

Scientificité de la gouvernance des systèmes non linéaires

©Luc Opdecamp, mai 2026

Résumé

La science est un critère de légitimité politique. Une survol rapide en est opéré sur ses fondements épistémologique: du déterminisme de la science newtonienne à la systémique des années 1970, en passant par le courant du scepticisme. La science se définit comme une recherche de la vérité. Les systèmes concernent essentiellement l'environnement et la santé humaine et animale. Ils sont ouverts, naturels ou anthropisés. Ses composants sont les organismes vivants, les cours d'eau, les paysages ou les climats. Leurs trajectoires fluctuent et sont soumis à des bifurcations, au chaos et à une forte sensibilité aux conditions initiales car leur dynamique est non linéaire. Dans ces conditions, ils ne sont plus mathématisables et les sciences naturelles doivent renoncer à en prévoir le comportement futur. Cependant elles demeurent explicatives et permettent donc d'en comprendre le comportement passé ou à court terme. Sur le moyen et le long terme, elles doivent déclarer forfait car ces systèmes sont imprévisibles. Le déterminisme n'y a plus cours face à la complexité et à l'enchevêtrement d'interactions entre les composants.

La politique s'est accaparée de la gestion de l'environnement et de la santé humaine et animale par by-pass des sciences naturelles en se tournant vers la prospective qui procède par analogie et n'a pas de fondement scientifique. La prospective ne connaît pas la méthode expérimentale, c'est un art divinatoire. Elle ignore les phénomènes d'induction et de déduction. Elle s'est un peu imposé en sciences sociales mais son transfert dans les sciences de la nature est bloqué. Elle se répand grâce à un glissement de la fenêtre d'Overton soutenu par les médias traditionnels.

La politique recourt à des organismes internationaux composés de fonctionnaires et d'experts, ce qui dilue sa responsabilité au niveau national. Ces organismes planifient et sont soumis à une forte influence des lobbies et ONG. Il en résulte un développement d'idéologies transmises par les médias traditionnels et l'enseignement pour fabriquer le consentement des populations et recruter les étudiants. Les biologistes, géographes, médecins, agronomes, etc. qui dénoncent dans les médias alternatifs les idéologies mises en œuvre sont alors censurés, désavoués et exclus de la société.

Il existe cependant une éthique dans la gestion de la complexité des systèmes non linéaires. Elle consiste à une adaptation rapide, progressive ou inutile aux bifurcations et à l'émergence de nouvelles structures dissipatives.

Mots clés

déterminisme, prospective, idéologie, médias, Overton

Abstract

Science serves as a benchmark for political legitimacy. This paper offers a brief overview of its epistemological foundations: from the determinism of Newtonian science to the systems theory of the 1970s, with a focus on the sceptical tradition. Science is defined as the search for truth. The systems under study primarily concern the environment and human and animal health. They are open, natural or antropized. Their components include living organisms, waterways, landscapes, and climates. Their trajectories fluctuate and are subject to bifurcations, chaos, and a high degree of sensitivity to initial conditions because their dynamics are nonlinear. Under these conditions, they can no longer be modeled mathematically, and the natural sciences must abandon any attempt to predict their future behavior. However, they remain explicative and therefore help us understand past or short-term behavior. In the medium and long term, they fall short because these systems are imprevisible. Determinism no longer applies in the face of the complexity and intertwined interactions among the components. Politics has taken control of environmental management and human and animal health by bypassing the natural sciences and turning to prospective that proceeds by analogy and has no scientific basis. Prospective do not rely on the experimental method; it is a form of divination. It ignores the principles of induction and deduction. It has gained some recognition in the social sciences, but its transfer to the natural sciences has been blocked. It is spreading thanks to a shift in the Overton window, supported by the traditional media. Politics relies on international organizations composed of bureaucrats and experts, which dilutes national accountability. These organizations are heavily influenced by lobbyists and NGOs. The result is the spread of ideologies disseminated by traditional media and the education system to manufacture public consent and recruit students. Biologists, geographers, doctors, agronomists, and others who speak out against the ideologies promoted in alternative media are then censored, discredited, and excluded from society. There is, however, an ethical approach to managing the complexity of nonlinear systems. It involves a rapid, gradual, or unnecessary adaptation to bifurcations and the emergence of new dissipative structures.

Keywords

determinism, prospective, ideology, media, Overton

Introduction

C'est avec les Lumières du XVIII^e siècle, notamment l'encyclopédie de Diderot et d'Alembert, que la science devient un critère de légitimité politique, une gouvernance éclairée par des savoirs empiriques. Le rôle de la science s'accroît avec les deux guerres mondiales du XX^e siècle. De conseiller, elle devient un enjeu stratégique de puissance. Depuis les années 1970, l'institutionnalisation de la science s'opère dans la gouvernance des systèmes complexes dynamiques et non linéaires telles que l'écologie ou la santé publique. Ces systèmes ne sont pas fixes et évoluent dans le temps sur des périodes parfois très longues, de type historique voire même géologique. Ils posent un défi colossal à la science qui doit abandonner sa méthode expérimentale et ses connaissances empiriques. En effet, la prévision qui était l'apanache de la science, via le déterminisme, est remise en question sur des temps ou des cycles beaucoup plus longs. La biologie, la géographie, les sciences médicales et agronomiques sont particulièrement visées par une approche systémique des objets qu'elles étudient ou dont elles assument des responsabilités dans la gestion. Elles doivent dorénavant tenter d'expliquer plutôt que de prévoir les comportements de ces objets à moyen ou long termes. Par contre, la prédiction, celle propre aux prophètes, retrouve un droit de cité mais n'a pas de base scientifique. Certes, il existe des modèles mathématiques inspirés du déterminisme, mais ceux-ci révèlent d'étonnants comportements comme des bifurcations et du chaos dans une dynamique non linéaire si les comportements des objets sont analysés de manière holistique. Dans les systèmes complexes, le nombre de variables est trop élevés et sont loin d'être tous identifiables. La prédiction remplace alors la prévision, la prospective remplace la science et les "experts" sont souvent en conflit d'intérêt. C'est de cette prospective

dont se saisit la gouvernance en proposant une sorte de "science officielle" et en recourant à l'ingénierie sociale pour la communiquer à la masse de la population.

Les médias traditionnels ou "mainstream" jouent un rôle considérable dans la diffusion de cette "science officielle" défendue par une majorité d'États. Mais c'est avec l'avènement d'internet et les réseaux sociaux, au début du XXI^e siècle que des médias alternatifs imposent une discussion sur des sujets proposés comme "consensuels" tels que l'hypothèse du réchauffement climatique anthropique, la prédiction des pandémies humaines et animales ou l'efficacité des injections médicales d'ARNm qualifiées de "vaccins". Mais ces médias n'ont qu'une influence limitée sur le grand public car il existe le fameux phénomène de la croyance aveugle aux médias traditionnels. Elle s'explique par le manque de temps pour s'informer par des débats quand il en existent, par la facilité de se fondre dans la masse et par un manque d'esprit critique en science dans une large majorité de la population. Le développement de l'idée d'un fameux "consensus" d'une majorité de scientifiques est aussi utilisée et se fait contre l'éthique car il aboutit à "censurer", "exiler" voire "excommunier" les scientifiques dissidents. Une censure de ces derniers est appliquée dans l'enseignement, les cursus universitaires, les revues en ligne ou l'intelligence artificielle. C'est en quelque sorte un retour du procès de Galilée et un triomphe de l'idéologie officielle.

La communication officielle devient ainsi un outil de manipulation de la masse dans les médias traditionnels. L'une des techniques d'ingénierie sociale pour cette manipulation est le glissement de la fenêtre d'Overton pour faire accepter de nouvelles idées qui étaient jugées auparavant inacceptables. L'acte d'officialiser et d'institutionnaliser la science se fait au mépris de l'éthique scientifique car il court-circuite tout débat scientifique.

Il n'est pas étonnant que le rôle des scientifiques devient de plus en plus contestable au sein même de leur communauté. Cela s'étend à l'enseignement et aux agences institutionnalisées comme le GIEC pour le climat ou les agences sanitaires comme l'OMS.

L'objectif qui est poursuivi est d'explicitier le tournant que la science prend en passant du déterminisme classique à l'indéterminisme des systèmes dynamiques et non linéaires. En plus du scepticisme qui lui est propre, la science est victime d'un déni par la gouvernance. Celle-ci cautionne avec la complicité des médias traditionnels une institutionnalisation de la prédiction via la prospective qui n'a pas de fondement scientifique.

Cet article fait d'abord un bref rappel sur l'épistémologie des sciences et leur évolution: du déterminisme classique à la systémique en passant par le scepticisme. Ensuite, une analyse est effectuée de son attitude face à l'imprévisibilité de la dynamique non linéaire de la complexité. Des modèles mathématiques simples sont examinés tels ceux utilisés en biologie et en météorologie. Ils familiarisent à la sensibilité aux conditions initiales, aux bifurcations et au chaos. Un examen de la prospective est aussi abordé. Enfin, on discutera de la fenêtre d'Overton et de la double opportunité pour la gouvernance de se saisir de la "vérité scientifique" aux détriments de son éthique.

Fondements épistémologiques

Un rappel des grands fondements épistémologiques de la science permet de détecter les grandes étapes de son évolution ainsi que les limites qui lui sont imposées.

Le déterminisme classique

Le déterminisme est l'essence même des sciences classiques. Il est basé sur l'expérience qui permet d'établir des relations de causalité entre deux événements. L'expérience acquise fait surgir dans notre pensée l'inférence qui fait que chaque événement est une conséquence de l'existence d'un événement antérieur. Si l'événement A donne systématiquement lieu à l'événement B, on en déduit que A produit B, autrement dit que A est la cause de B.

Ce déterminisme causal inclut, à quelques fluctuations ou approximations près, les théories scientifiques d'Aristote, de Newton, de Laplace, ou encore le positivisme d'Auguste Comte. S'il existe une série d'équations différentielles par rapport au temps des variables x , y , z qui

décrivent leur évolution quantitative, cela suffit à proclamer un caractère déterministe. Les objets et corps de l'univers remplissent un espace absolu comme un entité physique immobile, une scène vide et transparente. Le temps était aussi considéré comme absolu par Newton car quel que soit l'observateur sa mesure reste identique.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein établit par contre qu'un objet peut avoir non seulement une vitesse dans l'espace mais aussi une vitesse dans le temps. S'il se déplace dans l'espace, son déplacement dans le temps diminue proportionnellement! La combinaison de ces deux vitesses dans l'espace-temps est égale à 300.000 km/sec, vitesse de la lumière. En relativité générale l'espace-temps se courbe et se déforme en plus par le champ de gravitation.

Le scepticisme

Selon LECOURT (2002), c'est David Hume (1711-1776) qui signe en quelque sorte la naissance du scepticisme scientifique avec sa formulation de la relation de causalité (induction) entre deux événements. Mais, selon la conclusion sceptique, les causes premières resteront à jamais cachées, à savoir la relation de cause à effet, contrairement au déterminisme d'essence newtonienne. Le scepticisme des Anciens portait sur nos capacités d'accéder à la vérité (caverne de Platon). Le nouveau scepticisme de Hume, celui des Lumières, *"met l'accent sur les limites et les imperfections de notre raison, qui est sujette à des croyances et se révèle soumise à une forme d'accoutumance"*, explique DROIT (2008). Et ce dernier d'ajouter: *"Nous avons des habitudes plus que des certitudes. Nous vivons sur des routines plutôt que sur des connaissances assurées."* Hume réalise ainsi une profonde critique de nos certitudes et même de la "vérité scientifique".

Bertrand Russel (1872-1970), explique LECOURT (op. cit.), garde une position empiriste radicale et poursuit le raisonnement de HUME dans l'interrogation *"un nombre quelconque de cas passés conformes à une loi, si grand soit-il, constitue-t-il une preuve que la loi s'appliquera à l'avenir? Dans la négative, ces prévisions sont seulement probables. Si nous avons en effet l'expérience des futurs passés nous n'avons pas celle des futurs à venir."* Rudolph Carnap (1891-1970) toujours d'après LECOURT, reprend également l'idée que *"le raisonnement inductif doit abandonner toute prétention à établir la vérité d'une proposition et se contenter de lui conférer une certaine probabilité"*.

Pour les probabilités il faut distinguer fondamentalement deux notions très distinctes: la première est dite objective ou "fréquentiste" et se résume au fait du déroulement de cet événement avec une fréquence "p" lorsque les circonstances se reproduisent suffisamment souvent. C'est la notion défendue par Karl Popper (1902-1994) qui considère, selon LECOURT (op.cit.), qu'on ne peut pas tirer d'argument sur la probabilité de cas dont nous n'avons pas l'expérience. C'est le fondement de l'empirisme.

BRICMONT (2012) défend la deuxième notion de probabilité dite "bayésienne" et vue comme subjective: Il *"n'est pas absurde ... d'assigner des probabilités en fonction de notre connaissance [et donc de notre ignorance] à condition de se rappeler que ces probabilités se réfèrent à ce que nous pouvons rationnellement dire (prévoir, anticiper) dans des circonstances données."* C'est grâce à la loi des grands nombres qu'on peut confronter ce type de probabilités aux observations pour les valider ou les réviser par les règles du raisonnement bayésien. Ces dernières *"... nous conduisent à attribuer une probabilité proche de 1 à des événements tels que sur 1000 pièces de monnaie jetées, environ 500 tomberont sur pile."* Popper précise BRICMONT *"n'a jamais admis cette logique probabiliste et inductive, parce qu'elle ne mène qu'à des opinions raisonnables et non à des certitudes"*.

Popper propose un critère de démarcation entre science et pseudo-science. Si pour les positivistes, ce critère de scientificité est basé sur la vérification empirique d'une théorie, sur sa vérification par l'expérience, Popper propose un critère quasi-opposé, à savoir celui de la "falsifiabilité" ou "faillibilité" ou de "réfutabilité". Pour lui, l'induction est un mythe et il est impossible de vérifier l'applicabilité d'une théorie scientifique dans tous les cas. Si l'induction est réfutée, quel est alors selon Popper le cheminement de la découverte scientifique?

Les vraies théories scientifiques ne sont que des hypothèses provisoires, des approximations de la vérité et le demeureront car le jour où elles seront réajustées (faillibilité) ou rejetées (réfutabilité), par des tests expérimentaux négatifs, elles seront remplacées par de nouvelles qui seront à leur tour provisoires. La figure 1 illustre les incertitudes entre induction et déduction. C'est une *épistémologie évolutionniste*. Popper est certainement un sceptique précise VERDANT (1991), "*dans son sens originel et même socratique d'examineur, d'observateur, de scrutateur*". Selon FAGOT-LARGEAUT (2002), Popper "*chargea l'évolution naturelle de décider quelle théorie est viable, c'est-à-dire adaptée aux faits*." La science procède par essais et erreurs, c'est une démarche aventureuse. Dans l'école popperienne, précise FAGOT-LARGEAUT, il n'y a pas d'obligation de cohérence mais bien de liberté, l'histoire des sciences est une révolution permanente. "*La vérité prend soin d'elle-même*", il ne faut pas avoir peur de se tromper, il y a liberté de conjecturer. La science se définit alors comme une recherche de la vérité.

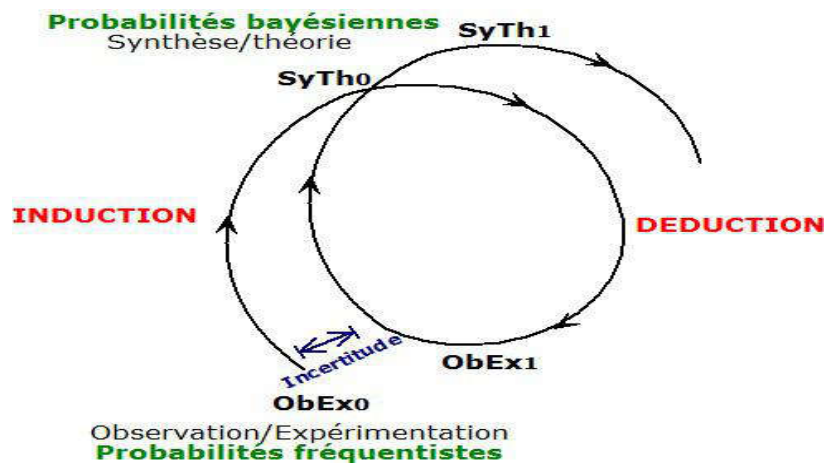


Figure 1: L'incertitude qui règne entre l'induction sur les faits observés et la déduction pour construire une hypothèse ou une théorie.

Systemique

Un système se décrit à la fois comme une structure par l'agencement de ses éléments, corps ou parties et comme un fonctionnement par les échanges et flux de matière, d'énergie et d'information qui se produisent en son sein ou avec son environnement extérieur.

Un système est dynamique si ses états varient avec le temps. Il n'est donc pas fixiste, il peut évoluer en permanence.

La description mathématique d'un système dynamique de "n" éléments peut se réaliser dans un cas simple par une série de "n" équations différentielles simultanées aux "n" variables dynamiques Xi correspondantes, comme indiqué par ANGELIER (2008):

$$\begin{aligned} dX1/dt &= f1(X1, X2, \dots, Xn) \\ dX2/dt &= f2(X1, X2, \dots, Xn) \end{aligned}$$

$$\dots \\ dXn/dt = fn(X1, X2, \dots, Xn)$$

La résolution de ces équations devient très difficile si le nombre de variables "n" est élevé ce qui est le cas d'un système complexe. Il devient alors quasi-impossible de les résoudre si le système est non-linéaire et l'on parle alors d'indéterminisme, d'imprévisibilité ou même de chaos. Les variables dynamiques descriptives d'un tel système (par exemple la position, la vitesse, l'accélération, la pression, etc.) apparaissent dans les équations, ne fût-ce que pour une dérivée première ou seconde, sous une forme différente d'une droite. La clé pour comprendre le chaos tient, selon HILBORN (2006), dans la réconciliation entre le déterminisme et l'aléatoire par cette notion de non-linéarité.

L'interaction est un des grands concepts de l'approche systémique qui la distingue de l'approche scientifique classique. À la simple relation causale d'un élément "a" sur un élément

"b" se substitue une double action de "a" sur "b" et de "b" sur "a" comme l'explique DURAND (1979). Pour illustrer la distinction entre une relation classique de cause à effet et une interaction systémique, on peut prendre l'exemple de la teneur en CO₂ de l'atmosphère et de sa température moyenne globale. L'augmentation de CO₂ est considérée par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) comme l'unique cause d'une augmentation de la température par effet de serre. Mais, par étude paléoclimatique des carottes de glace et dosage du CO₂ atmosphérique qui s'y trouve piégé, il apparaît qu'au sortir de chaque âge glaciaire la teneur en CO₂ de l'atmosphère augmente, mais sans aucune intervention humaine! Le réchauffement provoque réciproquement et naturellement une augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. Cette interaction peut s'expliquer par le dégazage en CO₂ des océans survenant lors d'une élévation de la température, sa solubilité dans l'eau s'en trouvant diminuée. Une forme rétroactive d'interaction (feed-back) peut être de type positive si elle renforce l'action ou négative si elle la déforce. Le principe holistique d'interaction en systémique s'oppose à celui du réductionnisme cartésien. Mais pour le CO₂ il n'est pas établi que le réchauffement post-glaciaire est terminé!

Un système complexe est celui qui contient un grand nombre d'éléments en interaction directe ou indirecte et où se produit des effets non linéaires par émergence de nouvelles propriétés par rapport à celles des éléments ou parties isolées. Les propriétés du tout n'égalent ni ne s'identifient à la somme des propriétés spécifiques des éléments ou parties. Ainsi, par exemple, des cellules comme les milliards de neurones, qui n'ont individuellement aucune propriété cognitive, peuvent s'interconnecter en réseaux dans le système "cerveau" et faire émerger des propriétés de connaissance, de compréhension et de conscience.

Mais un système simple peut aussi être complexe. Ainsi, un corps chimique contenu dans un espace limité est-il un système dont les éléments sont les molécules au niveau microscopique et qui possède des propriétés émergentes au niveau macroscopique. Dans certaines conditions, un tel système simple peut procéder à une auto-organisation de manière complexe par émergence de structures dissipatives. C'est le cas par exemple des cellules de Bénard qui initient une convection dans un liquide chauffé à la base et de l'extérieur. C'est ce qui permet d'affirmer que l'énergie "informe" la matière dans le sens de lui donner une structure. ATLAN (2011): *"C'est une certaine dose de hasard, des perturbations aléatoires – en théorie de l'information, on appelle cela du bruit, en thermodynamique, des fluctuations –, qui introduisent dans ce phénomène d'émergence une nouveauté, imprédictible [imprévisible]"*.

Un système complexe dispose en plus d'une capacité d'adaptation voire d'évolution dans le cas de systèmes biologiques.

Conclusion épistémologique

On observe donc au cours de l'histoire que les fondements de la science s'appuient d'abord sur un déterminisme mathématique avec des objets relativement simples comme ceux de la mécanique. Puis la science s'interroge avec le scepticisme en hissant ses théories aux rangs d'hypothèses. Et enfin, avec des objets comme les systèmes dynamiques, elle se confronte à l'imprévisibilité notamment par des fluctuations ou l'émergence de nouvelles structures. Notons que la spontanéité quantique n'a pas été volontairement examinée.

L'imprévisibilité

La science connaît ici un tournant décisif. Certains scientifiques vont passer de la prévision déterministe, propres aux objets plus simples et non auto-organisés, à de la prospective ou à la prédiction par des modèles mathématiques. D'autres y resteront sceptiques voire reconnaîtront que la science a atteint ses limites en matière de prévisibilité. Ces derniers se limitent alors à expliquer les processus, à mieux définir et comprendre les systèmes non-linéaires ou complexes à défaut d'en prévoir le comportement futur ou leur évolution.

La prospective

Si la prospective "*utilise les résultats de la science et revendique une rationalité*" elle ne peut pas être considérée comme une science mais plutôt comme une "*technique cognitive*" nous dit GAUDIN (2005). C'est un art divinatoire comme le pratiquaient sous forme de transe les pythies de l'oracle de Delphes durant la Grèce antique, les druides, les marabouts, les sorciers ou encore les prophètes. La méthode prospective des scénarios est principalement utilisée. Elle consiste à produire plusieurs récits alternatifs décrivant des évolutions possibles. On trouve fréquemment: le scénario neutre c'est-à-dire ce qui se passerait si on ne faisait rien (*business as usual*), le scénario optimiste et le scénario pessimiste. Si une évolution est trop prévisible, elle devient une "tendance" qui est alors intégrée dans tous les scénarios.

"*La rationalisation scientifique ... s'essoufle vite à essayer de modéliser l'avenir*" et GAUDIN évoque par exemple la modélisation du climat qui "*mobilise depuis les années 1990, quelques-uns des plus gros ordinateurs du monde, avec des résultats encore incertains*". Cette rationalisation butte notamment sur une imprévisibilité intrinsèque, appelée "effet papillon" par la théorie du chaos.

TOLILA (1997) situe lui aussi la prospective hors du cadre de la rationalité scientifique. Il faut laisser la scientificité au vestiaire. L'exercice prospectif doit opérer une sélection de faits significatifs et relève d'un choix d'interprétation sur l'évolution du réel via la méthode des scénarios. Depuis les années 1970 s'opposent deux conceptions: la "prospective-attitude" et la "prospective-science". La première considère la prospective comme un « regard » particulier porté sur le long terme et qui puise en cas de besoin dans les méthodes et les acquis des sciences sociales. La seconde considère la prospective comme une science, une branche des sciences sociales et dans ce dernier cadre de la fonder sur la systémique. Cette dernière a progressé aussi dans les sciences de la nature. Mais le double transfert de la systémique vers les sciences sociales et de celles-ci vers la prospective s'est avéré freiné et même bloqué. TOLILA ne voit la modélisation systémique en prospective sociale qu'au niveau d'une abstraction typiquement philosophique et déconnectée du réel. Il critique aussi l'absence du temps dans la modélisation systémique et évoque ainsi une prospective sans "histoire".

La modélisation

Le modèle correspond à la séquence des réactions qui simule le fonctionnement d'un système. DURAND (op. cit.) souligne l'originalité du modèle systémique par le raisonnement analogique qu'il implique. Cette modélisation se distingue fondamentalement des dichotomies classiques de l'induction et déduction, de la synthèse et de l'analyse. L'analogie est propre à l'enfance ("*c'est comme...*") et à l'art, où le peintre et le poète créent leur œuvre sur un jeu d'analogies et non par une suite de déductions et d'inductions procédant de la logique. Si on conteste à l'analogie toute rigueur scientifique, explique DURAND, "*on doit bien reconnaître qu'elle stimule l'imagination et la découverte grâce à son pouvoir suggestif.*"

Pour ANGELIER (op. cit.), le modèle "*représente à la fois les actions et leurs résultats*", et se construit "*par tâtonnement ou analogie fonctionnelle*", par raisonnement heuristique (visant la découverte des faits) pour obtenir "*des solutions qui sont seulement plausibles, adéquates.*" Il ne s'agit pas de simplifier la réalité pour l'expliquer, mais "*à construire un modèle pour la rendre intelligible, compréhensible.*"

Une mise au point terminologique s'impose encore sur le terme "modélisation". A côté de la modélisation "système" existe également une modélisation "mécaniste" basée sur une formalisation par équations différentielles dynamiques déterministes utilisant des logiciels adaptés. Un exemple en est cité par ANGELIER par les modélisations de Lokta-Volterra en écologie, relatives aux comportements compétitifs entre espèces (relations proie-prédateur) et à la croissance des populations respectives. Les interactions par rétroactions positives ou négatives sont également considérées dans les modèles mécanistes. Mais, comme déjà signalé, les modèles déterministes posent de vrais problèmes pour les systèmes complexes à interactions multiples et à dynamique non-linéaire.

Il existe enfin une modélisation "analogique" utilisée en prospective.

Bifurcations et chaos de modèles déterministes simples

GLEICK (1991) délivre plusieurs messages importants sur une étape cruciale dans la modélisation. Il cite notamment Robert May à propos des bifurcations dans les modèles et l'apparition du chaos. Le biologiste mathématicien May a modélisé la variation annuelle d'une population isolée. La population de l'année suivante " x_{sui} " peut-être calculée aisément par un formalisme simple si elle ne dépend que de celle de l'année en cours " x_{cours} ": $x_{\text{sui}} = F(x_{\text{cours}})$. Il suffit alors de définir une condition initiale pour " x " et puis d'appliquer d'année en année la fonction choisie. On produit alors une itération jusqu'à une stabilisation de la population. La fonction F peut être linéaire, par exemple si chaque année la population s'accroît dans un rapport fixe: $x_{\text{sui}} = rx_{\text{cours}}$ correspondant au schéma malthusien, sans contrainte alimentaire ou morale.

Une autre fonction simple est une modification de la version linéaire malthusienne: $x_{\text{sui}} = rx_{\text{cours}}(1-x_{\text{cours}})$ où le paramètre " r " peut être choisi plus ou moins élevée et où " x " simule la population qui varie de 0 à 1. Le terme nouveau $(1-x_{\text{cours}})$ maintient alors la croissance entre certaines limites, puisque si " x " croît, " $(1-x)$ " décroît jusqu'à atteindre un équilibre où la population reste stable. On peut alors l'exprimer sous forme d'un graphe par itération successive qui en donne l'allure générale. Cette fonction a été appelée "équation logistique". Le paramètre " r " était une caractéristique importante du modèle. Dans les systèmes physiques il correspond à la chaleur dégagée, au frottement. Dans un étang, il peut correspondre à la fécondité des poissons, la tendance à l'explosion démographique et à la surpopulation, ce que l'on appelle le "potentiel biotique".

En jouant sur la valeur du paramètre " r " de l'équation logistique, il est constaté que la courbe se divise en 2 lorsque sa valeur dépasse 3. La population refuse alors de prendre une valeur unique et fluctue régulièrement entre deux courbes une année sur deux, marquant ainsi une première "bifurcation". Si on augmente encore le paramètre " r ", une nouvelle bifurcation s'observe, l'oscillation se scindant à nouveau pour fournir quatre nombres, chacun revenant une fois tous les quatre ans. Si le paramètre " r " continue de croître, le nombre de points double à nouveau et puis encore et encore. Les bifurcations arrivent de plus en plus vite à chaque fois qu'un point critique est atteint: 2, 4, 8, 16, 32 et soudainement les fluctuations disparaissent pour donner place au "chaos", au delà d'un certain point appelé le "point d'accumulation". Cela signifie que la population se distribue ensuite au hasard, toujours entre 0 et 1, sans suivre une ligne définie. Ce comportement est représenté dans la [figure 2](#).

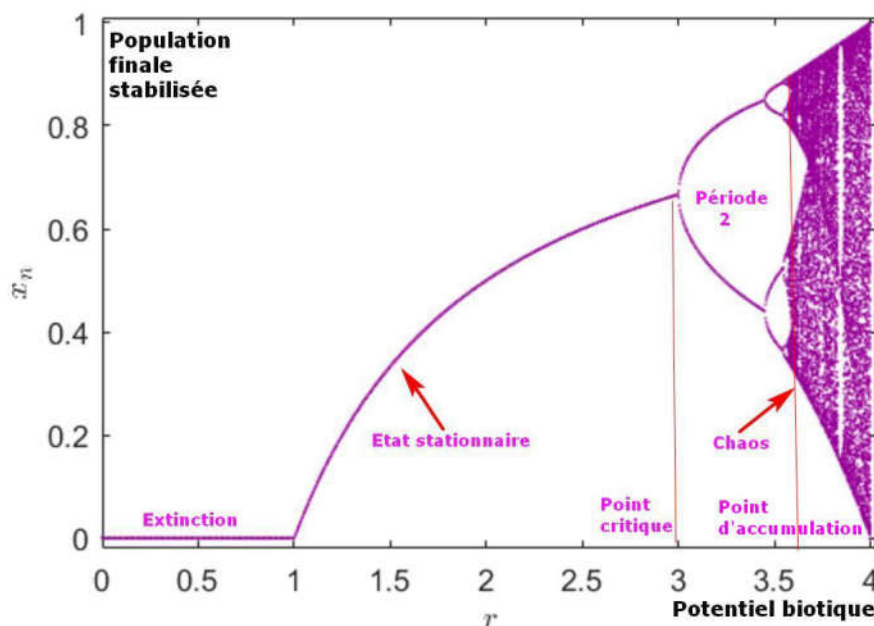


Figure 2: Diagramme de bifurcations et de chaos de l'équation logistique $x_{\text{sui}} = rx(1-x)$.
 En ordonnée, la valeur x_n représente la population finale d'équilibre des itérations successives d'année en année. En abscisse le paramètre " r " définit le "potentiel biotique".
 Source: d'après GLEICK (op. cit.) et SHILONG GAO & BIXIA KAN (2025)

Si l'on continue d'augmenter le paramètre "r", de nouvelles fenêtres d'ordre apparaissent au sein du chaos, de périodes 3 puis des périodes 6, 12, 24, etc.

Au sein de la complexité du chaos, des cycles stables peuvent aussi à nouveau apparaître. De légères modifications du paramètre "r" peuvent donc générer des comportements d'une nature complètement différente. Des modèles déterministes simples peuvent donc engendrer des comportements aléatoires.

L'équation logistique constitue une représentation d'un phénomène discret, discontinu d'un temps à un autre ou d'un lieu à un autre. Par contre, les équations différentielles présentent la réalité comme un continuum uniforme d'un lieu et d'un temps à un autre. Elles constituent un immense développement de l'analyse mathématique. Cependant, la plupart des équations différentielles ne sont pas solubles par une mise sous forme intégrable. Elles doivent se résoudre en y substituant "des approximations linéaires" ou être abordées par des voies détournées, incertaines.

Chaos et espace de phase des équations différentielles

GLEICK (op.cit.) évoque aussi le modèle simplifié du météorologue et mathématicien Edward Lorenz pour simuler le comportement de la convection dans l'atmosphère. Lorenz utilise comme modèle un jeu simple de 3 équations différentielles en x, y et z :

$$\begin{aligned} dx/dt &= \sigma(y-x) \\ dy/dt &= \rho x - y - xz \\ dz/dt &= -\beta z + xy \end{aligned}$$

"x" est proportionnel à l'intensité du mouvement de convection, "y" à la différence de température entre les mouvements ascendant et descendant et "z" caractérise le gradient vertical de température.

Les paramètres sont:

- "σ": nombre de Prandtl (rapport entre la quantité de mouvement et la quantité de chaleur)
- "ρ": rapport entre le nombre de Rayleigh (transfert de chaleur au sein de l'air) et le nombre de Rayleigh critique
- "β": taille typique du système

Les valeurs utilisées par Lorenz lorsqu'il a observé pour la première fois un phénomène chaotique sont les suivantes: $\sigma=10$, $\rho=28$, $\beta=8/3$

Comme conditions initiales on peut prendre par exemple: $x_0=0$; $y_0=1$ et $z_0=1,05$.

Si les conditions initiales sont connues, on peut résoudre numériquement les équations différentielles selon une méthode récursive dite d'Euler, où la solution locale en x_{n+1} est approximée par la tangente au point précédent $x_{n+1} = x_n + \Delta x_n / \Delta t$. La méthode récursive se fait selon un pas temporel constant (Δt) à partir de la condition initiale en x_0 et de même pour y et z. L'approximation est évidemment plus précise si le pas temporel "Δt" est faible, par exemple $\Delta t = 0,01$ secondes, $\Delta x_n / \Delta t$ simule alors la fonction dx/dt . Il s'agit en fait d'une interpolation linéaire par la tangente au point précédent sur un pas de temps très court, ce qui exige l'intervention d'une puissance de calcul propre aux ordinateurs.

Selon cette méthode, et avec des paramètres variables, Lorenz établit que la solution développe une sensibilité très forte aux conditions initiales, ce qui est illustrée dans la [figure 3](#). En effet, de petites erreurs peuvent se révéler catastrophiques et engendrer un chaos dans les solutions. Le terme "chaos" et l'adjectif "chaotique" sont utilisés pour désigner un comportement dans le temps de type apériodique (qui ne se répète jamais) et d'apparence aléatoire ou "bruitée".

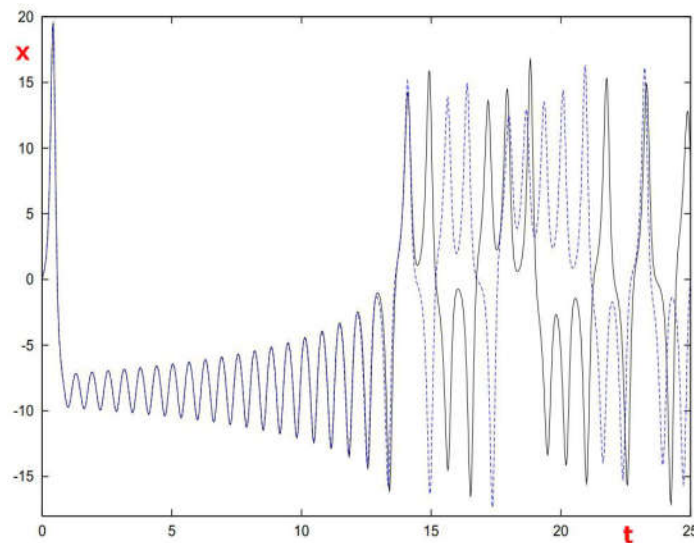


Figure 3: Évolution de "x" dans le temps selon des conditions initiales très proches, non distinguables sur la figure. Deux courbes, l'une en traits pleins noirs, l'autre en traits bleus pointillés, restent indistinctes jusqu'à une valeur proche de 15 où elles divergent alors fortement. Source: ALAVAREZ-SOLAZ (2010)

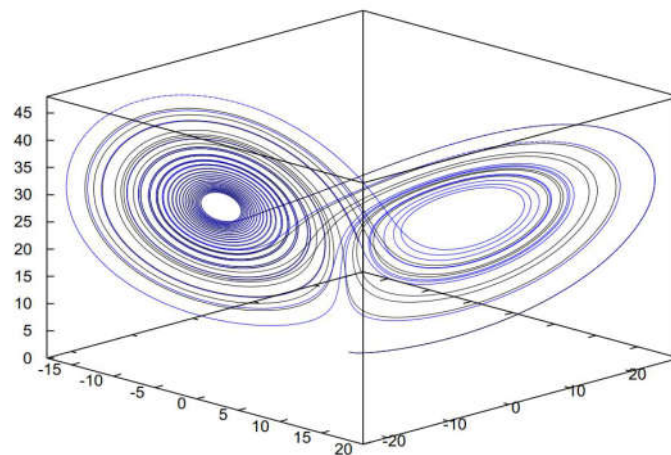


Figure 4: Les attracteurs étranges de Lorenz pour les deux conditions initiales de la figure 3. Source: ALAVAREZ-SOLAZ (op.cit.)

La méthode récursive d'Euler permet de visualiser les solutions locales approximées de ce jeu d'équations dans l'espace de phase, c'est-à-dire un espace abstrait où les trajectoires des solutions sont reproduites. Cet espace permet d'éliminer la variable temporelle dans leur évolution. L'espace de phase selon les trois dimensions x , y et z apparaît dans la [figure 4](#). Elle montre un attracteur étrange, plus connue sous le terme d'effet "papillon". Cet attracteur est évidemment aussi soumis aux conditions initiales. Si les formes des deux attracteurs sont assez ressemblantes, il n'en demeure pas moins que les valeurs des solutions diffèrent très fortement.

Discussion sur l'imprévisibilité

Un virage important est opéré avec la systémique et plus particulièrement en prenant comme objet les systèmes complexes dynamiques et non linéaires. Ces systèmes sont en effet représentatifs de la plupart des objets qui nous entourent dans la réalité: les être vivants, les rivières, les paysages, la météo, le climat, etc., mais leur espace de phase n'est perçu que dans une temporalité souvent beaucoup trop brève. Cela permet de prédire à court terme leur

évolution si leur environnement interne ou externe restent plus ou moins stables. Mais à plus long terme, cette prospective perd toute crédibilité: des variations ou fluctuations internes au système ou externes environnementaux produisent une évolution imprévisible des espèces, de même pour le profil des cours d'eau, la configuration des paysages, les prédictions de la météorologie ou celle de l'évolution d'un climat, etc.

La science classique ou newtonienne se montre effectivement déterministe et peut donc être qualifiée de science exacte. Pour les nommer, il s'agit essentiellement de la Physique et de la Chimie concentrées dans des espaces finis, quasi-fermés, et à très court terme. Par contre, les sciences du vivant et de la terre relèvent de la complexité des systèmes ouverts et se contentent généralement d'expliquer les phénomènes qui animent ou structurent ses objets: c'est le cas de la biologie, de la géographie et des sciences appliquées comme la médecine et les sciences agronomiques qui sont des sciences explicatives. Ces dernières justifient le scepticisme quant à d'éventuelles prévisions surtout si des composants individuels ou sociaux entrent en jeu. Ces sciences explicatives peuvent cependant tirer parti de la modélisation "mécaniste" grâce à la découverte des espaces de phase qui simuleraient toutes les trajectoires possibles. Mais pour cela, il faut identifier les nombreuses variables en cause et formuler les équations différentielles pour modéliser leur dynamique, ce qui est très souvent loin d'être le cas. De plus, leur temporalité nécessite de connaître leur histoire, ce qui peut remonter à très loin dans le passé et peut remonter parfois à des temps géologiques.

Les sciences explicatives des systèmes non-linéaires doivent généralement renoncer au déterminisme qui caractérise l'épistémologie classique. Si on prend en compte le contenu d'un système, il faut tenir compte également des composants de leur environnement extérieur et les deux suivent des trajectoires indépendantes. Il est nécessaire aussi de définir les conditions initiales car la modélisation y est très hautement sensible et produit du chaos, comme l'ont démontré les modèles mathématiques utilisés notamment par Edward Lorenz ou Robert May. Enfin, il faut aussi tenir compte dans ces modèles des paramètres qui caractérisent les équations. Les paramètres internes du système ou externes de leur environnement subissent des variations plus ou moins sensibles durant leur trajectoire. Elles provoquent alors des bifurcations au-delà de points critiques et le chaos au-delà des points d'accumulation.

Quelle est la voie de la sagesse dans la gestion et la décision dans la complexité? GENELOT (2017) fournit quelques points de repères. D'abord, l'ordre de la nature est soumis à des fluctuations et à des choix. Ilya Prigogine insiste sur l'évolution par bifurcations, sur cette présence d'interactions non linéaires (effets boules de neige, propagations épidémiques, différenciation par amplification de petites différences). Les bifurcations issues du hasard font naître de nouveaux états du système et c'est dans le choix que se trouve la responsabilité humaine. Il faut dès lors cultiver nos dispositions à faire des choix souhaitables pour affronter ces bifurcations. Ensuite, la complexité est composée de diversité, d'un enchevêtrement d'interactions. Par la modélisation systémique, la réalité devient une construction pour la prospective, un outil de conception, une méthode de prédiction et non de prévision, pour opérer, travailler, échanger. La prédiction n'a rien de scientifique, c'est une démarche pseudo-scientifique. Le transfert de la prospective s'est opéré dans les sciences sociales, mais celui dans les sciences de la nature a échoué. La modélisation n'est qu'un point de vue sur la réalité, une représentation subjective, contextuelle, incorporée, projective et évolutive. Il s'agit d'établir l'urgence ou non d'une décision c'est-à-dire de distinguer la prospective, qui évoque souvent l'urgence, de la science qui exige un débat contradictoire. Enfin, la contradiction et la dialogique (ordre - désordre, nature - culture, vérité - erreur, bien - mal) ne peuvent être exclues du système car elles sont destructrices et recourent au simplisme. Il y a des équilibres dans la dialogique. Il n'y a pas non de fixité dans les systèmes. La complexité est comme la vie, elle suit des trajectoires. Il faut alors adopter une position "méta": une finalité d'ordre supérieur. Ces repères ont des relents un peu mystiques. Mais l'essentiel réside dans un extrait d'un poème d'Antonio Machado:

*"marcheur, il n'y a pas de chemin,
le chemin se construit en marchant"*

Gouvernance de la complexité

La fenêtre d'Overton

La fenêtre d'Overton est un ensemble de propositions politiques jugées acceptables à un instant donné. Cette fenêtre fluctue car on peut y faire entrer des idées jugées auparavant inacceptables. C'est ce qui est illustré à la [figure 5](#). Les nouvelles idées sont des propositions politiquement acceptables parfois dans un champ proche de la scientificité. La prédiction peut alors se confondre avec la prévision tout comme le prospective avec la science. La fenêtre peut donc s'élargir en utilisant des techniques d'ingénierie sociale comme l'institutionnalisation des nouvelles idées pour favoriser leur légitimation et une communication massive par les médias traditionnels ou "mainstream" pour fabriquer le consentement de la population.

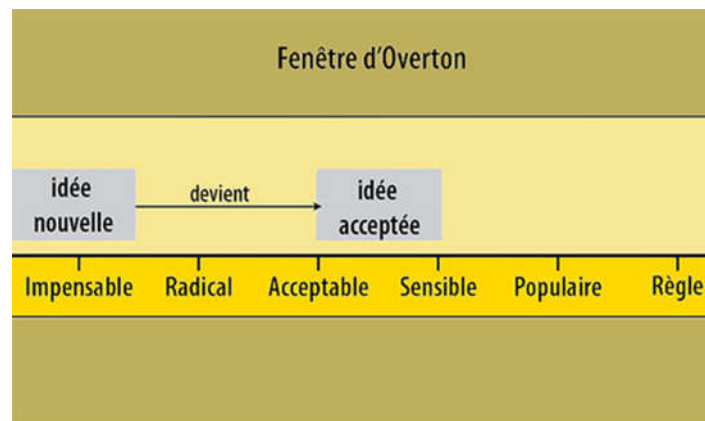


Figure 5: Les fluctuations de la fenêtre d'Overton dans la population

Une double opportunité

Dès les années 1950, les frères Odum considèrent l'écologie comme une synthèse entre les systèmes énergétiques et sociaux (HAGEN, 1992, cités par SÖRLIN et al., 2025). C'est à partir du rapport Meadows (MEADOWS et al., 1972) que l'énergie est devenue un problème fondamental en écologie économique. SÖRLIN et al. (op. cit) souligne l'échec de la conférence de Stockholm en juin 1972, où au lieu d'envisager une gouvernance globale de l'environnement est proclamée la souveraineté nationale absolue sur les ressources naturelles.

ODUM (1994) conçoit les systèmes écologiques avant tout comme un circuit de flux énergétiques. Les humains y sont également compris. Il utilise tout un langage de symboles pour représenter de tel systèmes dont la [figure 6](#) est une illustration reproduite à partir de son livre. On remarque que le nombre de variables potentielles est énorme et qu'elles ne sont pas toujours identifiables. Ensuite, on remarque aussi que l'environnement est considéré à l'extérieur du système. Il concerne les sources d'énergie et de matière ainsi que les systèmes adjacents comme d'autres tribus Maoris.

SÖRLIN et al. (op. cit.) désignent les années 1980 pour identifier l'émergence de l'environnement comme un programme cohérent de recherche scientifique et qu'elles en constituent l'élan épistémologique. C'est la naissance d'une "Science de la Terre" où celle-ci est considérée comme un système dynamique complexe interconnecté dans ses différents cycles de l'énergie, de l'eau, du carbone, de l'azote et des éléments minéraux. Mais, c'est aussi à cette époque que BENSTEIN (2002) situe l'émergence du concept strictement politique du "Développement durable" (DD), expression parfaitement antinomique, pour légitimer la croissance économique dans le contexte de la protection de l'environnement. De nouvelles catégories de gouvernance spatio-temporelles sont ainsi créées parmi lesquelles on peut citer au niveau global: le "Programme International géosphère biosphère (International Geosphere-Biosphere Program)", la "Convention sur la diversité biologique (Convention on Biological

Diversity)", ainsi que le "Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change)". Mais ces catégories concernent aussi de nouvelles complexités pour comprendre l'environnement au niveau global de la planète. Ce niveau est parfaitement sans signification scientifique puisqu'ils globalisent des objets particuliers notamment par des moyennes, mélangeant ainsi "pommes et poires".

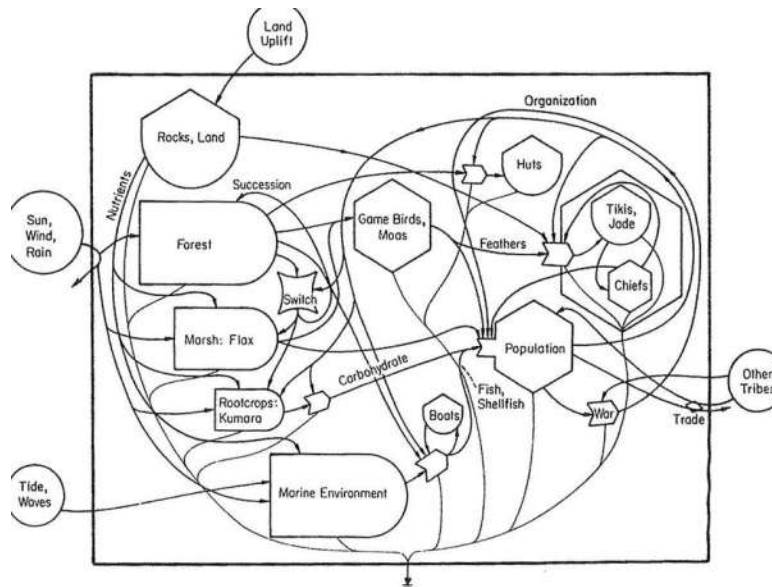


FIGURE 24-5. Early Maori culture in New Zealand (Odum et al., 1981).

Figure 6: Exemple d'un modèle de système cultivé en fonction de l'environnement de ODUM (op. cit.)

Le sommet de la terre à Rio en 1992 a institutionnalisé la protection internationale de l'environnement comme une préoccupation mondiale ou globale la rendant politiquement et médiatiquement légitime mais dont la scientificité est remise en cause par de nombreux scientifiques. L'écologie et l'environnement ont en effet comme objets des systèmes ouverts, complexes et non-linéaires. Les "experts" sont alors choisis par les gouvernants alors qu'ils ne font que de la prospective institutionnalisée.

C'est donc dans ce glissement de la fenêtre d'Overton que la nouvelle idée d'établir des normes ou des limites légales à l'émission ou à l'immission dans des systèmes complexes et non linéaires est légitimée. Une légitimation non par la science mais par le droit et la justice et sous couvert d'une communication et médiatisation massives y compris dans les divertissements comme le cinéma, les séries télévisées et les livres. Il en résulte que les scientifiques intègres sont exclus de tout avis et de tout débat éventuel et qu'ils sont même censurés. Ce glissement de la fenêtre procède à un by-pass de la méthode et de l'éthique scientifique qui préconisent effectivement le débat. Cette glissade fait passer de la prévisibilité à l'imprévisibilité, du déterminisme à l'indéterminisme, de la science à la prospective.

Accaparement politique, juridique et idéologique

C'est donc une opportunité pour la politique de s'accaparer de la gestion environnementale et sanitaire, du fait que la science est dans l'incapacité de prédire l'avenir ou l'évolution de l'environnement et des composants des systèmes complexes en cause, qu'il s'agisse d'organismes vivants et d'humains de la biosphère, ou des rivières, paysages, climats, etc. Malheureusement, la gouvernance est incapable d'improviser ou d'adapter rapidement l'administration généralement très lente de la société aux changements internes ou externes auxquels elle doit faire face. La gouvernance nationale recourt à des fonctionnaires internationaux comme ceux de l'OMS ou de la Commission européenne pour instaurer des politiques de type totalitaire. Ces dernières limitent la liberté des individus et des sociétés.

Il en va ainsi par exemple de la taxe carbone, des restrictions de la mobilité, des déclarations de pandémie, des injections géniques d'ARNm, etc.

Cette délégation des décisions à un niveau international dilue totalement les responsabilités politiques nationales. Elle est aussi une opération pour développer une politique planificatrice de moyen ou long terme. Elle aboutit fondamentalement à utiliser la prospective, c'est-à-dire une forme de prophétie politiquement orientée.

Cet accaparement politique de la complexité est sujet à l'influence de nombreux lobbys et ONG qui vont orienter les scénarios et les thématiques de la prospective envisagée. Ces influences vont de fait conduire au développement de nouvelles idéologies qui vont être inculquées à la population par les médias et aux étudiants par l'enseignement.

C'est dans les années 1980 et 1990, au moment de l'essor du concept de "Développement durable" que les ONG et les lobbys progressent rapidement sur fond de la globalisation. C'est une période durant laquelle les règles deviennent plus nombreuses, quand les partenariats public-privés et les privatisations progressent rapidement. Parmi les grandes ONG internationales on peut citer "Greenpeace", "Médecins sans frontières", "Oxfam international", "Action aid", "WWF", "Amnesty international", etc. Parmi les grands lobbys citons les lobbys pharmaceutiques, agrochimiques, ceux des énergies fossiles ou des énergies renouvelables comme l'éolien ou les panneaux photovoltaïques, etc. Ces ONG et lobbys agissent surtout à Washington et à Bruxelles au siège de l'Union européenne, voire en Suisse au siège de l'OMS. Leur pouvoir est fort quand il s'agit de la santé, de l'énergie, de l'armement, de la transition écologique, du commerce, de l'agriculture.

Ces ONG et lobbys ont une influence politique certaine et concourent au développement des idéologies globales. Ces dernières sont alors légitimées par le droit au niveau de lois ou de normes. Les scientifiques qui ne sont pas d'accord avec ses idéologies ou qui les contestent sont alors censurés dans les médias, voire officiellement désavoués.

Conclusion

La politique recourt à la science dont elle tire une partie de sa légitimité. C'est dans les années 1970 que les scientifiques se confrontent à la systémique qui est la base de la gestion de l'environnement et de la santé publique. Les systèmes naturels concernés sont ouverts et composés des humains et autres organismes vivants, des cours d'eau, des paysages ou des climats. Les flux énergétiques les animent car ils en sont des structures dissipatives. Ils sont dynamiques. Leurs trajectoires dans le temps dépendent de variables ou de paramètres qui sont bien trop nombreux. Ils relèvent de la complexité. Ils fluctuent, évoluent selon une dynamique non linéaire qui peut conduire au chaos mathématique. Ils sont aussi soumis à une forte sensibilité aux conditions initiales. Dans de telles conditions ils ne sont plus déterministes et les sciences naturelles doivent renoncer à en prévoir le comportement futur. Certes, ils permettent de comprendre le comportement passé ou à court terme. Mais ces systèmes sont imprévisibles sur le moyen et long terme.

La politique s'est accaparée de la gestion de l'environnement et de la santé humaine et animale par by-pass des sciences naturelles en se tournant vers la prospective qui elle n'a pas de fondement scientifique. La prospective ignore la méthode expérimentale, ignore les phénomènes d'induction et de déduction et utilise la méthode analogique dans des modèles. La prospective s'est répandue grâce à un glissement de la fenêtre d'Overton sans que le public, les scientifiques parfois aussi et même les gouvernants s'en soient rendus compte. La politique recourt ainsi à des organismes internationaux composés de fonctionnaires et d'organismes experts, ce qui dilue sa responsabilité au niveau national. Ces organismes planifient et sont soumis à une forte influence des lobbys et ONG. Il en résulte un développement d'idéologies transmises par les médias traditionnels pour fabriquer le consentement des populations. Les étudiants sont également touchés par l'enseignement de ces idéologies. Et pendant ce temps, les biologistes, géographes, médecins, agronomes, etc. qui dénoncent leur mises en œuvre dans les médias alternatifs sont censurés, désavoués et exclus de la société.

Il existe cependant une éthique dans la gestion de la complexité de ces systèmes. Elle consiste à une adaptation parfois rapide, parfois progressive, parfois inutile et liberticide aux

bifurcations et à l'émergence de nouvelles structures dissipatives. Mais la gouvernance doit distinguer la prospective et ses idéologies de la science qui prône l'objectivité. Appliquer des recommandations d'organismes internationaux qui ont eu tout le temps de planifier une idéologie pour une société plus liberticide, plus totalitaire, plus globale, est une faute impardonnable de la gouvernance nationale.

Bibliographie

ALAVAREZ-SOLAZ Jorge, 2010, *Changements abrupts et variabilité rapide dans différents contextes climatiques - Une étude basée sur une stratégie de plusieurs modèles*, Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 256 pp.,
<https://www.researchgate.net/publication/319669231> PHD Thesis

ANGELIER Eugène, 2008, *Les sciences de la complexité et le vivant*, Tec & Doc Lavoisier.

ATLAN Henri, 2011, "La science crée les problèmes, mais ne fournit pas les solutions", *Philosophie magazine*, n°50,. <<http://www.philomag.com/les-idees/entretiens/henri-atlan-la-science-cree-les-problemes-mais-ne-fournit-pas-les-solutions>>

BERNSTEIN Steven, 2002, "Liberal environmentalism and global environmental governance", *Global environmental politics*, 2, 3, 1-16,
<https://doi.org/10.1162/152638002320310509>

BRICMONT Jean, 2012, "Déterminisme, chaos et mécanique quantique", in: *Le déterminisme entre sciences et philosophie*, Pascal Charbonnat et François Pépin (dir), 240-266, Ed. Matériologiques

DROIT Roger-Pol, 2008, *Une brève histoire de la philosophie*, Flammarion.

DURAND Daniel, 1979, *La systématique*, PUF, Collection "Que sais-je?".

FAGOT-LARGEAULT, Anne, 2002, "La construction intersubjective de l'objectivité scientifique", *In: Philosophie des Sciences I*, Daniel Andler, Anne Fagot-Largeault & Bertrand Saint-Sermin, Folio essais, Ed. Gallimard..

GAUDIN Thierry, 2005, *La prospective*, PUF, Collection "Que sais-je?"

GENELOT Dominique, 2017, "Responsabilité éthique et épistémique dans l'action en complexité", *Interlettre chemin faisant réseau intelligence de la complexité - MCX-APC*, 83,13p, <https://www.intelligence-complexite.org/fileadmin/docs/edi183.pdf>

GLEICK James, 1991, *La théorie du Chaos - Vers une nouvelle science*, Champs -Flammarion, 431 pp.

HAGEN J.B., 1992, *The Entangled Bank: The Origins of the Ecosystem Ecology*, New Brunswick, NJ: Rutgers University Press.

HILBORN Robert C., 2006, *Chaos and non linear dynamics. An introduction for scientists and engineers*, Oxford university press.

LECOURT Dominique, 2002, *La philosophie des Sciences*, PUF, Collection "Que sais-je?"

MEADOWS, D.H., MEADOWS D.L., RANDERS J. and W.W. BEHRENS III.,1972, *The Limits to Growth*, Washington DC, Potomac Associates – Universe Books

ODUM Howard T.,1994, *Ecological and general systems - An introduction to systems ecology*, Niwot, University Press of Colorado, 644 pp.

SHILONG GAO & BIXIA KAN, 2025, "Chaos of the new multiplicative logistic map", Nature - Scientific reports, 15, 43743, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28695-y>

SÖRLIN Sverker, WARDE Paul, AKERMAN Isobel, HÖGLUND HELLGREN Jasmin, HÖHLER Sabine, ISBERG Erik, PAGLIA Eric, SAMOSÍR Gloria and Thomas HARBØLL SCHRØDER, 2025, "The great dispersal: the fall and rise of global environmental governance", *Ambio*, 54, 1267-1288, doi: 10.1007/s13280-025-02177-x

TOLILA Paul, 1997, "Quand la prospective rêve de science", *Revue Le Banquet*, 10, 221-237, <https://www.futuribles.com/quand-la-prospective-reve-de-science/>

VERDANT André, 1991, *Karl Popper ou la connaissance sans certitude*, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes.
