

L'écologie est-elle une science comme les autres ?

Introduction

Partons de la confusion du terme : par écologie, on ne sait jamais trop si on entend un discours critique sur notre mode de consommation, l'étude du climat ou un amour un peu naïf de la nature. Plus précisément, le terme recouvre les mouvements écologistes, qui combattent les conséquences destructrices des modes de vie contemporains sur leurs milieux, et l'écologie scientifique qui étudie ces mêmes milieux. Faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas là qu'un manque de clarté terminologique. L'écologie, c'est cette science naturelle qui met en crise le rapport moderne entre science et politique, tel qu'il a été constitué par les sciences modernes et en particulier par la physique. Pourquoi cette confusion ? Que recouvre-t-elle ?

L'éco-logie, comme l'éco-nomie, s'occupe de *l'oikos* : la maison, le foyer, l'habitat. C'est *la science des relations que les organismes entretiennent avec leur milieu, biotique et abiotique*, selon la définition qu'en donne le biologiste Haeckel en 1866. *L'oikos*, c'est le privé, le domaine des échanges naturels soumis à la nécessité, par opposition à la *polis*, la cité, le domaine politique des décisions et des actions. L'économie régule (*nomos*) les échanges humains, l'écologie cherche à connaître (*logos*) les milieux vivants.

Cet objet commun explique leur proximité, et leur conflictualité : l'écologie veut être la science politique du XXI^e siècle, comme l'économie était celle du XX^e. (d'où la méfiance, et l'intérêt, pour le discours écologique.)

Sauf que cela ne marche pas. Cela fait 60 ans que les premières alertes environnementales ont attiré l'attention du public (*Printemps silencieux*, 1962), 40 ans que l'on dénonce l'origine thermo-industrielle du réchauffement climatique (1988, Hansen devant le Sénat américain), 30 ans de rapports internationaux, de pétitions de scientifiques toujours plus nombreux, de manifestation, d'actions directes, etc. On sait, mais on ne fait rien, ou si peu. *La crise écologique est une crise des rapports entre savoir et pouvoir*¹. Plutôt que de le déplorer, essayons d'interroger cet échec, voire d'en faire quelque chose.

Pourquoi y a-t-il une écologie politique et pas une physique politique ? Qu'a cette science de si particulier ?

Au quotidien, les écologues collectent, traitent et modélisent des données qui permettent une meilleure gestion des rendements forestiers, des réserves de pêche ou de la fertilité des sols. L'écologie est une science comme les autres, avec ses institutions, ses programmes de recherche, ses instruments de mesures, ses partenariats public-privé, etc. Pourtant, à certains endroits, la rationalité écologique entre en contradiction avec l'efficacité technique, comme ne le fait aucune autre science. On peut penser aux études d'impact qui interrompent des projets ou qui font interdire certains produits dans les pays occidentaux (DTT, chlordécone), ou encore au rapport du MIT qui, dès 1973, appelle à stopper la croissance. Il y a quelque chose dans l'écologie qui semble questionner l'alliance entre science et progrès technique (alliance fondatrice de l'accroissement des moyens de production), de l'intérieur même de la science.

Tout se passe comme si les sciences écologiques, en travaillant comme toutes les autres sciences à étendre notre connaissance de la nature, travaillaient autant à en accroître la maîtrise qu'à nous en faire perdre le contrôle. Vous pensiez que l'azote fertilisait les sols ? En

1 Entre science et politique. Habituellement, ces rapports sont d'une stricte séparation : les sciences s'occupent de ce qui est, la politique de ce qui doit être (et la technique fait le lien entre les deux).

fait, il acidifie les océans. C'est cette contradiction interne, propre à l'écologie, qui continue d'attirer mon attention. L'écologie est une science qui met en crise un rapport au monde fondé sur les sciences modernes, et qu'elle contribue par ailleurs à renforcer, selon lequel savoir = pouvoir.

Je précise un peu le sens de cette équation : ici, j'entends par « savoir », « sciences naturelles », et par « pouvoir », « technique » (moyens d'action, voire de production) ; l'équivalence désigne ici l'alliance entre les deux qu'on désigne couramment par le terme de technoscience. S'il n'y a pas de physique politique, c'est parce que la loi de la relativité, cela ne se discute pas, cela s'applique : dans la modernité, sciences et politique sont deux domaines distincts parce que c'est la technique qui fait le lien entre l'étude de la nature et le domaine de l'agir.

Bon, je répète le point qui m'intéressait dans cette introduction : la crise écologique est une crise des rapports entre savoir et pouvoir qui vient de la science elle-même.

L'hypothèse, c'est qu'il y a quelque chose dans l'objet des sciences écologiques qui modifie l'articulation entre science, technique et politique, et qu'on peut chercher dans ces sciences des éléments pour penser la nécessaire transformation de ce rapport.

Or, l'écologie est l'étude des rapports des organismes à leurs milieux. Sa particularité, c'est qu'elle étudie des phénomènes sans les détacher de leur milieu, là où la biologie étudie plutôt des individus ou des lignées.

→ *En quoi l'étude des milieux transforme-t-elle les rapports entre savoir et pouvoir ?*

L'écologie scientifique : une science de la complexité

A/ Savoir, prévoir, pouvoir. Les sciences modernes et le déterminisme.

L'écologie est une science naturelle qui se donne pour objet le milieu. On fait l'hypothèse qu'il y a quelque chose dans cet objet qui fait que cette science ne peut pas entrer dans la même articulation avec la technique/la politique que les autres.

Sur quoi repose l'équivalence entre savoir et pouvoir, entre sciences modernes et moyens d'action ?

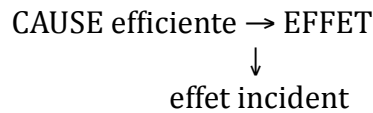
a) prévision et cause efficiente

C'est la capacité de prévision de la science moderne qui fait le lien entre savoir et pouvoir, c'est-à-dire sa capacité à dégager des régularités dans la complexité des phénomènes qui nous entourent. La science moderne est essentiellement une connaissance de lois, c'est-à-dire de rapports déterminés entre des phénomènes.

Pour savoir ce qui détermine un phénomène, il faut abstraire la cause efficiente de toutes les autres variables présentes dans l'expérience empirique. On l'a vu dans le cours de Samir avec l'exemple de la loi de la chute des corps : ce qui cause la chute d'un corps, ce n'est ni sa couleur, ni sa forme, ni même sa masse, mais la force d'attraction terrestre, mathématiquement déterminée.

→ Ici, on va distinguer la causalité efficiente d'une causalité que j'appellerai *incidente*, parce que cela va nous servir plus tard. (Ce terme vient d'un séminaire de l'été 2016, intitulé *Que faire ?* C'était une proposition d'Ulysse et Ghislain pour conceptualiser un certain type de relation, une sorte de causalité indirecte.)

La cause efficiente de la chute, c'est la force de gravité. En fait, quand un corps chute, il y a tout un ensemble d'effets qui ne sont pas directement lié à la pesanteur, mais au milieu ambiant – par exemple, les frottements dus à l'air. J'appelle effets incidents cette causalité liée au milieu. Effet incident : tout effet qui n'est pas causé ou visé directement par la cause efficiente, mais par l'effectuation de celle-ci (le fait de le faire). C'est plutôt un effet collatéral qu'un effet secondaire : l'effet placebo est un effet incident, causé par le fait d'ingérer un produit, l'effet secondaire est simplement l'effet de l'effet.



Pour repérer une cause efficiente, il faut l'abstraire de son milieu (par des dispositifs expérimentaux). Or l'efficacité technique repose sur l'identification de la causalité efficiente, parce qu'elle fournit à l'action ses moyens. On sait sur quelles variables jouer pour obtenir précisément tel ou tel résultat ; on peut compter sur la régularité de la nature, au lieu d'attendre son bon vouloir (balistique, agro-chimie). Une fois qu'on a identifié ce qui détermine les propriétés d'un être, par exemple, pour les êtres vivants, l'ADN, on peut le manipuler. La causalité efficiente est en ligne droite :

Cause → effet ; Moyen → fin ; Savoir = pouvoir

Pour comprendre l'équivalence entre prévoir et pouvoir pour la modernité, souvenons-nous de Galilé sur les chantiers navals : la science moderne transforme l'incertain par excellence, la navigation, en une activité suffisamment sûre pour que les assurances puissent investir dans la construction de navires et financer la colonisation.

Remarque : La hiérarchie des sciences et le règne de la physique

C'est parce que les sciences modernes se sont construites sur l'étude de rapports déterminés de cause à effet qu'on parle de sciences « dures » et de sciences « molles ». La rigueur des déterminations ordonne la hiérarchie des sciences, avec la physique comme reine, c'est-à-dire comme modèle épistémologique que les autres s'efforcent d'appliquer.

Rappelons-nous des remarques de Clément sur le mépris des scientifiques envers la biologie : une causalité beaucoup trop confuse !

b) Connaître et maîtriser la nature. Sciences et technique

Bref, ce que je voulais poser, pour commencer, c'est le rapport entre savoir, prévoir, et pouvoir : Les rapports entre savoir et pouvoir (=technoscience) reposent traditionnellement sur un certain mode d'abstraction, qui met en évidence des rapports déterminés, mesurables et maîtrisables, parce que prédictibles, entre les causes et les effets. Ce modèle de causalité, parce qu'il est principalement issu de la branche de la physique qui étudie les mouvements de corps, je l'appelle mécanique.

On comprend mieux sur quoi repose l'alliance entre sciences modernes et progrès technique. Il n'y a pas besoin de remettre en question la neutralité axiologique des sciences modernes, tout est dans la méthode : accroître notre connaissance des rapports entre causes (efficientes) et effets, c'est accroître nos moyens d'action - donc nos moyens de production.

[La connaissance des lois de la nature en permet la maîtrise, quelle que soit la fin que se donnent les sociétés ou les individus : si la fin c'est le développement illimité de nos moyens de production, elle est rendue possible par un développement illimités de nos connaissances des rapports de causes à effets. Si la fin c'est l'établissement de la société sans classe, connaître les lois du développement historique nous en donne les moyens. La politique s'occupe des fins, la science et la technique nous donne les moyens.]

[Faire un point sur la physique contemporaine : pourquoi il n'y a pas de physique politique ? En réalité, le mécanisme est interrogé de l'intérieur de la physique aujourd'hui (la notion même de position, par exemple, est devenu problématique). Les découvertes de la physique du XXe siècle, en terme de contenu, sont totalement révolutionnaires, bien plus que celles de l'écologie : les particules sont aussi des ondes, les corps courbent l'espace, le temps ne s'écoule pas uniformément, etc. Mais elles ne pas changent pas le rapport entre savoir et pouvoir : elles ne changent rien à notre manière d'agir. A nouveau La loi de la relativité générale, cela ne se discute pas, cela s'applique.

→ Que se passe-t-il quand une science moderne se donne pour objet le milieu, c'est-à-dire précisément ce dont il s'agissait de faire abstraction pour rendre mesurables les relations et efficace l'action ? On ne peut pas abstraire le milieu de son milieu pour étudier quelles sont les causes efficientes de ses propriétés. Il va falloir ruser. On va voir comment, historiquement, l'écologie a progressivement approché son objet, et essayer de comprendre plus précisément en quoi elle trouble l'alliance entre science et (progrès) technique : l'étude des milieux modifie-t-elle le modèle mécanique de la rationalité scientifique moderne ? Et si oui, qu'est-ce que cela change aux rapports entre savoir et pouvoir ?

B) Brève histoire de l'écologie : de l'étude des communautés aux systèmes complexes

Remarques, excuses, etc : il n'existe pas de synthèse récente de l'histoire de l'écologie scientifique, encore moins problématisée. 1988 Acot, 1994 Déléage, mais pas d'histoire institutionnelle. Une thèse sur le concept d'écosystème de 1984, mais pas d'histoire critique du concept. Ce que je vais dire est partiel, mal trié et sans doute en partie faux. Il reste du travail à faire !

L'écologie est une science très récente : elle apparaît fin XIXe, se développe dans la première moitié du XXe dans une relative indifférence, se formalise et s'institutionnalise après-guerre sous la forme de la science des écosystèmes. Au même moment, dans les années soixante, apparaissent les premiers mouvements écologistes d'ampleur. Les sciences du systèmes terre apparaissent dans le dernier quart du XXe siècle, avec les mouvements climats que l'on connaît.

[il y a une histoire parallèle de l'écologie politique, qui croise celle-ci sans s'y identifier : avec, d'un côté, les préservationnistes américains, et de l'autre la pensée critique anti-industrielle plutôt européenne. Mais ce n'est pas de cette lignée que vient ce qu'on appelle la crise écologique, c'est-à-dire la mise en évidence des conséquences de la civilisation thermo-industrielle sur le climat, et le trouble que cette crise induit entre savoir et pouvoir. Or c'est cela qui nous intéresse : que des résultats scientifiques viennent remettre en question un mode de production pourtant fondé sur l'alliance entre science et technique]

1) Les débuts de l'écologie scientifiques : l'étude des communautés

On peut repartir de l'invention du terme, fin XIXe, car la définition qu'en donne Haeckel est toujours valable :

« Par écologie, nous entendons la totalité de la science des relations de l'organisme avec l'environnement, comprenant, au sens large, toutes les conditions d'existence »

Et un peu plus loin : « Par écologie nous entendons le corps du savoir concernant l'économie de la nature – l'étude de toutes les relations de l'animal à son environnement organique et inorganique »

Generelle Morphologie der Organismen, 1866

Odum 1971 : *« la science des interrelations des organismes vivants et de leur environnement »*

Fundamentals of ecology

L'écologie scientifique est d'abord une branche de la biologie, qui étudie ce qui échappe à la théorie de l'évolution par mutation et sélection, à savoir les communautés.

- 1877 : Moebius. Biocénose

Le concept de bio-cénose, « vie en commun », un des concepts centraux de l'écologie, est inventé par un autre allemand, Karl Mobius lors d'une enquête sur l'épuisement des bancs d'huitres du nord de l'Allemagne.

Il publie en 1877 une monographie où il compare les gisements allemands avec les bancs d'huitres de la côte atlantique, analyse soigneusement leurs conditions physiques d'existence (salinité de l'eau, température etc) et les effets des prélèvements, et il montre que l'épuisement des gisements est liée à l'arrivée du chemin de fer. Il considère chaque bancs d'huitres comme une communauté :

« La science ne possédait pas, jusque-là, de mot par lequel une communauté d'être vivants [Lebensgemeinschaft] put être désigné ; de mot désignant une communauté dans laquelle la somme des espèces et des individus, étant mutuellement limité et sélectionnée, a par voie de reproduction continué à occuper un territoire donné. Je propose le mot de biocénose pour une telle communauté (de bios, vie, et koïnos, en commun) »

Die Auster une die Austerwirtschaft, 1877

→ Toute l'ambiguïté de l'écologie - et de ses liens avec l'économie - est déjà là : il s'agit bien d'appliquer les méthodes scientifiques à un objet nouveau, les communautés vivantes.

Le mouvement est double, de capture et de mutation. D'un côté, il y a capture de ce qui échappait jusque là à la rationalité scientifique ; de l'autre, on se demande s'il n'y a pas quelque chose dans cet objet qui modifie cette même rationalité et ses liens avec la technique.

[Mécaniser le vivant ou animer le mécanisme ? Rationaliser le commun ou communiser la science ? Les deux bien sûr.]

Maintenant, je vais raconter quelques étape de cette histoire.

Ce sont d'abord des botanistes, au début du XXe siècle, qui se mettent à étudier comment les communautés végétales ajustent leur forme et leur comportement aux facteurs géo-chimiques (eau, lumière...), dans le contexte colonial européen et états-unien.

- Frederic **Clements** propose une première formalisation des règles de succession végétales, à travers une métaphore organiciste et à partir d'études des Grandes Plaines américaines tout juste conquises. Ses conceptions dominent pendant un demi-siècle.

Clements définit les formations végétales comme des organismes complexes dotés de structures et de fonctions susceptibles des mêmes méthodes d'investigation et d'expérimentation que celles pratiquées sur les organismes simples au laboratoire. Pour cela il invente des techniques d'observations et de mesures rigoureuses (quadrat). Pour Clements, les formations végétales passent par différentes phases de développement déterminées par des facteurs géo-chimiques (lumière, sol, etc), débutant par quelques espèces pionnières (!) sur un sol vierge (des graminées par exemple), remplacées ensuite par des essences à croissance rapides ayant besoin de beaucoup de lumière, qui permettent l'apparition d'essences plus lente, poussant à l'ombre des premières, pour aboutir à un assemblage végétal stable appelé *climax*. La notion de climax est aujourd'hui discuté, elle est plutôt considérée comme une phase parmi d'autres des écosystèmes que leur état final².

1904, *The development and structure of vegetation* :

« La végétation manifeste certains phénomènes qui sont l'expression caractéristique des forces qui la fondent [...] Cette conception sera plus intelligible si on considère la végétation comme une entité, dont les changements et les structures sont en accord avec certains principes de base, tout à fait comme les fonctions et les structures des plantes correspondent à des lois définies. »

1916 : *Plant succession*

« Comme un organisme, la formation croît, mûrit et meurt (...). En outre, chaque formation climacique est capable de se perpétuer, en reproduisant avec une fidélité absolue les étapes de son développement »

Fonde l'Ecole du Nebraska, Grassland school of ecology qui contribue à redéfinir dans les années

1910-1920 les pratiques de la foresterie, de l'agronomie et à forger une gestion scientifique des

pâturages américains, et dont les experts seront mobilisés dans des campagnes de politiques publiques de réhabilitation des sols post-Dust Bowl.

1913 ; Première société d'écologie, premier journal d'écologie à Londres

- Un autres des gros problèmes des écologues est de comprendre, et de prédire, les fluctuations de populations animales et notamment leurs oscillations.

(1925 : **Lotka et Volterra** et la dynamique des population

Ces deux mathématiciens formalisent à peu près en même temps, par des équations différentielles, les rapports entre taux de reproduction, taux de prédation, taux de mortalité : on obtient ainsi une représentation graphique des fluctuations d'abondance de population de proies et de prédateurs (courbe logistique : si le nombre de lièvres augmentent, celui de lynx aussi, mais aussi la pression de prédation, donc diminution de lièvre, donc de lynx, etc).

Ces équations marquent une première tentative de formalisation mathématique de la dynamique des population, autre branche de l'écologie dont je vais moins parler mais qui est

2 La notion de climax fait référence à un état théorique final et stable, en *équilibre dynamique* dans les conditions *abiotiques* existantes. Lorsque cet état est atteint, l'énergie et les ressources ne servent théoriquement qu'à maintenir cet état.

importante. Elles ne sont vérifiées que partiellement par un écologue soviétique qui fait des expériences en laboratoire sur des populations d'unicellulaires.)

→ Bon, mi XXe l'écologie a commencé à se structurer, les principaux concepts ont été forgés, il y a plusieurs écoles (aux USA, en suisse et en URSS notamment), des stations d'observation, etc. Elle a montré que les communautés vivantes avaient des propriétés – de structure, de fonctionnement – qui ne pouvaient pas simplement se déduire de celles de ses parties. Mais l'écologie demeure une branche un peu confuse de la biologie, parce que cela ne marche pas très bien : les successions végétales ne sont jamais vraiment les mêmes, les équations des populations ne se vérifient que dans certains cas, les spécialistes des lacs n'ont pas les mêmes références que les botanistes, etc. Il manque une théorie unificatrice qui en détermine véritablement l'objet. C'est la théorie des systèmes complexes et la conception thermodynamique du vivant qui va faire ce travail et permettre le déploiement de l'écologie écosystémique après-guerre.

2/ La théorie écosystémique et l'essor de l'écologie scientifique après-guerre. Vers l'étude des systèmes complexes

a) Historique

- 1935 : Le botaniste Arthur **Tansley** invente le terme d'écosystème pour s'opposer à la vision organiciste des communautés végétales de Clements et unifier l'étude du vivant et de l'inerte :
« La conception la plus fondamentale est, selon moi, l'ensemble du système (selon le sens donné à ce terme en physique) comprenant non seulement le complexe des organismes, mais également le complexe tout entier des facteurs physiques. [...] Les systèmes ainsi formés sont du point de vue de l'écologiste les unités de base de la nature à la surface de la terre. [...] Ces écosystèmes présentent la plus grande variété de types et de taille »

1935, *The use and abuse of vegetational concepts and terms*

Tansley invente le terme, mais c'est seulement à partir de l'adoption de l'analyse énergétique que va réellement s'opérer la continuité avec l'inorganique étudié par la physique-chimie. C'est un étudiant de 23 ans qui formalise la vision énergétique en écologie, dans le texte fondateur de la théorie des écosystème, d'abord refusé à la publication car considéré comme trop abstrait (« les lacs sont réfractaires à toute réduction à des formules mathématiques ! » déléage 128)

- **Lindeman**, *The trophic-dynamic aspect of ecology*, 1942 :

« Les analyses de cercles de relations trophiques indiquent qu'une communauté biotique ne peut être clairement distinguée de son environnement abiotique : l'écosystème doit être considéré comme l'unité écologique la plus fondamentale »

« le processus fondamental de la dynamique des relations trophiques est le transfert d'énergie d'une partie de l'écosystème à une autre »

Toujours et partout, on trouve : des producteurs primaires (=autotrophes), des consommateurs (hétérotrophes), des décomposeurs. On peut mesurer la productivité en biomasse.

Ecosystème = biocénose + biotope.

On a enfin un modèle commun à tous les milieux.

Schéma 5

Grâce à cette analyse énergétique, les écologues repèrent des structures qu'on retrouve à toutes les échelles écosystémiques. Ce qui se passe là, c'est une unification conceptuelle du vivant et de l'inorganique grâce à une vision thermodynamique du vivant. On va poser quelques principes pour comprendre ce que cela signifie.

La thermodynamique est une branche de la physique qui étudie les échanges d'énergie dans les transformations physico-chimiques. Machine à vapeur, par exemple, ou glaçon dans un verre d'eau.

- Premier principe : dans un système fermé (ballon de baudruche), l'énergie totale est conservée.

Basique, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. Pourtant, empiriquement, on constate que les transformations physico-chimiques sont orientées dans un certain sens. Il n'y a pas de moteur perpétuel, le pendule s'arrête, l'encre se diffuse, le glaçon fond.

On a donc besoin d'un second principe, que je vais poser comme tel parce qu'il serait trop long de l'expliquer. On l'appelle aussi le principe d'entropie.

- Second principe de la thermodynamique : « Toute transformation d'un système thermodynamique s'effectue avec augmentation de l'entropie globale incluant l'entropie du système et du milieu extérieur. On dit alors qu'il y a création d'entropie »

L'entropie (qu'on avait déjà rencontré dans le cours d'Ivan) c'est le nom d'une grandeur qui mesure le désordre d'un système. Lorsque l'énergie est diffuse, répartie de manière homogène partout, il n'y a pas de structure, on parle de désordre. Un ordre implique une différenciation d'énergie.

→ en gros, rien ne se perd, rien ne se crée, mais toute transformation d'un système, tout mouvement, implique une diffusion irréversible d'énergie, le plus souvent sous forme de chaleur. L'entropie totale ne peut qu'augmenter. Principe de l'irréversibilité des phénomènes physiques. Si on laisse se faire les réactions dans un système physico-chimique, il va arriver à l'équilibre (glaçon, pendule), c'est-à-dire à son état d'entropie maximale : toutes les transformations ont été opérées.

Donc, tout système physico-chimique tend spontanément vers un état d'équilibre qui est un état d'entropie ou de désordre microscopique maximal, parce que toute transformation d'un système implique une diffusion d'énergie.

Or le vivant se comporte différemment, du moins jusqu'à sa mort : il se maintient dans un état de déséquilibre dynamique. Il semble donc transgresser le second principe. Comment fait-il ? (reformulation thermodynamique du mystère de l'animation du vivant)

[- 1945, Schrodinger, *Qu'est-ce que la vie ?* (avant la découverte de l'ADN donc) propose le premier une vision thermodynamique des vivants : contrairement aux systèmes inertes qui « tendent vers un état d'équilibre où l'on n'observe plus aucun événement » (pendule, verre d'eau), c'est-à-dire un état correspondant à l'entropie maximale du système, les êtres vivants ne semblent pas obéir directement au second principe de la thermodynamique. « En mangeant, buvant, respirant », ils évitent l'évolution rapide vers un état d'entropie maximale qui est celui de leur mort.]

- 1953 : Frères **Odum**, Fundamentals of ecology
Les écosystèmes comme machines thermodynamiques auto-organisées

Les frères Odum vont considérer les écosystèmes comme des êtres vivants du point de vue de la physique, c'est-à-dire comme d'étranges systèmes qui résistent à l'entropie, et participer à forger les outils conceptuels qui permettent de les appréhender comme tels. Ils publient notamment un manuel qui va bouleverser l'écologie et contribuer à en faire une discipline à part entière : il sert d'unique manuel de référence pendant 10 ans, 5^e réédition en 2004.

« Les organismes vivants, les écosystèmes et la biosphère toute entière possèdent la caractéristique thermodynamique essentielle d'être capable de créer et de maintenir un état élevé d'ordre interne, ou de basse entropie »

Ce qui caractérise les écosystèmes, c'est que les êtres vivants ne se répartissent pas aléatoirement, mais exercent différentes fonctions au sein d'une communauté : ils transforment, stockent et échangent de l'énergie, on l'a vu (spécificité de la photo/chimiosynthèse : seule capable de transformer l'énergie du soleil en énergie chimique – en gros des sucres). Autrement dit, les communautés vivantes utilisent l'énergie pour produire de l'organisation³(schéma 6a), c'est-à-dire une structure interne. Cette propriété va être nommée auto-organisation.

Le problème, c'est qu'il n'y a pas de cause efficiente de l'ordre interne à un écosystème : contrairement aux organismes, l'écosystème n'a pas d'ADN⁴. Rien ne semble déterminer la fonction ou la répartition des espèces et des individus. Et cela paraît même compliqué d'en supposer une que la science n'aurait simplement pas encore découverte, puisque les écosystèmes n'ont pas d'unité propre ; c'est un découpage plus ou moins arbitraire, qui peut désigner autant une haie, un lac, une région, qu'un océan ou la terre.

Au lieu de rechercher des causes efficaces, la science des écosystèmes va aller chercher la raison de l'organisation dans les effets incidents de l'activité des êtres qui forment communauté. Les végétaux croissent et se reproduisent : incidemment, ils produisent de l'oxygène et des sucres qui fournissent les conditions nécessaires à l'existence d'organismes qui fertilisent, eux aussi indirectement, le sol dont ces végétaux se nourrissent. Les propriétés singulières des écosystèmes émergent de l'ensemble des interactions entre leurs éléments constitutifs, et non d'une ou plusieurs forces qui commanderaient la structure.

Odum va modéliser et quantifier cette causalité incidente grâce aux outils conceptuels de la cybernétique, et notamment grâce à la notion de rétro-action (on retrouve aussi les entrées et les sorties, les boîtes noires, etc).. Les fonctions des différents êtres – vivants et inertes - qui composent l'écosystème ne sont pas déterminées par une force qui s'exercerait directement sur eux, mais par les rétroactions, positives ou négatives, que leurs actions engendrent et qui ajustent leurs façons d'agir. La rétro-action modifie la relation entre la cause et l'effet : c'est en cela qu'elle modifie vraiment le modèle de causalité linéaire qu'on avait vu au début Schéma 6c

Exemples de boucle de rétroaction positive/négative en écologie :

3 Cf vidéo science étonnante « qu'est-ce que la vie ? » et le concept de « lyfe » en astrobiologie : structures dissipatives (tornade), capable de reproduction (flamme), de régulation (écosystème) et d'apprentissage (organisme).

4 Dont le rôle comme vecteur de l'information génétique a été mis en évidence en 44, et la structure en double hélice modélisée en 1953.

Feedback négatif qui ajuste le comportement d'un prédateur ou d'un parasite, qui tue son hôte s'il est trop vorace ; ou encore augmentation de la température, augmentation de l'évaporation des océans, augmentation de des gazs à effets de serre, augmentation de la température (et nuages= diminution de la température).

schéma 6d

L'écosystème est désormais considéré comme une machine thermodynamique traversée par des flux d'énergie, de matière et d'information, capable de lutter contre l'entropie grâce à des propriétés d'auto-organisation. Ces propriétés émergent des interaction entre ses éléments constitutifs.

C'est ce qui fait que les écosystèmes sont considérés comme des objets complexes : leur comportement ne peuvent pas être décrit par un ensemble de lois qui relient des causes à des effets déterminés, contrairement par exemple aux trajectoires de boules de billard ou de missiles.

b) Systèmes complexes et causalité

On va faire un point sur cette notion de complexité.

Je ne m'attarde pas là-dessus, mais à peu près à la même période que celle où Odum rédige son manuel, il y a tout un courant de pensée qui s'appelle la systémique, dont font partie les penseurs de la cybernétique mais qui est plus large. Ce sont notamment des ingénieurs, mais aussi des biologistes ou des psychiatres, qui réfléchissent aux objets que les modèles mécaniques classiques de la physique moderne ne permettent pas d'analyser.

Malgré mes efforts, mais je ne suis pas capable d'expliquer précisément ce que la notion de système complexe change par rapport au modèle de relations déterministe des sciences modernes. Ce qui est clair, c'est que la notion de complexité est une sorte de concept limite en sciences contemporaines, dont la signification est fortement discutée. C'est le concept par lequel les sciences contemporaines cherchent à saisir ce qui échappe à la méthode scientifique classique.

On peut tout de même retenir deux choses, qui nous intéresse :

1- Un système complexe n'est pas déterminé par des lois, mais par l'ensemble des interactions de ses éléments constitutifs. Par exemple, une foule.

Ce n'est pas simplement une question de nombre d'éléments : par exemple, si on lance 10 000 balles rebondissantes dans une salle, on a un système compliqué mais pas complexe, parce que le comportement de chaque balle est déterminé par des lois qui ne sont pas modifiées par ses interactions avec les autres. On peut connaître les lois qui déterminent le comportement d'une particule en l'isolant de son milieu, ce qui n'est pas possible dans un système complexe comme une foule ou un écosystème⁵.

C'est ce qui rend l'évolution d'un système complexe plus difficilement prédictible : on ne peut pas, à partir d'un état initial connu, prédire le comportement d'un système, parce que les relations les différents composants vont être modifiées par leurs interactions .

"J'appellerai système complexe un système que la perte d'un de ses éléments fait changer de nature et à qui, à la limite, elle fait perdre sa qualité de complexe"

L'expérience et le modèle - Un discours sur la méthode de Jean-Marie Legay

5 "J'appellerai système complexe un système que la perte d'un de ses éléments fait changer de nature et à qui, à la limite, elle fait perdre sa qualité de complexe" *L'expérience et le modèle - Un discours sur la méthode* de Jean-Marie Legay

2 – Le rôle des technologies de collecte et de traitement des données dans la maîtrise des systèmes complexes.

Comme on ne peut pas isoler une variable pour en déterminer les effets en laboratoire, la méthode scientifique classique s'applique difficilement aux objets complexes. Il faut considérer le comportement global. Du coup, on collecte un maximum de données, on en tire des règles approximatives, en général on rajoute de l'aléa parce qu'on sait qu'il y a des éléments qu'on n'a pas pris en compte, puis on fait des simulations informatiques parce que les calculs sont très complexes. Puis on compare les résultats de la simulation avec les résultats empiriques, et on recommence. La possibilité d'observations satellites a ainsi énormément contribué au développement de l'écologie. Les modèles climatiques du GIEC, par exemple, sont directement issus de ce type de méthode.

Remarque :

→ Souvenons-nous du cours sur la cybernétique : l'écologie réussit là où la cybernétique a échoué (se constituer en discipline), avec les concepts mêmes de la cybernétique. L'essor est strictement contemporain, il y a des cybernéticiens écologues (Bateson). Les sciences écologiques participent puissamment à la conception, à la diffusion ou à l'usage des concepts de système, de rétroaction et à l'unification sous ce nouveau paradigme des mondes humains et naturels. L'écologie a largement participé à la construction du « monde cybernétique sans cybernétique » dont parlait Triclot.

→ Les sciences modernes abstraient des causes efficientes pour formuler des lois, qui déterminent les rapports mécaniques entre les corps.

L'écologie formalise la causalité incidente pour construire des modèles, qui permettent d'approcher les interactions propres aux systèmes complexes.

(L'écologie, dans un même mouvement, mécanise le vivant et transforme le modèle mécanique classique.)

Qu'est-ce que cela change aux rapports entre savoirs et pouvoirs ?

c) Applications et conséquences institutionnelles :

- La théorie des écosystème et la division qu'elle fait tomber entre inerte, vivant et humain entraîne un essor majeur de l'écologie à partir des années 60 : elle devient une discipline à part entière, avec des programmes de recherche et d'enseignement dédiés, des stations d'observation, et même elle coordonne des projets inter-disciplinaires de grande envergure.

Odum, Ecology, 1975 :

« Jusqu'à très récemment, l'écologie était considérée, dans les cercles académiques, comme une branche de la biologie. Maintenant l'accès s'est déplacé vers l'étude systémique de l'environnement [...] Ainsi, d'abord une branche des sciences biologiques, l'écologie s'est maintenant hissée au rang d'une science interdisciplinaire qui fait le lien entre les sciences biologiques, physiques et sociales »

Un exemple : le PBI entre 1968 et 1974

Entre 1968 et 1974, avec un budget de 43 millions de dollars, le Programme Biologique états-uniens, version nationale d'un programme international similaire, mobilise plus de 1800 chercheurs. Chacun des cinq projets est responsable de la modélisation et de la simulation informatique d'un des grands écosystèmes couvrant le territoire états-unien. L'ambition est d'améliorer la capacité prédictive de l'écologie en étudiant les réponses des écosystèmes à des

perturbations environnementales ou à différentes stratégies d'exploitation et de rationaliser scientifiquement la gestion des ressources naturelles

- La théorie des écosystème permet le calcul de budgets énergétiques, à toute sorte d'échelles, et sans distinction entre nature et société. On peut quantifier et gérer le fonctionnement d'une entreprise comme d'une forêt, avec les mêmes termes de productivité, de rendement (vitesse de transformation de l'énergie en biomasse), etc.

Exemple : production primaire d'une forêt : quantité de molécules organique produite par unité de temps et d'espace, chiffrée selon les types de forêt⁶. On peut savoir comment ajuster les prélèvements à la capacité de régénération d'une forêt.

Elle permet de mesurer ce qu'on appelle aujourd'hui les services écosystémiques, à savoir les bénéfiques retirés par les humains des activités écosystémiques, les plus connus étant la pollinisation ou la production d'oxygène. En 2000, Kofi Annan, Secrétaire Général de l'ONU, commande un rapport, rendu en 2005 par plus 1000 experts, qui s'intitule *Evaluation des écosystèmes pour le millénaire* : ce rapport donne la définition de cette notion et vise à mesurer l'ampleur des modifications apportées aux écosystèmes dont les êtres humains dépendent.

L'évaluation des services écosystémiques permet notamment de chiffrer les mesures de compensation écologiques dans la réalisation de projet, marché en plein développement.

- En même temps que triomphe l'écologie systémique et que se mettent en place ces différents programmes nationaux et internationaux, l'étude des écosystèmes permet de mesurer les conséquences de l'activité industrielle sur les milieux : l'ouvrage emblématique de cette époque est celui de Rachel Carson (biologiste marine), *Silent Spring*, publié en 1962, qui montre les effets du DDT sur les populations d'oiseaux, récemment réédité en français. Les mouvements écologistes dans les années 60 sont nombreux et puissants, et de plusieurs figures écologistes sont des scientifiques.

En 1969, Nixon institutionnalise les préoccupations environnementales avec l'adoption du *National Environmental Policy Act* (NEPA) : cette loi contraint notamment les aménageurs à procéder à des études d'impact environnemental pour tout projet – et offre aux écologues une nouvelle niche professionnelle. Elle va être vivement critiquée par les néo-libéraux et Reagan qui lui succède.

Fin des années 80, premières alertes sur le changement climatique (88, Hansen au Sénat américain) et premiers mouvements de défense la planète dans sa globalité.

→ On retrouve notre ambiguïté initiale : l'écologie scientifique apporte un nouvel objet, l'écosystème, à la maîtrise technique de la nature. En même temps elle permet de mesurer les conséquences des activités industrielles sur les milieux. On va essayer de préciser les termes de cette ambiguïté.

Transition

Résumons.

- Historiquement, la science des milieux est une science comme les autres. Il n'y a pas de contradiction entre la rationalité écologique et celle des sciences modernes : la loi de la chute des corps reste inchangée par les sciences écologiques, la balistique aussi. Certes, pour saisir son objet, elle modifie le modèle mécanique classique : les communautés vivantes sont des

⁶ 30 tonnes par hectare et par an (t/ha/an) de masse végétale (poids sec) dans les forêts tropicales humides, dont près de la moitié sous forme de racines, de 7 à 8 t/ha/an dans les prairies tempérées, de 1 à 2 t/ha/an dans la toundra (article universalis).

machines complexes, dont on ne peut pas abstraire des causes efficientes pour en donner les lois, mais seulement formaliser les interactions. Cela n'en empêche pas la maîtrise, loin de là : les sciences écologiques permettent une gestion rationalisée de nouveaux objets, comme les terres agricoles comme des populations de poissons ou les réseaux énergétiques urbains, en offrant à l'intervention technique une intelligence des effets incidents.

- Le problème, c'est que le milieu n'est pas un objet comme les autres. Il n'est pas seulement ce sur quoi on agit, mais ce dans quoi on agit. L'écosystème, par définition, n'a pas de limites définies. L'écologie ne remet pas en question les lois de la nature, mais elle montre que tous les rapports déterminés entre une cause et un effet s'inscrivent dans un réseau complexe d'interrelations. Tout agir technique, appuyé sur la connaissance d'un rapport déterminé, peut être situé dans son milieu. Les écologues, avec leurs études d'impact, leurs rapports nationaux et internationaux, font proliférer les boucles de rétro-action dont s'emparent les activistes. Tout se passe comme si la flèche de la causalité efficiente était soudain alourdie par la considération de mille effets incidents (azote, pesticides et pollinisation), et l'efficacité industrielle embarrassée de la considération de ses externalités au point que les sciences écologiques perturbent, sans le vouloir, la marche du progrès.

- La question dès lors est de savoir si on peut maîtriser les milieux. Est-ce qu'on peut intégrer au modèle déterministe et efficient la considération de ses effets incidents, et résorber les externalités des activités industrielles grâce à des techniques plus intelligentes, ou est-ce l'écologie complexifie la causalité au point de troubler définitivement le projet de maîtrise de la nature ? (Réforme ou révolution ?)

Les enjeux de cette question sont beaucoup plus clairs à l'échelle globale : en effet, on peut ignorer le milieu *dans* lequel on agit (=les effets incidents de notre action) lorsqu'on agit *sur* un banc de poissons, mais pas lorsqu'on agit sur l'écosystème-terre. A cette échelle, on ne peut pas externaliser les effets incidents de la production : la rétro-action finira forcément par nous revenir dans la figure.

On va donc aller voir ce qu'il se passe quand on applique la théorie des écosystèmes à l'échelle globale. On va s'intéresser en particulier à ce qu'on appelle l'hypothèse Gaia, qui est le nom que deux scientifiques donnent au point de vue écosystémique pris sur la planète. A cette échelle, les enjeux des problèmes épistémologiques posés par la théorie des écosystèmes apparaissent clairement : soit on fait de la terre elle-même un système à piloter, soit on change notre rapport à la nature toute entière.

Pour finir, on va rapidement évoquer les interprétations que certains philosophes font de cette hypothèse pour tenter de la tirer du côté de la deuxième branche de l'alternative.

(Devenir indiens ou géo-ingénieurs ?)

C/ l'Hypothèse Gaia et les sciences du système-terre : la fin de la nature ?

1) l'hypothèse Gaia

a) Lovelock et Margulis

Dans les années 70, en 1974 précisément, James Lovelock (ingénieur pour la NASA) et Lynn Margulis (biologiste) publient un article fondateur qui s'intitule : *The atmospheric homeostasis by and for the biosphere : the Gaia hypothesis*.

Les deux scientifiques y proposent de considérer l'ensemble des êtres vivants + surface terrestre (atmosphère, lithosphère, hydrosphère) comme un système auto-régulé, qui maintient activement certaines variables entre des valeurs favorables à la vie. C'est cet ensemble qu'ils nomment Gaia. Pour démontrer son existence, ils s'appuient notamment sur la composition de l'atmosphère terrestre comparée à celle de deux autres planètes telluriques, Vénus et Mars :

"En 1965, je travaillais pour la Nasa, qui s'intéressait à l'existence de la vie sur Mars. Je me suis dit que si Mars était une planète morte, alors la composition chimique de son atmosphère, détectable à distance, serait certainement proche de l'équilibre thermodynamique. Pour vérifier la justesse du raisonnement, je me suis interrogé sur l'atmosphère terrestre et j'ai réalisé que celle-ci contient d'importantes quantités d'oxygène et de méthane, un mélange instable qui n'aurait pu se maintenir pendant des centaines de millions d'années sans un système de régulation. Et là, il m'est apparu que ce système c'est la vie. La Terre était donc vivante, tandis que Mars, avec son atmosphère dominée, était morte⁷."

Présentation biographique :

- James Lovelock : Lovelock est un personnage assez étrange. Il a une formation en médecine, mais c'est surtout un ingénieur et un chimiste. En 1974, il travaille comme consultant pour la NASA ; il a aussi travaillé pour Shell et pour plusieurs grosses compagnies, parce qu'il est capable de mesurer très précisément les fuites d'un pipeline dans l'océan ou des CFC dans l'atmosphère, ou d'écrire des rapports prospectifs sur le changement climatique. Il est difficile d'avoir une idée claire de son positionnement politique : au départ, il semble plutôt minimiser les conséquences du changement climatique, en considérant que Gaia est bien plus forte que l'espèce humaine ; à un moment, il se met à considérer l'espèce humaine comme un grave problème, et suggère des solutions malthusiennes et le passage au tout nucléaire. Bref, c'est un espèce de scientifique entrepreneur, un peu génial, assez flipant. Il est résolument favorable au nucléaire et à la géo-ingénierie.

Lynn Margulis : microbiologiste américaine reconnue, morte en 2011. Elle écrit dans les années 60, travaille sur le monde bactériel dont elle transforme profondément la vision (elle est surtout connue pour sa théorie de l'endosymbiose, en gros théorie de l'évolution qui l'explique par transfert horizontaux de gènes autant, voire davantage que par mutation et sélection des plus aptes, d'abord controversée, aujourd'hui acceptée). (parler du site vivelemaoisme ? 15 pages très précises sur Margulis et sa théorie de l'évolution non compétitive). Elle cesse de travailler avec Lovelock au moment où celui-ci comme à développer un modèle mathématique de simulation informatique de sa théorie (Daisyworld), au nom du refus de ce type d'outil pour modéliser le comportement des vivants.

L'hypothèse suscite évidemment de grosses controverses, notamment à cause de l'usage du nom, en général immédiatement associé au référent « New Age » : elle est critiquée par différents scientifiques, et notamment par les néo-darwiniens en biologie. En réalité les controverses, voire les contresens, portent surtout la nature de l'entité « Gaia », et sur le statut qui est par là accordé à la planète : organisme ayant sa propre finalité, voire sa propre

7 Lovelock, Entretien avec Science et vie. 2007

intentionnalité ? Machine thermodynamique ? La prose de Lovelock est à cet égard très équivoque.

b) Le rôle des vivants dans la genèse et la régulation de l'atmosphère terrestre

Je ne vais pas rentrer dans ces controverses, parce qu'en réalité il n'y a pas besoin de les trancher pour comprendre en quoi l'hypothèse Gaia bouscule notre conception de la causalité, et c'est ce qui m'intéresse. Il suffit de comprendre ce qui est aujourd'hui largement établi, à savoir que plusieurs des variables terrestres essentielles à la vie (composition de l'atmosphère, température, etc) sont historiquement le fruit et sont aujourd'hui régulées par l'activité des êtres vivants et en particulier des micro-organismes.

Par exemple, un des manuel de référence en écologie en France (Ramade) commence par la genèse de la biosphère, dans laquelle les êtres vivants jouent un rôle de premier plan (allez, un peu de cosmogonie) :

Il était une fois, la Terre : 4, 55 ma d'années. L'atmosphère primitive est quasi dépourvue d'oxygène, saturée de méthane et de gaz carbonique et absolument toxique pour les formes de vie actuelles. Cette atmosphère pleine de cendres volcaniques ressemble à un brouillard rougeâtre. Très rapidement à l'échelle des temps géologiques (-3,8Ma), au début de l'Archéen, apparaissent dans les océans des cyanobactéries⁸, premiers organismes photosynthétiques – procaryotes - dont on trouve la trace dans d'immenses dépôts fossiles, les stromatolites. Ces organismes sont à l'origine de l'atmosphère actuelle, dite Tertiaire : pendant 1ma d'année, leur activité photosynthétique dégage de l'oxygène qui produit diverses réactions modifiant la composition de l'atmosphère (oxydation du méthane en particulier) et permettant la formation progressive de la couche d'ozone (O3) qui rend possible l'apparition de la vie hors des océans. Ce processus s'accélère à la fin de l'Archéen (-2, 5Ma) avec l'apparition d'eucaryotes photosynthétiques (algues unicellulaires). La couche d'ozone achève de se former il y a 600 M d'années.

Après, début de la colonisation des continents émergés, explosion cambrienne, etc. 5 extinctions de masse, 3 glaciations, des épisodes de réchauffement (atteignant même, il y a 60 millions d'années, un pic de chaleur 15 °C au-dessus de celui que nous connaissons aujourd'hui). Bref, une histoire très mouvementée. Et dans cette histoire, l'activité biologique joue un rôle central.

L'hypothèse selon laquelle en l'absence d'activité biologique, l'atmosphère – et la géologie (falaises) - terrestre serait très différente et comparable à celle des deux autres planètes telluriques les plus proches, Mars et Vénus, dont l'atmosphère est à l'équilibre thermodynamique et absolument impropre aux développement de formes de vie connues, est aujourd'hui établie. La mise en évidence du rôle des micro-organismes là-dedans revient entièrement à Margulis.

Margulis (Gaia, in Ecologie politique, Emilie Hache) : « *Gaia n'est ni malfaisante ni protectrice dans sa relation à l'humanité. C'est un nom pratique donné à un phénomène qui s'étend à l'ensemble de la Terre : la régulation de la température, de l'acidité/alcalinité et de la composition gazeuse. Gaia est l'ensemble des écosystèmes en interaction qui composent un seul écosystème énorme à la surface de la Terre. [...]* »

⁸ Les Archées ont des modes de vie dits « extrêmes » (on dit cela principalement parce qu'elles vivent en milieu anaérobie, sans oxygène, aussi bien dans le fond des océans que dans des crevasses sulfurées de volcans, que dans nos entrailles

S'il n'y avait pas de vie, la température et la composition gazeuse seraient prévisibles simplement à partir de facteurs physiques. La production d'énergie du Soleil et les règles de la chimie et de la physique détermineraient les propriétés de la surface de la Terre. Les théories non biologiques sont insuffisantes pour expliquer l'environnement de la surface de la Terre. »

On retombe assez précisément sur ce que j'avais essayé de montrer à la fin de la partie précédente. Considérer la terre comme un écosystème – Gaia – signifie que l'on ne peut pas considérer ses propriétés comme simplement déterminées par les lois qui régissent celles de ses éléments.

c) Les sciences du système-Terre :

Cette hypothèse joue un rôle clef dans le développement, depuis la fin des années 80, de ce qu'on appelle les sciences du système Terre, selon un terme moins embarrassant que Gaia. Celles-ci se donnent pour objet le système complexe dont les propriétés dépendent de l'ensemble des interactions entre les mondes vivant, physico-chimique et humain. Ces sciences du système-terre sont en plein développement.

Le programme le plus connu est l'IGBP (Programme international géosphère-biosphère), 1987 – 2015, consacré à l'étude du « global change ». C'est l'IGBP qui a produit ou avalisé des concepts tels que : global change, tipping point (point de bascule), anthropocène, etc. Son objectif affiché est de coordonner « la recherche internationale sur les interactions, à l'échelle globale et régionale, entre les processus biologiques, chimiques et physique de la Terre, et leurs interactions avec les systèmes humains. » (wikipédia)

Ces interactions, à nouveau, sont formalisées grâce à des boucles de rétro-action qui permettent de modéliser la gigantesque masse de données collectée, plutôt que par des lois : cf dessin de Lovelock (schéma 7).

Ce dessin est ridiculement simpliste, mais ce ridicule n'est pas anodin. Il met en évidence la métaphore cybernétique qui irrigue les sciences du système-terre : les modèles produits par tous ces acronymes internationaux (GIEC, IGPB, IBPES) sont infiniment plus complexes, mais la logique est la même.

Or l'enjeu est important. Les sciences du système terre fournissent les modèles qui servent de base aux propositions de la géo-ingénierie, qui visent à manipuler le climat et d'autres variables à l'échelle planétaire pour résoudre les problèmes écologiques. Les plus connues sont la fertilisation des océans pour développer du plancton capable de stocker de grandes quantités de CO₂ ; la diffusion par aérosol de soufre dans l'atmosphère pour augmenter la capacité de réflexion de la lumière du Soleil (albédo) de la surface terrestre.

Pour cela il faut pouvoir modéliser avec assez de précision le fonctionnement du système pour maîtriser les effets incidents de telles interventions techniques, jusqu'à imaginer un pilotage global du système terre.

Résumons les acquis de cette hypothèse.

→ Les êtres vivants font leur environnement.

En réalité, cette idée d'indistinction entre l'action des vivants et le cadre est déjà présente dans le concept d'écosystème : les actions rétro-agissent sur le milieu jusqu'à lui donner forme. On peut relativiser la nouveauté de l'idée (vers de terre, ou plante qui produisent de l'oxygène, on le sait depuis longtemps) : mais son ampleur change qualitativement sa portée.

L'habitabilité de la terre est le fruit de l'activité des êtres vivants. Les effets incidents ne sont pas marginaux. Les propriétés de l'atmosphère, des océans, des couches géologiques supérieures ne sont pas des données stables, immuables et déterminées par des lois, mais dépendent d'interactions complexes entre toutes sortes de bestioles et de particules. Evidemment, cela signifie que cette activité peut aussi l'altérer.

Le point de vue que donne l'hypothèse Gaia sur la Terre, considérée comme un système complexe, donne à voir beaucoup plus clairement les enjeux des querelles épistémologiques autour de la théorie des écosystèmes ou des systèmes complexes. Savoir si un système complexe est compatible ou non avec la conception déterministe de la causalité qui fonde l'efficacité technique, à l'échelle planétaire, cela consiste à savoir si l'on peut ou non injecter des nutriments dans l'océan pour réguler la composition de l'atmosphère. La dessus, l'hypothèse Gaia ne permet pas de trancher : elle considère la Terre comme un système complexe, et la question reste ouverte quant à savoir si ce système est maîtrisable ou pas.

- soit on considère qu'il n'y a pas de contradiction fondamentale entre le modèle mécanique et le modèle systémique de la causalité, mais simplement un approfondissement ; qu'on peut modéliser et maîtriser la causalité incidente (les interactions) aussi bien que l'efficiente (les lois) ; et piloter le système-terre, à condition d'avoir des données assez nombreuses et des intelligences suffisamment performantes pour les traiter. Dans ce cas, les rapports entre savoir et pouvoir demeurent des rapports de maîtrise technique.

- soit on considère qu'il y a un véritable changement qualitatif, sinon une opposition, entre le modèle déterministe et le modèle systémique, parce qu'on estime qu'on a là une sorte de savoir scientifique de l'incertitude. Les modèles sont nécessairement réducteurs, les scientifiques le savent très bien et ne s'en cachent pas. Mais rien ne garantit alors qu'une interaction importante n'ait pas été négligée, qu'un aspect du système dont on a fait abstraction ne rétro-agisse pas de manière imprévue sur les données initialement prises en considération. Il devient alors possible de s'appuyer sur ce savoir de l'inadéquation du modèle et de la réalité pour transformer profondément les rapports entre savoir et pouvoir, c'est-à-dire la technique.

Le problème épistémologique a bien des conséquences politiques majeures :

→ quels modes d'action et de production faut-il adopter si l'on veut prendre soin des effets incidents ? Comment agir dans des milieux vivants et non utiliser les lois de la nature pour produire des effets déterminés ?

On peut penser à l'exemple de l'agriculture, sur lequel travaillent certaines personnes ici. Pour transformer l'agriculture intensive et ses effets incidents destructeurs, une ligne est proposée par l'agriculture de précision, où la collecte de données et l'assistance numérique à la décision permet de gérer chaque exploitation assez finement pour se passer des intrants chimiques et fournir pile la juste quantité d'eau ; celles et ceux qui pratiquent une paysannerie où on répond à l'exigence écologique de soin du milieu par la maîtrise des moyens de production agricoles (Atelier paysan).

2) Les interprétations philosophiques de cette hypothèse : la fin de la nature ?

Un certain nombre d'auteurs, pour beaucoup des philosophes des sciences qu'on a déjà rencontré dans les cours précédents (Haraway, Latour, Stengers, etc) qui, dans cette querelle épistémologique sur la notion de système complexe, essaye de tirer l'Hypothèse Gaia du côté

de la seconde branche de l'alternative. Eux considèrent qu'il y a une rupture épistémologique et donc cosmologique entre la figure de la nature telle qu'elle a été construite à partir les sciences modernes, et la figure de Gaïa que dessinent les sciences écologiques.

Remarquons que pour ces auteurs, on peut dissocier la pratique des sciences de cette figure de la nature exclusivement régie par des lois mathématiques et techniquement maîtrisable. On peut sortir du processus civilisationnel appelé modernité qui a opéré cette réduction sans abandonner la connaissance scientifique.

J'aurai bien aimé, mais je ne peux pas prendre le temps de déployer les différentes thèses et positions de cette galaxie d'auteurs qui s'entre-citent tous et toutes les uns les autres. On en a déjà rencontré quelques-un.es (Latour, Haraway, Stengers).

Toutes et tous tire l'hypothèse Gaïa du côté de la rupture, et s'appuient pour cela sur les sciences. Ils s'appuient sur la notion de système complexe pour dire que les sciences, aujourd'hui, nous montrent qu'on ne peut plus maîtriser la nature comme on pensait pouvoir le faire quand on pensait que tous les rapports pouvaient se penser sur le modèle des rapports mécaniques. Ils creusent l'opposition entre l'ancienne figure et le réseau d'interaction tracé par les sciences écologiques dont ils insistent sur le caractère complexe, enchevêtré, intotalisable. Latour parle de « fouillis » à propos du système terre, dont il refuse la totalisation, Haraway de « Chthulucène » plutôt que d'Anthropocène pour insister sur la complexité tentaculaire plutôt que sur le pouvoir humain comme caractéristique de l'époque. On reviendra cet après-midi là dessus.

Bref, il s'agit de tirer la notion scientifique de complexité du côté de l'immaîtrisable.

A nouveau, il ne s'agit pas de dire que les sciences écologiques réfutent les lois de la nature : mais elles réintroduisent ce dont il avait fallu faire abstraction pour pouvoir considérer les mouvements de tous les corps comme régis par les mêmes lois. Ce qui change, au fond, ce n'est rien d'autre que le point de vue que les sciences des systèmes complexes nous font adopter sur le monde, selon ce à quoi on choisit de se rendre attentif. Bruno Latour, dans un cycle de conférences de 2015 intitulées *Face à Gaïa*, oppose la figure de Lovelock à celle de Galilé. Non pas parce que les lois de la chute des corps seraient modifiées par l'hypothèse Gaïa ; Lovelock ne réfute pas Galilé ; mais il fait passer d'une figure de la terre (la terre est un corps en chute libre parmi tous les autres) à une autre (la terre est le résultat singulier de multiples connexions instables).

L'hypothèse Gaïa ne change rien, au fond, à la théorie des écosystèmes : mais elle fait voir que le milieu n'est pas un objet comme les autres, parce qu'on ne peut pas le regarder du dehors, et agir sur lui sans qu'il (rétro)agisse sur nous. La notion de maîtrise technique s'en trouve sensiblement transformée. Dans ce changement de point de vue, il y a pour ces auteurs une révolution cosmologique analogue à la révolution copernicienne. Avec l'écologie, la politique devient une affaire de monde.

Conclusion

On s'était demandé en quoi l'étude des milieux transforme les rapports entre savoir et pouvoir.

- Parce qu'on passe de rapports réguliers et maîtrisables à un ensemble grouillant d'interactions difficilement prévisibles ; d'objets régis par des lois qui unissent des causes à des effets bien déterminés, à des systèmes complexes dont les propriétés ne découlent pas de variables bien définies, mais émergent d'un réseau d'interactions instables ; de la nature à Gaia. Bref, on n'agit plus dans un univers immuable, mais dans des milieux rétroactifs.

- L'étude des milieux démultiplie ainsi les effets imprévus ou les externalités négatives de nos actions, et surtout elle nous en donne la mesure ; elle ne donne pas seulement à l'action les moyens de son efficacité, mais la responsabilité de son incidence. Tout agir est situé, parce que ses moyens ne sont pas neutres.

- Les savoirs écologiques exigent donc une mutation de nos modes d'action – et surtout de production. Avec l'écologie, la question technique, la question des moyens (re)devient une question politique, où il y a des décisions à prendre, parce que les sciences ne dictent pas une seule manière de faire.

Rien ne dit cependant que le complexe techno-scientifique ne soit pas capable de s'adapter à Gaia ; il est en train de le faire. (Breakthrough Institute) Le complexe réseau-flux est depuis un moment le nouveau paradigme social-naturel : si l'on ne peut plus maîtriser la nature comme on croyait le pouvoir au XIXe siècle, il s'agit aujourd'hui de la gouverner.

Quelques points que je retiens de ce travail :

1) La proximité de l'écologie et de la cybernétique comme sciences de gouvernement. L'écologie utilise les outils de la cybernétique (concepts et instruments) pour abolir les frontières entre vivant et inerte, organisme et environnement, et parvenir ainsi à modéliser les écosystèmes. L'écologie participe clairement de la constitution, dans la seconde moitié du XXe siècle, d'une nouvelle rationalité scientifique à même de saisir et de gouverner des objets qui lui échappaient jusque-là par leur complexité – la communication, les communautés, etc.

2) Il ne suffit pas de défaire l'opposition entre nature et culture, ou entre d'autres grands dualismes (individu/communauté), pour changer de monde. Ces derniers ont été « technodigérés » (Haraway) par les sciences et les techniques contemporaines depuis un bon moment, comme le montre bien le concept d'écosystème.

3) Contre l'opposition entre une écologie « sensible » et une écologie scientifique abstraite, je voulais montrer que l'écologie scientifique donne des armes – intellectuelles - pour combattre la technoscience. Selon la manière dont on interprète les sciences contemporaines on peut en tirer des manières d'agir ou des systèmes de production très différents. Il y a un enjeu politique dans les questions épistémologiques. L'écologie politise la technique. Beaucoup d'ingénieurs travaillent actuellement à adapter la technique à la maîtrise des systèmes complexes et des effets incidents ; il y a un autre travail à faire si l'on refuse ce projet de maîtrise. Bref, l'écologie politise des scientifiques, et on en a besoin.

4) Tout l'enjeu de la discussion avec la collapsologie et la planification écologique est de savoir quelles sont ses capacités de prédictions. Il me semble qu'on peut affirmer que l'écologie n'est pas le nouveau matérialisme historique, et que ce n'est pas désirable. Au contraire, elle rend l'histoire naturelle aussi instable que l'histoire humaine. De quels types de prédictions est capable l'étude des systèmes complexes ? Je laisse sur ce dernier point la parole à Maxime