ayres Robert U., "*The Kuznets curve and the life cycle analogy*", *Structural change and economic dynamics* 8, 1997

Ayres Robert U., "*Eco-thermodynamics: economics and the second law*", *Ecological Economics* 26, 1998

Barbier Rémi, Philippe Laredo, "*L'internalisation des déchets*", *Economica*, 1997

Baruk Henri, "*Civilisation hébraïque et science de l'homme*", Ed. Zikarone, 1981

Boutot Alain, "*Le pouvoir créateur des mathématiques*", *La Recherche*, novembre 1989

Bouveresse Jacques, "*La philosophie des sciences de Karl Popper*", *La Recherche*, novembre 1974

Bouvier A., M. George, F. Le Lionnais, "*Dictionnaire des mathématiques*", Puf, 1996

Brown Lester R., Worldwatch Institute, en français, "*L'état de la planète*", *Economica*, Annual (1992-)

Burley Peter, John Foster, "*Economics and thermodynamics: New Perspectives on Economic Analysis*", Kluwer Academic Publishers, 1994.

Cardwelle D.S.L., "*Les débuts de la thermodynamique*", *La Recherche*, septembre 1974

Carrel Alexis, "*L'homme cet inconnu*", Plon, 1997

Chaitin Gregory, "*L'Univers est-il intelligible ?*", *La Recherche*, décembre 2003

- Chanu Jacques, "*La thermodynamique du non-équilibre*", La Recherche, décembre 1977
- Combes Alain, "*La réalité mathématique archaïque*", La Recherche, juin 2000
- Coveney Peter V., "*L'irréversibilité du temps*", La Recherche, février 1989
- Dahan Dalmenico Amy, "*L'image fin de siècle des sciences*", La Recherche, janvier 2000
- Desbrosses Philippe, "*L'intelligence verte*", Ed. du Rocher, 1997
- Danchin Antoine, "*Entropie et ordre biologique*", La Recherche, septembre 1978
- Delahaye Jean-Claude, "*Une extension spectaculaire du théorème de Gödel: l'équation de Chaitin*", La Recherche, juin 1988
- Delahaye Jean-Claude, "*Information, complexité et hasard*", Hermes, 1994
- Descola Philippe, "*Les cosmologies des indiens d'amazone*", La Recherche, novembre 1996
- Dubois Monique, P. Atten et P. Bergé, "*L'ordre chaotique*", La Recherche, février 1987
- Duvigneaud Paul, "*La synthèse écologique*", Doin, 1983
- Eckmann Jean-Pierre, Mashaal Maurice, "*La physique du désordre*", La Recherche n°232, mai 1991
- Ekeland Ivar, "*La théorie des catastrophes*", La Recherche, septembre 1977
- Esambert Bernard, "*Le développement durable: une clé pour le XXIème siècle*" dans 12 questions d'actualité sur l'Environnement, Ministère de l'environnement, 1996
- Franc Alain, Pierre-Henri Gouyon, "*Information et complexité: questions sans réponses*", La Recherche n° 296, mars 1997
- Haken Hermann, Arne Wunderlin, "*Le chaos déterministe*", La Recherche, octobre 1990
- Holton Gérard, "*L'imagination scientifique*", Gallimard, 1981

Kahane Jean-Pierre, “*L’analyse de Fourier comme test du sens de l’évolution des mathématiques depuis deux siècles*”, conférence donnée à l’Université de Cergy-Pontoise, 2001

Kline Morris, “*Les fondements des mathématiques*”, La Recherche, mars 1975

Koyré Alexandre, “*Etudes d’histoire de la pensée philosophique*”, Gallimard, 1971

Koyré Alexandre, “*Etudes d’histoire de la pensée scientifique*”, Gallimard, 1973

Kuhn Thomas S, “*The Structure of Scientific Revolutions*”, University of Chicago Press, 1962

Lambert Dominique, “*L’incroyable efficacité des mathématiques*”, La Recherche, janvier 1999

Larrère Catherine, Raphaël Larrère, “*Du bon usage de la nature - Pour une philosophie de l’environnement*”, Aubier, 1997

Larrère Catherine, Raphaël Larrère, “*La crise environnementale*”, INRA Editions, 1997

Le Moigne Jean-Louis, “*Les épistémologies constructivistes*”, Puf, 1995

Malaval Frédéric, “*Symphonie n°6 - Impressions sur le concept ‘environnement’*”, BMA, 1996

Malaval Frédéric, “*Développement durable, assurances et environnement*”, Economica, 1999

Morin Edgar, “*La méthode I: La Nature de la Nature*”, Le Seuil, 1977

Morin Edgar, Jean-Louis Le Moigne, “*L’intelligence de la complexité*”, L’Harmattan, 1999.

Nicolis Grégoire - Ilya Prigogine, “*A la rencontre du complexe*”, Puf, 1992

Orio Angelo A., Jacques Vigneron, “*Leçons et séminaires d’écologie quantitatives*”, 1976

Pelletier John D., “*Are large complex ecosystems more unstable ? A theoretical reassessment with predator switching*”, Mathematical biosciences 163, 2000

- Poincaré Henri, "*Science et méthode*", 1908
- Prigogine Ilya, "*Non-linear Science and the Laws of Nature*", Elsevier Science Ltd, 1997.
- Prigogine Ilya, "*La thermodynamique de la vie*", La Recherche, juin 1972
- Prigogine Ilya, Dilip Kondepudi, "*Thermodynamique - Des moteurs thermiques aux structures dissipatives*", Editions Odile Jacob, 1999
- Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, "*La Nouvelle Alliance - Métamorphoses de la science*", Gallimard, 1979
- Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, "*Entre le temps et l'éternité*", Fayard, 1988
- Prigogine Ilya, "*La fin des certitudes*", Odile Jacob, 1996
- Rosnay de Joël, "*Le macroscope - Vers une vision globale*", Seuil, 1975
- Ruth Matthias, "*Information, order and knowledge in economic and ecological systems: implications for material and energy use*", Ecological Economics 13, 1995
- Sollner Fritz, "*A reexamination of the role of thermodynamics for environmental economics*", Ecological Economics 22, 1997
- Stewart Ian, "*Dieu joue-t-il aux dés ?*", Flammarion, 1992
- Teilhard de Chardin Pierre, "*La place de l'homme dans la nature*", Albin Michel, 1956
- Thuillier Pierre, "*Les mathématiques: fin en soi ou instruments ?*", La Recherche septembre 1973
- Thuillier Pierre, "*La Grande Implosion*", Fayard, 1995
- Thuillier Pierre, "*Les mathématiques mènent-elles à Dieu ?*", La Recherche, janvier 1987
- Thuillier Pierre, "*Le petit savant illustré*", Seuil, 1980
- Thuillier Pierre, "*Les mathématiques: science divine ou science humaine ?*", La Recherche, janvier 1977
- Tissier Bernard, "*Education formation, environnement*", Economica, 1998

Tondeur Daniel, "*La thermodynamique du non-équilibre*", La Recherche, décembre 1997

Tonnelat Jacques, "*Qu'est-ce qu'un être vivant ?*", La Recherche, juin 1979

Tonnelat Jacques, "*Thermodynamique probabiliste - un refus des dogmes*", Masson, 1991

Wagensberg Jorge, "*L'âme de la méduse - Idées sur la complexité du monde*", Seuil, 1997

White Lynn, "*Les racines historiques de notre crise écologique*", Sang de la terre, 1993

Witt Ulrich, "*Self organization and economics - what is new ?*", Structural change and economic dynamics 8, 1997

L'émergence de mots préfixés par 'éco' comme éco-management, éco-conception, éco-citoyenneté, etc. exprime une volonté de réagir à la crise écologique actuelle. Mais les problématiques d'aujourd'hui ne sont pas identiques à celles d'hier, obligeant à recourir à un néologisme pour les formaliser. Les enjeux contemporains de l'environnement se caractérisent alors par la nécessité d'intégrer les SurEnvironnement dans nos pratiques sociales et cognitives. L'évolution de la législation sur les déchets et le traitement du dommage écologique par les assureurs sont les deux modèles soutenant cette thèse.

Deux paradigmes permettent de réaliser ce but: le paradigme classique construit à partir des succès de la mécanique céleste et de l'analyse mathématique; le paradigme écosystémique issu des derniers développements de l'écologie et de la thermodynamique. Le modèle de référence en est l'écosystème conçu comme une structure dissipative.

Pour intégrer les SurEnvironnement, doit-on abandonner le paradigme classique qui domine la philosophie occidentale et privilégier un paradigme écosystémique en devenir? C'est la question que pose ce livre.