

« Conjonction des événements » : une intelligible imprévisibilité

Philippe Fleurance

Contribution au séminaire du Comité d'Orientation de la Recherche de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN)

30 septembre 2022

*« Nous publions toujours les résultats de nos réflexions et de nos actions.
Jamais les cheminements, les difficultés, les manières de contourner les obstacles.
Et pourtant, la connaissance de ce parcours serait extrêmement précieuse »¹
(Lagadec, 2015)*

Table des matières

I.	Introduction	3
II.	Un héritage en débats : au-delà de la science « normale » ?.....	6
II.1	Les événements réduits aux variables supposées constitutives et explicatives.....	6
II.2	La question du référentiel temporel des études.....	7
II.2.1	Un temps expérimental séquentiel, discrétisé et figé	8
II.2.2	Une temporalité expérimentale à rebours de la dynamique du « processus - événement »	9
II.3	Des « facteurs » au « processuel » : Conceptualiser l'événement comme un flux, un cours, un processus	9
II.4	Repenser la question de la causalité et du déterminisme méthodologique	10
II.5	Un déplacement des cadres explicatifs « autour » des phénomènes : du contexte, des circonstances, de l'environnement, de l'espace géographique ... à la question de l'habitabilité de l'écosystème Monde	13
II.6	Un monde perçu comme « feuilleté » : Varier les échelles d'intelligibilité, une condition nécessaire à la compréhension des dynamiques événementielles ?	14
III.	Une perspective : la modélisation et la simulation des phénomènes	16
III.1	Modélisation à base d'Automates Cellulaires (AC) et de Systèmes Multi Agents (SMA)	17
III.2	Modélisation à base d'équations différentielles.....	18
III.3	La dimension heuristique de la modélisation : « <i>Modéliser, c'est apprendre</i> ».....	20
IV.	Une réflexion organisationnelle et managériale.....	21

¹ Patrick Lagadec (2015) Le continent des imprévus - Journal de bord des temps chaotiques. Paris : Manitoba/Belles lettres

Résumé

Chacun peut constater au quotidien que dans de nombreuses questions sociétales qui s'imposent à nous actuellement, les événements échappent aux catégories où l'on avait pu les circonscrire pour mieux les nommer, les mesurer et espérer les maîtriser.

Les hypothèses de stabilité, de régularité, de linéarité, de proportionnalité entre la cause et l'effet, soulèvent des doutes quant à leur généralisation et application universelle car des facteurs apparemment insignifiants, peuvent déclencher des changements imprévus et critiques. La survenue de plus en plus fréquente d'évènements dits « naturels » ne cadrant plus avec les grilles d'analyses habituelles, nous conduit à envisager avec perplexité l'infinité de relations qui lient les phénomènes entre eux, la multitude de boucles de rétroaction qui chemin faisant, font évoluer des systèmes que l'on appréhende comme imbriqués, aux limites floues et dont on n'est jamais sûr de balayer toute l'étendue.

C'est pourquoi nous discutons la stratégie de réduction des événements aux variables supposées constitutives et explicatives. En particulier en ce qui concerne i) la question du référentiel temporel des études conventionnelles qui focalisées sur les horizons du court terme rendent les dynamiques longues et les processus cumulatifs lents, silencieux ; ii) la conceptualisation de l'évènement comme un flux, un cours, un processus ... qui permet d'avancer l'idée d'émergence, d'auto-éco-ré-organisation au fil du temps ; iii) la question de la causalité et du déterminisme méthodologique en se demandant si l'on peut clairement déterminer – ou quel a priori permet d'affirmer comme dépendant uniquement d'un facteur – la cause efficiente d'un phénomène dans un système où tout interagit ; iv) la variabilité des échelles d'intelligibilité comme condition nécessaire à la compréhension des dynamiques événementielles.

Si nous ne savons – pouvons – pas anticiper ce que sera notre futur que l'imprévisible traverse, nous pouvons travailler à rendre intelligible ce qui dans nos environnements est déjà du futur et que nous ne « voyons » pas parce que nous n'engageons pas les questionnements ad'hoc. Nous proposons alors un changement paradigmatique de l'étude des phénomènes en faisant référence aux sciences de la complexité. Celles-ci s'attachent notamment à comprendre comment les interdépendances, interactions et rétroactions qui relient les multiples éléments d'un système s'organisent en son sein face à l'environnement et dans le temps. De telle sorte que le système manifeste des qualités particulières que l'on qualifiera d'émergentes et d'imprévisibles. Dans ce cadre, les études font appel aux techniques de modélisation (et de simulation) considérés comme appropriés pour des représentations multiscalaires. Nous évoquons ici i) les modélisations à base d'Automate cellulaire (AC) et de Système Multi Agent (SMA) ; ii) les modélisations à base d'équations différentielles. « Modéliser, c'est apprendre » et nous soulignons la dimension heuristique et artéfactuelle des modélisations.

Au-delà des aspects épistémologique et méthodologique concernant la construction des connaissances, ces argumentations appellent à réfléchir les conditions organisationnelles et managériales qui permettent la prise en compte d'incertitudes irréductibles au sein des pratiques de recherche de l'IRSN.

I. Introduction

Nous vivons une période de transition majeure, d'un « ancien » monde vers un monde « nouveau » (les big data, l'intelligence artificielle, la « singularité », la mondialisation, les questions sociétales et environnementales émergentes, les catastrophes et crises marquantes à l'échelle régionale, continentale, planétaire, ...) qui interroge la nature de la relation que l'on établit entre ce que l'on décrit comme étant « la réalité empirique » et les outils et raisonnements pour la rendre intelligible.

Chacun peut constater au quotidien que les questions du monde actuel bousculent de plus en plus des certitudes qui pouvaient apparaître hier, fondées sur des consensus scientifiques stabilisés². La prédiction analytique qui consiste à s'appuyer sur les informations issues de situations présentes en les confrontant à des situations passées, est souvent prise en défaut. Il semble bien que le réel fait sécession et échappe de plus en plus à la vision réductionniste que peuvent en avoir de nombreux chercheurs. Dans de nombreuses questions sociétales qui s'imposent à nous actuellement, les événements échappent aux catégories où l'on avait pu les circonscrire pour mieux les nommer, les mesurer et espérer les maîtriser.

Pour avancer la nécessité de s'ouvrir à des approches alternatives, il convient de présenter – brièvement – les hypothèses implicites et postulats essentiels du modèle conventionnel en refusant de considérer qu'elles vont de soi. Les hypothèses de stabilité, de régularité, de linéarité, de proportionnalité entre la cause et l'effet, soulèvent des doutes quant à leur généralisation et application universelle³ car des facteurs apparemment insignifiants peuvent déclencher des changements imprévus et critiques. Les événements qui en résultent manifestent des phénomènes émergents non visibles à l'analyse d'équilibre, caractéristique des systèmes « fermés » bien délimités et isolés de toute influence extérieure. La survenue de plus en plus fréquente d'évènements dits « naturels » ne cadrant plus avec les grilles d'analyses habituelles, nous conduit à envisager avec perplexité l'infinité de relations qui lient les phénomènes entre eux, la multitude de boucles de rétroaction qui chemin faisant, font évoluer des systèmes que l'on appréhende comme imbriqués, aux limites floues et dont on n'est jamais sûr de balayer toute l'étendue.

La modélisation simplifiée présentée par Peter Bak⁴ illustre ceci. En ajoutant régulièrement des grains à un tas de sable, petit à petit le sable forme un amas dont la pente en augmentant

² Ilya Prigogine (1996). La fin des certitudes. Paris : Odile Jacob « ... loin de l'équilibre, se produisent des phénomènes ordonnés qui n'existent pas près de l'équilibre. Le non-équilibre, ce ne sont pas du tout les tasses qui se cassent ; le non-équilibre, c'est la voie la plus extraordinaire que la nature ait inventée pour coordonner les phénomènes, pour rendre possibles des phénomènes complexes. Donc, loin d'être simplement un effet du hasard, les phénomènes de non-équilibre sont notre accès vers la complexité. Et des concepts comme l'auto-organisation loin de l'équilibre, ou de structure dissipative, sont aujourd'hui des lieux communs qui sont appliqués dans des domaines nombreux, non seulement de la physique, mais de la sociologie, de l'économie, et jusqu'à l'anthropologie et la linguistique. »

³ Ces hypothèses représentent une faible partie explicative du réel par rapport à la non-linéarité : par exemple, les effets de seuil, de masse critique, de bifurcations illustrent à contrario, la non-proportionnalité entre les causes et les effets.

⁴ Les systèmes dynamiques subissent des bifurcations, où un petit changement dans un paramètre du système conduit à un changement important et qualitatif du comportement du système. La théorie de « l'auto-organisation critique » explique que certains systèmes, composés d'un nombre important d'éléments en interaction dynamique, évoluent brutalement vers un état critique, sans intervention extérieure et sans

lentement, amène le tas de sable vers un état critique. A un certain stade, la pente des flancs atteint la limite où le poids des grains équilibre les forces de friction. Dès cet angle maximum atteint, l'ajout d'un grain peut alors provoquer une avalanche de différentes amplitudes. L'état critique auto-organisé d'un système est un état où le système est globalement métastable tout en étant localement instable : ce qui caractérise les systèmes auto-organisés, c'est l'émergence et le maintien d'un ordre global sans qu'il y ait un chef d'orchestre, ni de « dernière instance », mais des interdépendances multiples et des interactions itérées entre composants. Il n'y a pas de principe d'ordre supérieur mais comme le propose Henri Atlan⁵ un principe « d'ordre par le bruit ». Ces perspectives issues des modélisations des systèmes⁶ complexes offrent un autre point de vue prenant en compte les processus critiques non-linéaires faits de ruptures et de bifurcations.

Métaphoriquement, on peut se demander quel(s) « grain de sable » perturbera nos écosystèmes « anthro-socio-éco-techniques » et conduira à leur réorganisation ?

La réponse à cette interrogation n'est pas procédurale, paramétrique et incrémentale « plus de ... moins de ... pour mieux de ... » venant conforter l'hypothèse ontologique d'un existant structuré « déjà là » qu'il faudrait améliorer. C'est la manière de penser et d'agir en tant que telle qui se trouve remise en question en forçant à revoir sur le fond, ses attendus et ses enracinements. « *Chercher seulement un remède technique à chaque problème environnemental qui surgit, c'est isoler des choses qui sont entrelacées dans la réalité, et c'est se cacher les vraies et plus profondes questions du système mondial*⁷ ». La science est souvent associée à l'idée de raison, de preuve, de prévisibilité voire de vérité et d'universalité mais cela ne saurait aujourd'hui représenter adéquatement l'état des savoirs et des recherches. Il nous semble alors nécessaire de s'interroger sur les régimes de rationalité qui nous organisent dans le cadre de référence conventionnel (i.e. pour faire rapide « positiviste ») afin de les reconsidérer et prendre acte des limites des connaissances dans les schémas épistémiques dominants.

Ce changement paradigmatique comporte plusieurs courants que l'on peut regrouper sous la bannière des sciences de la complexité⁸. Celles-ci s'attachent notamment à comprendre

paramètre de contrôle. L'amplification d'une petite fluctuation interne peut mener à un état critique et provoquer une réaction en chaîne menant à une catastrophe (au sens de changement de comportement d'un système). L'auto-organisation critique suit la loi selon laquelle la taille d'un événement est inversement proportionnelle à sa fréquence. Par exemple, dans la simulation du tas de sable, l'importance des avalanches de sable est inversement liée à leur fréquence. Il y a peu d'avalanches de grande taille et beaucoup de petites. Bak P. 1996, *How Nature Works -The science of self-organized criticality*, Springer Verlag cf. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00391570/document>

⁵ Henri Atlan. *Entre le cristal et la fumée : Essai sur l'organisation du vivant*, 1979. Paris : Seuil. https://www.persee.fr/docAsPDF/comm_0588-8018_1972_num_18_1_1256.pdf

⁶ Pour Le Moigne, l'approche par les systèmes doit rompre avec l'épistémologie néopositiviste : ce qui est exprimé sous le qualificatif « systémique » n'est pas une propriété intrinsèque de l'objet étudié, mais le produit d'une représentation pragmatiquement utilisable pour l'action. La théorie des systèmes complexes dont on a besoin est une sorte de « méta-modèle », entendu comme outil de modélisation renvoyant au projet du modélisateur face à la réalité qu'il étudie (Le Moigne 1994, 1995).

⁷ François, 2015 : paragraphie 111 In : *L'éthique écologique et la pensée systémique du Pape François*. Fritjof Capra. <http://agora.gc.ca/documents/lethique-ecologique-et-la-pensee-systemique-du-pape-francois>

⁸ Castellani, B., Hafferty, F. W. (2009). *Sociology and complexity science. A new field of inquiry*. Berlin Springer Series Understanding Complex Systems

comment les interdépendances, interactions et rétroactions qui relient les éléments d'un système s'organisent en son sein, face à l'environnement et dans le temps. De telle sorte que le système manifeste des qualités particulières que l'on qualifiera d'émergentes et imprévisibles. Quelles que soient les disciplines considérées, l'imprévisibilité⁹ devient alors une question trop importante pour que l'on n'en fasse pas un sujet majeur pour repenser la construction savante de nos connaissances. En prêtant attention au caractère hybride des problèmes, aux événements imprévus, aux mouvances des contextes, aux régulations distribuées, aux discontinuités, aux temporalités étendues et multiples, aux causalités hétérogènes, aux phénomènes de singularité, de désordre, ... contre lesquels les sciences se sont en grande partie construites.

Si nous ne savons – pouvons – pas anticiper ce que sera notre futur que l'imprévisible traverse, nous pouvons travailler à rendre intelligible ce qui dans nos environnements est déjà du futur et que nous ne « voyons » pas parce que nous n'engageons pas les questionnements ad'hoc. La question ne nous apparaît plus de nature programmatique consistant à améliorer les modèles existants, elle est bien de nature paradigmatique : « *Le mythe invétéré de la rupture nous voile les transitions silencieuses qui préparent le basculement qui en est la manifestation bruyante*¹⁰ ». Mettre en avant l'imprévisibilité devient alors un défi à l'orthodoxie scientifique et interroge les pratiques de recherche sur plusieurs questions que nous nous proposons d'examiner.

Le débat ouvert ici ne consiste pas à dire que les choses ne sont pas bien comme elles sont. Il consiste à examiner sur quels types d'évidence, de familiarités, de mode de pensées reposent les pratiques de recherche que l'on accepte communément. L'objectif n'est donc pas d'engager des débats philosophiques sur la science d'aujourd'hui et les discussions paradigmatiques qui l'animent¹¹. Plus concrètement, il s'agit d'identifier quelques questions

⁹ Incertitude ? Imprévisibilités ? Le GIEC (glossaire 2006) présente l'incertitude comme « *Absence de connaissance de la valeur vraie d'une variable qui peut être décrite comme une courbe de densité de probabilité caractérisant la plage et la vraisemblance des valeurs possibles. L'incertitude dépend de l'état des connaissances de l'analyste, de la qualité et de la quantité de données applicables ainsi que de la connaissance des processus sous-jacents et des méthodes d'inférence* ». Cependant, ce n'est pas parce que le monde de demain est présenté comme produit par celui d'aujourd'hui que les événements de demain peuvent être prévus dès lors que l'on étudie les paramètres qui organisent le monde d'aujourd'hui. A quelque niveau que ce soit, cette relation reste asymétrique. On ne peut déduire d'une connaissance, aussi complète soit-elle, des conditions de production d'un événement, l'événement réel qui va survenir, et d'ailleurs cette connaissance ne peut jamais être complète. Tout événement futur reste contingent, il peut être ou ne pas être, se produire ou ne pas se produire, et nulle connaissance du monde ne peut lever cette contingence (Pierre Favre Chapitre 2. L'imprévisibilité du monde futur dans les sciences de la nature et dans les sciences sociales <https://www.cairn.info/Comprendre-le-monde-pour-le-changer--9782724609707-page-147.htm#:~:text=On%20ne%20doit%20pas%20suivre,il%2C%20de%20conditions%20de%20production>).

L'imprévisibilité devient une réalité dès lors que l'on est incapable de prévoir le moment, le lieu, l'intensité, les circonstances de l'émergence de l'événement. Cependant et en dépit de cela, les collectivités conçoivent souvent leurs stratégies de gestion des risques à la suite de catastrophes qui se sont déjà produites, au lieu de tenter de penser les nouvelles et potentielles catastrophes à venir (cf. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04917-5>).

¹⁰ François Jullien (2009) Les transformations silencieuses. Chantiers 1. Paris : Grasset. https://www.lemonde.fr/livres/article/2009/04/02/les-transformations-silencieuses-de-francois-jullien_1175613_3260.html

¹¹ L'important – ici – n'est pas de discuter les croyances sur la façon dont le monde est fait, mais de considérer les attitudes et pratiques d'intelligibilités vis-à-vis de ce monde.

posées à l'activité de recherche lorsqu'elle se situe à l'interface des milieux de recherche et des réalités quotidiennes vécues par les acteurs concernés par ces recherches et par lesquelles celles-ci trouvent une part de leur légitimité¹². L'interdépendance des enjeux implique des solutions systémiques correspondantes, c'est-à-dire qui ne résolvent aucun problème pris isolément, mais les abordent dans le contexte des autres problèmes qui leurs sont associés. A quoi ressemblerait les démarches de production de connaissance si nous allions au-delà des hypothèses habituelles ?

II. Un héritage en débats : au-delà de la science « normale »¹³ ?

Où l'on présente cette idée étonnante que le développement des connaissances – analytiques – peut conduire à une ignorance qui rend opaques les réalités les plus dramatiques que nous vivons. Il n'est pas superflu d'insister sur le fait que « tout est lié » et que dans ce cas, les connaissances fragmentaires peuvent devenir une forme d'ignorance si elles ne s'intègrent pas dans un cadre plus large permettant des formes de cumulativité¹⁴ de résultats parcellaires.

II.1 Les événements réduits aux variables supposées constitutives et explicatives

L'étude d'un événement perçu comme complexe peut se concevoir de plusieurs manières. L'une consiste à effectuer une partition en composants élémentaires selon la méthode analytique cartésienne habituelle¹⁵. Cette vision scientifique¹⁶ du monde s'appuie sur une métaphore mécaniste newtonienne - cartésienne, où celui-ci apparaît comme fondamentalement objectif, rationnel, linéaire, déterministe et ordonné à l'instar d'une machine. Cette vision mécaniste réductrice et disjonctive met l'accent sur la certitude, l'ordre, la prévision et le contrôle.

La création des phénomènes est la clef de voute de la théorisation : la modélisation analytique isole les éléments d'un ensemble, insiste sur leur nature, joue sur la modification d'une seule variable (les autres étant maintenues constantes), n'intègre pas la durée et l'irréversibilité des phénomènes, valide les faits par expérimentation répétitive, et manifeste son efficacité lorsque les interactions sont linéaires et faibles. Nous avons été formés à compartimenter les domaines d'étude et à apporter des solutions optimales à chaque parcelle de phénomène dûment isolée. Si la pertinence des savoirs que nous construisons et enseignons apparaît discutable aujourd'hui, peut-être faut-il en chercher une des causes dans l'abus des

¹² Comme elle le revendique dans de nombreux établissements dont les activités sont finalisées par un « objet social »

¹³ Funtowicz Sylvio O. & Jerome R. Ravetz (1993), « Science for the Post-Normal Age », *Futures*, 25 (7), p. 739-755. – Funtowicz, S. & Ravetz, J. (2008) *Post-Normal Science*. In: *Encyclopedia of Earth*. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). http://www.eoearth.org/article/Post-Normal_Science

¹⁴ Denise Pumain, « Cumulativité des connaissances », *Revue européenne des sciences sociales*, XLIII-131 - 2005, 5-12. <https://journals.openedition.org/ress/357>

¹⁵ « Il y a une différence entre la réduction effectuée ex post, après avoir construit l'ensemble à partir duquel la réduction est effectuée, et une réduction effectuée par une hypothèse immédiate sans référence à un ensemble construit précédemment ». Delorme, R., 2010, *Deep complexity and the social sciences: Experience, modelling and operationality*, Edward Elgar, Cheltenham.

¹⁶ Catherine Allamel-Raffin, Jean-Luc Gangloff, Yves Gingras (2022). *L'expérimentation dans les sciences*. Editions Matériologiques. Collection : *Épistémologie comparée* <https://www.cairn-sciences.info/experimentation-dans-les-sciences--9782373613469-page-7.htm>

généralisations¹⁷ et l'insatisfaction face à des paradigmes scientifiques utilisant des catégories d'analyse et des agrégats massifs : « le ... », « les effets sur ... », « les hommes », « les femmes », « les classes moyennes », ... conduisant à l'homogénéisation du phénomène soumis à la détermination causale et ceci, hors d'une modélisation fixant les conditions de vérification des hypothèses et les limites de l'explication (par exemple, la part de la variance expliquée).

Pour la science positiviste conventionnelle, « l'observation – expérimentation » s'est vue conférer une fonction épistémologique centrale dans le développement de la science moderne, celle de fondement de la connaissance scientifique. C'est depuis le siècle des Lumières qui a marqué l'abandon des croyances au profit de la raison, le critère de toute démarche scientifique. Elle cherche dans ses protocoles expérimentaux et par ses méthodes – hors du temps et hors du monde – à neutraliser la singularité irréductible des « sujets » d'étude. De nombreux textes en sciences en ce centrant exclusivement sur les notions de moyenne, de représentativité, d'échantillon, de loi des grands nombres, de corrélation, de causalité à effet unidirectionnel, de régularités affichent une indifférence aux singularités, aux temporalités, aux récursivités, aux instabilités, aux bifurcations, aux niveaux d'échelles et aux processus d'usages contextuels des savoirs. Cette stratégie d'intelligibilité a produit et produit encore des connaissances, mais elle s'avère restrictive et souvent irréaliste : les nombreux liens d'interdépendance entre sous-parties limitent considérablement l'approche réductionniste de la science traditionnelle.

II.2 La question du référentiel temporel des études

Les études conventionnelles focalisées sur les horizons du court terme rendent les dynamiques longues et les processus cumulatifs lents, silencieux car situés hors champs. Ceux-ci peuvent alors se manifester bruyamment lorsque des seuils sont atteints et manifester violemment des phénomènes extrêmes¹⁸. Dans cette perspective, cette ligne de temps n'est pas strictement assimilable au temps calendaire que nous utilisons usuellement pour contrôler le temps qui passe. Cette « émergence temporelle observable » est en relation avec les phénomènes et est soumise aux effets qu'ils peuvent produire chemin faisant.

Le temps perçu comme complexe¹⁹ permet de décrire les processus dans des systèmes complexes (biologiques, sociaux, écosystémiques, technologiques, ...) qui fonctionnent simultanément à plusieurs et différentes échelles. Ces donneurs de temps socio-écologiques, qui mêlent à la fois les donneurs de temps naturels et les donneurs de temps sociaux peuvent cumuler leurs effets pour accélérer un processus ou au contraire s'annuler ou se contredire pour freiner un processus en cours.

¹⁷ La régularité des patterns observés dans de nombreux systèmes semble plus due à des régularités statistiques liées à la loi des grands nombres qu'à la répétition d'un processus universel générant à chaque fois le même pattern.

¹⁸ Représentés par exemple, par l'instrument pédagogique dit « machine de Zeeman ». Zeeman E. C. Selected papers. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1977. http://l.d.v.dujardin.pagesperso-orange.fr/ct/fr_cusp.html

¹⁹ Cf. les groupes de travail du Santa Fe Institute : <https://www.santafe.edu/engage/learn/programs>

La temporalité est une caractéristique dynamique que l'on explore sous des angles extrêmement différents comme la synchronie, la diachronie, l'enchevêtrement, les aspects cycliques, les rythmes et leurs changements, les analyses de trajectoires²⁰ ... Fréquemment, l'analyse temporelle se résume le plus souvent à l'étude de séries chronologiques continues (mais des mesures peuvent être faites à des instants irrégulièrement espacés selon les possibilités d'accès aux données) telles que le propose le GIEC²¹.

Nous souhaitons – dans cette partie – mettre en balance i) la temporalité propre au régime de production de connaissance basée sur l'analytique expérimental et ii) la temporalité propre au régime de production de connaissance basée sur le processuel concernant les temporalités propres aux « processus - événement²² » – et ceci, en s'interrogeant sur les hypothèses que ces approches manifestent vis-à-vis de la temporalité.

II.2.1 Un temps expérimental séquentiel, discrétisé et figé

Notre culture scientifique, nos règles méthodologiques sont tout entières marquées par les hypothèses fondamentales d'indépendance des causes, de durée limitée des phénomènes, de stabilité générale des contextes. Les études traitent généralement de temporalités brèves – sans itération – et reposent sur un concept de temps continu, homogène, où les déterminations temporelles exprimées se réduisent aux temporalités communes (passé, présent, futur) et à ses formes régulières de séquentialité. Le temps mis en scène par l'approche expérimentale n'est pas le « temps-vrai » du « processus-événement », i.e. la temporalité au sein de laquelle se déroule la rencontre effective d'un système et de son environnement. La causalité, le principe d'engendrement d'une chose par une autre s'envisage généralement par la constatation d'une différence entre deux états successifs selon un référentiel de temps commun.

L'hypothèse princeps de la pratique expérimentale – implicitement admise – est de considérer que dans un protocole les essais (et/ou sessions) sont indépendants entre eux, i.e. que le résultat de n'importe quel essai ne doit pas affecter le résultat des essais suivants. La temporalité considérée comme pertinente est alors purement interne à l'essai expérimental et la temporalité externe du temps de « processus-événement » est par définition, considérée comme non pertinente, de façon à se conformer aux conditions d'équivalence stricte des essais expérimentaux « toutes choses étant égales par ailleurs ».

²⁰ Nous argumentons ici l'usage de raisonnements contrefactuels en histoire : Remonter le cours des événements ? Dans quelle mesure le présent est-il préfiguré par le passé ? D'où cela vient-il ? Qu'y avait-il auparavant ? Pourquoi en est-on arrivé à ce point ? Cf. Jean-Baptiste Fressoz & Fabien Locher, Les Révoltes du ciel. Une histoire du changement climatique XVe-XXe siècle, Seuil 2020.

²¹ Le rapport du GIEC en 18 graphiques : <https://www.lemonde.fr/blocfg/huet/2021/08/09/le-rapport-du-giec-en-18-graphiques>

²² Nous adoptons l'expression « processus-événement » pour ne pas réifier l'événement en une « chose stable » mais valoriser l'action process. Ce changement de regard appelle une forme d'expression régénérée fondatrice de la pensée exprimant la complexité cf. https://www.intelligence-complexite.org/media/document/conseil_scient/problematiser-faire-constat-incompletude-mots-usuels-appelle-forme

Les limites de ces études ponctuelles (« one shot ») et/ou effectuées lors de fenêtres temporelles choisies plus ou moins arbitrairement, viennent de la tentative d'expliquer la dynamique et la stabilité relative de l'état d'un système à un temps (t).

II.2.2 Une temporalité expérimentale à rebours de la dynamique du « processus - événement »

En avançant que les domaines dont il est question sont dynamiques – i.e. se transforment au fil du temps de manière endogène et/ou exogène – et du fait de ces transformations continues, peuvent devenir instables et prendre des configurations transitoires différentes on constate que les discours sur la temporalité sont étrangement absents des réflexions concernant la modélisation analytique. Dans ce temps neutre, les phénomènes y apparaissent réversibles : ce discutabile principe de symétrie postule qu'une cause inverse à la précédente provoquera toujours le retour à l'état initial. Mais le temps du vivant est irréversible car il est changement de structure : « *L'irréversibilité ne peut plus être attribuée à une simple apparence qui disparaîtrait si nous accédions à une connaissance parfaite* » nous dit la thermodynamique du non-équilibre de Prigogine²³. Il semble bien que ce soit la temporalité introduite dans les conceptions de la dynamique des systèmes complexes adaptatifs²⁴ qui marque le plus sûrement et le plus profondément la rupture avec cette perspective²⁵.

Nous pouvons avancer l'hypothèse que les configurations de l'évènement dérivent d'un processus autoréférentiel consistant à produire les éléments qui sont nécessaires à leurs propres productions²⁶. L'activité s'in-forme i.e. que « l'activité/flux » fait émerger « agents de l'interaction » fait émerger « situation/état transitoire » fait émerger « activité/flux ».

II.3 Des « facteurs » au « processuel » : Conceptualiser l'évènement comme un flux, un cours, un processus ...

« *Tu ne peux pas descendre deux fois dans le même fleuve car de nouvelles eaux coulent toujours sur toi*²⁷ » : Cette assertion est issue de la philosophie d'Héraclite qui pense le monde comme mouvement et changement perpétuel. Malgré les apparences, rien ne demeure identique tout se défait et se (re)fait constamment et ceci, conduit à analyser des cours d'activité ininterrompus, des processus, de type « flux » et non des espaces - temps délimités

²³ Op. cit.

²⁴ Holland, J. (1996) Hidden order: how adaptation builds complexity. Perseus Books : Cambridge (Mass) « *Un système complexe adaptatif est un système complexe ayant la capacité de s'adapter aux changements de l'environnement. Ces systèmes ayant comme caractéristique principale l'auto-organisation et le contrôle distribué. Les agents interagissent selon les règles de comportement et s'adaptent en changeant leurs règles de comportement. L'expérience des agents est exploitée pour déterminer le comportement futur* ». https://wikipedia.net/fr/Complex_adaptive_system

²⁵ Notons ici que si activité-flux = processus faisant émerger phénomène et situation, cela signifie que le phénomène et la situation sont le produit de l'activité-flux et de ce point de vue n'existe pas « en soi ». Dans les théories dynamiques des systèmes complexes, l'unité fondamentale de l'intelligibilité est un processus : c'est par rapport au processus que les « phénomènes » sont définis, en tant qu'éléments agissants dans ce processus.

²⁶ Notre référence « analogique » est ici la théorisation de l'énaction et de l'autopoïèse de Francisco Varela et d'Humberto. Cf. Maturana. F. G. Varela et F., H. Maturana, et R. Uribe, Autopoiesis : The organization of living systems, its characterization and a model, BioSystems, Vol. 5 (1974),

²⁷ Gustavo Fernández Pérez : Nietzsche and Morin on Heraclitus (thinking about and inhabiting contradiction). *Gazeta de Antropología*, 2022, 38 (2), artículo 11 <http://www.gazeta-antropologia.es/?p=5699>

de façon extrinsèque, par l'observateur. Ne plus penser « objet » (de quoi cela est fait ?) mais « processus » (ce que cela fait ?). Nous sommes alors amenés à observer des flux et de plus, souvent changeants car il est impossible d'arrêter les phénomènes pour voir comment ils fonctionnent, ou bien observer l'effet produit sur tel ou tel paramètre. Comprendre un processus, c'est alors explorer – voire modéliser – son développement temporel, c'est-à-dire analyser comment les ingrédients et leurs assemblages évoluent et se recombinaient au cours du temps pour produire des configurations particulières.

La singularité des événements apparaît inévitablement lorsqu'on est attentif aux enchaînements particuliers de situations, d'initiatives et d'occurrences qui donnent naissance à des configurations historiques particulières. Cette idée d'émergence, d'auto-éco-réorganisation au fil du temps revient à établir une forme de « causalité historique » complexe dans laquelle chaque séquence influe sur la configuration qui sera à l'œuvre dans la séquence suivante à travers les traces de toutes sortes qu'elle laisse dans l'environnement²⁸. Si bien que l'évènement observé à un temps (t) peut être rattaché à tout un faisceau de séquences d'action imbriquées plutôt qu'à une seule cause et rend impossible l'identification de chaînes discrètes de causalité. Nous n'avons plus affaire à tel ou tel (dys)fonctionnement bien spécifique et repérable, mais à des chaînes hybrides de (dys)fonctionnements comme on le décrit par exemple, dans les événements climatiques actuels²⁹. Ceci reconnaît, de manière explicite, un processus impliquant des changements au fil du temps, en différenciant les conséquences immédiates, des conséquences à long terme.

La chronologie des événements a donc des effets cruciaux sur leurs conséquences : tout changement dans les séquences antérieures peut affecter la configuration finale. L'idée que l'ordre dans lequel les événements se produisent, contribue à la forme finale est directement reliée à la propriété « d'effet de sentier³⁰ » – ou de chemin parcouru – qui avance l'idée d'un processus de développement ni unique ni linéaire, mais au contraire multiple et malléable. Cette idée d'émergence, d'auto-éco-réorganisation au fil du temps suppose que les conséquences peuvent subsister alors que les causes ont disparu, ou encore, dit autrement, les causes du maintien d'une configuration ne sont pas nécessairement de la même nature que celles de son établissement.

II.4 Repenser la question de la causalité et du déterminisme méthodologique

Dans le cadre scientifique classique, la causalité est la manière de comprendre le déterminisme présent dans le monde. Ainsi le raisonnement causaliste est indissociable de la méthode expérimentale dans les sciences. Le déterminisme est l'une des croyances les plus profondes à la base de l'action et de la connaissance humaine. De postulats métaphysiques

²⁸ « Ainsi donc, pour concevoir toute organisation active, toute machine naturelle, il faut coupler de façon centrale les idées d'équilibre et de déséquilibre, de stabilité et d'instabilité, de dynamisme et de constance ; mais ce couplage doit être conçu comme bouclage, c'est-à-dire comme une relation récursive entre ces termes formant circuit, où ce qui est généré génère à son tour ce qui le génère. » E. Morin (La Méthode T 1, p.190)

²⁹ Rial, J., R. Pielke, M. Beniston, M. Claussen, J. Canadell, P. Cox, H. Held, N. de Noblet-Ducoudre, R.G. Prinn, J. Reynolds et J. Salas (2004) : Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the earth's climate system. Climatic Change volume 65, pages 11–38.

<https://link.springer.com/article/10.1023/B:CLIM.0000037493.89489.3f>

³⁰ Arthur, W. B., Ermoliev, Y. & Kaniovsky, Y. M. (1987). Path Dependent Processes and the Emergence of Macro-Structure, European Journal of Operation Research, 1, 294-303.

hérités des théologies, il s'est transformé au fil du temps pour devenir le concept méthodologique de déterminisme scientifique causal : « *Nous devons donc envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux*³¹ ». L'hypothèse dominante était que la nature suit des règles simples et faciles à comprendre comme une horloge mécanique entraînée par des engrenages imbriqués. Ce qui signifie qu'en ayant une connaissance de tous les éléments constitutifs et de toutes les relations existantes dans un système, il serait possible de prévoir l'évolution de ce dernier. Leibniz³² ne dit pas autre chose lorsqu'il traite de la « raison suffisante » : « *Rien n'arrive sans qu'il y ait [...] une raison déterminante, c'est-à-dire quelque chose qui puisse servir à rendre raison a priori pourquoi cela est existant plutôt que non existant et pourquoi cela est ainsi plutôt que de tout autre façon* ». Dans un système simple, linéaire selon l'idée déterministe qui argumente que l'état présent est l'effet de l'état antérieur et la cause de celui qui va suivre et qu'il existe une stricte proportionnalité des causes sur les conséquences, les comportements du système sont faciles à prédire si l'on connaît les variables d'entrée agissant sur celui-ci.

Il ne s'agit pas ici d'ignorer et de caricaturer la pensée « cartésiano-positiviste » qui en cherchant à révéler les lois de la nature, a démontré sa pertinence et sa puissance par l'ensemble des technologies et des techniques qu'elle a permis de concevoir et de développer au bénéfice du « progrès » en différents domaines. Mais à s'interroger si les conceptions positivistes sont encore pertinentes dans la construction de notre rapport à la réalité. Elles doivent être repensées, réinterprétées, à la lumière de défis pour lesquelles elles n'avaient pas été conçues. Par exemple, pour des situations problématiques³³ tellement « mal structurées » qu'elles ne peuvent être saisies avec les concepts et outils traditionnels de la science.

Cette discussion amène à réexaminer les modélisations usuelles qui conceptualisent les phénomènes uniquement en termes de relations causales « simples » i.e. de processus linéaires causes - effets affirmant la nécessité de l'existence d'événements antécédents clairement identifiables à des conséquences subséquentes observées, souvent dans une temporalité conçue comme brève à la fois pour les causes antécédentes et pour les effets subséquents. L'observation des situations contextuelles suggère des relations plus complexes entre les événements et dans une vision « circulaire », « récursive », où les produits et les effets sont nécessaires à leur production et à leur émergence, les relations entre les causes et les effets sont discutées.

Peut-on clairement déterminer – ou quel *a priori* permet d'affirmer comme dépendant uniquement d'un facteur – la cause efficiente d'un phénomène dans un système vivant où

³¹ Pierre-Simon Laplace (1749-1827) de l'Essai philosophique sur les probabilités (1814)

³² Leibniz, De l'origine radicale de toutes choses (De Rerum Originatione Radicali, 1697), trad., Hatier, 1984.

³³ « Wicked problem » WJ Rittel, (1973). En raison des interactions continues, de processus insoupçonnés, l'effort pour essayer d'en résoudre une partie peut faire naître de nouveaux problèmes

tout interagit. Morin en 1977³⁴ attirait déjà l'attention sur la nécessité de dépasser le schéma uni-causal classique et affirmait : « *de mêmes causes peuvent conduire à des effets différents et/ou divergents ..., des causes différentes peuvent produire de mêmes effets ..., de petites causes peuvent entraîner de très grands effets ..., de grandes causes peuvent entraîner de tout petits effets, ...* ». Outre qu'un même effet peut effectivement avoir plusieurs causes, et une même cause plusieurs effets, l'usage fonctionnaliste du concept de cause ainsi utilisé amène à promouvoir une image mécaniciste des phénomènes qui restent décrits en termes de conditions initiales (qu'on appelle donc des causes) et non d'instabilité structurelle. L'extension de ce mouvement de formalisation des connaissances issu du paradigme des sciences naturelles à toutes les sphères de l'activité humaine et sociale interroge – à travers les méthodes mises en œuvre – le statut des connaissances ainsi produites.

On touche ici aux limites des approches analytiques en raison de leur simplification excessive des modalités d'interaction homme – contexte, de l'importance qu'elles accordent à la méta – description et non au fonctionnement, à la discrétisation de variables continues, Le consensus épistémologique favorable à la méthode expérimentale n'a donc rien d'évident et d'inéluctable. Cette démarche faite d'isolations analytiques soulève le problème du degré de généralité de la validité des propriétés qui ont été obtenues dans un cadre si particulier : peuvent-elles être utilisées dans des contextes qui ne répondent pas à la même sélectivité que le dispositif initial ? Avec quelles marges d'erreur ou d'approximation ?

Penser l'évènement comme une totalité consiste à lui attribuer des caractéristiques que les démarches analytiques n'appréhendent pas et que l'on a du mal à expliquer par les modèles standard. Dans un système, composite par nature, tous les constituants concourent simultanément – et/ou selon des échelles différenciées dans le temps et l'espace – à la dynamique du comportement global. Le comportement collectif ne peut donc être considéré comme un phénomène représentatif moyen (d'où les interrogations – et de ce point de vue – sur la signification et l'usage de la notion de moyenne), de même que le comportement agrégé ne correspond pas au comportement moyen de chacun de ces constituants³⁵. Dans le cours du processus, les interdépendances entre éléments génèrent des phénomènes de variabilité et de stabilité relative qui dépassent de loin le simple croisement de variables prévue par les approches conventionnelles.

Au-delà donc de ce qui est normal³⁶, il convient de réintégrer les « fluctuations » au sein des objets de recherche et il apparaît de plus en plus pertinent de rompre avec les principes et les modèles de l'élément représentatif, lesquels nient la singularité du comportement individuel en le réduisant à un comportement moyen. A l'élément représentatif qui ne fluctue pas, puisqu'il est le produit d'une vision qui est celle de l'équilibre, il faut concevoir des « agents³⁷ » hétérogènes, singuliers, en interaction, potentiellement apprenants et encastrés dans des environnements qui sont à la fois, structurant pour le déroulement du phénomènes et structurés par le déroulement de ce même phénomène.

³⁴ Morin, E. (1977). La méthode I. la nature de la nature. Paris : Seuil

³⁵ More Is Different https://www.tkm.kit.edu/downloads/TKM1_2011_more_is_different_PWA.pdf

³⁶ Nous faisons référence ici à la fois aux canons académiques de la recherche et à la loi normale en statistique qui en appelle à la tendance centrale

³⁷ Dans le sens employé par les Modélisations Multi – Agents cf. plus avant dans le texte

II.5 Un déplacement des cadres explicatifs « autour » des phénomènes : du contexte, des circonstances, de l'environnement, de l'espace géographique ... à la question de l'habitabilité de l'écosystème Monde

La notion de contexte traduit une manière de découper dans une réalité empirique ce qui n'est pas le centre de l'étude mais « le contexte » même si le statut théorique qu'on lui accorde est souvent implicite et très variable selon les études. Elle est cependant importante car les résultats ne peuvent être analysés indépendamment du contexte dans lequel ils ont été produits et indépendamment du contexte dans lesquels se déroulent les phénomènes dont ils rendent compte. En effet, selon les circonstances – le contexte –, les relations entre causes et phénomènes peuvent changer et ainsi « tromper » les lois universelles dont l'élaboration reste pourtant l'objectif ultime des sciences expérimentales qui volontairement, procèdent en décontextualisant chaque processus pour établir des lois.

Diverses positions épistémologiques sont alors possibles. Soit les lois sont assez puissantes pour intégrer le contexte et cela conduit à l'extension de la théorie vers une visée conçue souvent en termes de sciences appliquées. Cela permet d'affirmer dans une vision idéalisée, la possibilité d'une application des connaissances scientifiques, même décontextualisées de leur lieu de production.

Soit elle ne le sont pas et l'approche contextuelle cherche à échapper à l'emprise analytique en intégrant le contexte – non comme une variable indépendante supplémentaire – mais comme une dimension entière participant à la définition du phénomène étudié.

La pensée classique disjoint des réalités inséparables et réduit les dimensions du réel en représentant la relation entre vivants et monde exclusivement sous l'aspect de la continuité, de la juxtaposition et à les penser comme ontologiquement et conceptuellement autonome de l'individu vivant qui les habite. Les conceptions traduites par les mots de « milieu », « d'environnement », de « contexte » ... produisent une image extrêmement partielle du monde dans lequel nous vivons qu'il faut discuter pour repenser les différents constituants du monde.

Par contraste avec le postulat de l'extériorité de la nature, le monde dans lequel nous vivons et agissons n'est pas un « contexte », il est notre monde en construction dans « les » temps et dont les « formes » actuelles résultent de compromis évolutifs, changeants, de « contraires » à différentes échelles. Et en retour celui-ci crée l'espace de nos actions.

Pour Philippe Descola, il s'agit de discuter les conceptions de la relation entre deux « entités » réifiées et conçues comme indépendantes qui seraient d'un côté « l'Homme » et de l'autre « la Nature ». La dichotomie devient alors substantive et « ... *donne à voir sous une forme particulièrement nette les contradictions dans lesquelles l'anthropologie s'est enfermée lorsqu'elle a posé que l'intelligibilité du monde pouvait être réparti entre des champs bien séparés de phénomènes dont il faut ensuite monter l'interdépendance ... une telle tâche est impossible à mener à bien tant que l'on accepte les prémisses de départ, c'est à dire que le fait que l'expérience humaine doit être appréhendée comme résultant de la coexistence de deux champs de phénomènes régis par des principes distincts. Comment recomposer nature et sociétés, humains et non humains, individu et collectif dans un assemblage nouveau où ils ne*

se présenteraient plus à nous comme distribués entre des substances, des processus et des représentations mais comme les expressions instituées de relations entre des entités multiples dont le statut ontologique et la capacité d'action varient selon les positions qu'elles occupent les unes par rapport aux autres : c'est donc à une écologie des relations qu'invite cette recomposition » (Descola, 2001³⁸).

De même pour les géographes, « L'espace sur lequel vivent les groupes humains n'est pas un simple support. Il possède en lui-même des propriétés, il est lui-même complexe, et cette complexité se croise avec les intentionnalités des groupes humains : l'espace géographique est en quelque sorte le produit cartésien de la complexité « naturelle » et de la complexité « sociale ». Cette complexité se déploie dans le temps (forme a priori de la sensibilité, disait Kant), notion probablement irréductible à l'esprit humain, puisqu'il a fallu à tous les scientifiques, depuis la flèche de Zénon, des trésors d'astuces pour modéliser le temps, et que, de fait, ils n'ont réussi à modéliser que de la cinétique, jamais de la dynamique³⁹ ».

Le terme « *ontologie de l'habiter* » proposé par Tim Ingold⁴⁰ met l'accent sur les interactions entre la dynamique des systèmes naturels ou artificialisés et celle des sociétés humaines, en ne considérant pas les milieux naturels seulement comme des gisements de ressources mais également comme le cadre des relations sociales qui y sont construites. « ... *la perspective locale n'est pas une appréhension plus limitée ou plus étroitement focalisée que le global, c'est une perspective qui repose sur un mode d'appréhension – un mode qui est basé sur un engagement actif et perceptif avec les composants du monde au sein duquel on habite, dans l'affaire pratique de la vie, plutôt que sur l'observation détachée et désintéressée d'un monde à part* ».

II.6 Un monde perçu comme « feuilleté⁴¹ » : Varier les échelles d'intelligibilité, une condition nécessaire à la compréhension des dynamiques événementielles ?

Comment considérer les phénomènes étudiés lorsque ceux-ci sont affirmés comme singuliers, plutôt que généraux ? Contingents, plutôt que réguliers ? La généralisation est à la fois nécessaire et toujours inachevée : i) nécessaire, car il s'agit de savoir ce que les cas et/ou les « processus-événement » peuvent avoir en commun ; ii) inachevée, car la singularité des « processus-événement » reste irréductible, elle ne se dissout jamais complètement dans les généralisations élaborées qui, par ce fait même, font perdre quelque chose de ce qui est spécifiquement contingent et potentiellement vécu. Les débats opposant les tenants de la généralité, de la représentativité, de la régularité, et ceux qui prennent parti pour la particularité, l'exceptionnalité, la contingence sont toujours d'actualité et concernent souvent les modèles explicatifs développés à différentes échelles.

³⁸ Philippe Descola (2011) *L'écologie des autres – L'anthropologie et la question de la nature*. Éditions Quæ. Collection : Sciences en question

³⁹ Henri Chamussy, « Les géographes au risque de la complexité », *Géocarrefour*, Vol. 78/1 | 2003, 61-70. <https://journals.openedition.org/geocarrefour/111>

⁴⁰ Tim Ingold, *Marcher avec les dragons*, traduit de l'anglais par Pierre Madelin. Zones Sensibles, 2013, <https://laviedesidees.fr/Tim-Ingold-ou-l-art-de-l.html>

⁴¹ Métaphore de l'oignon : construit stratifié d'un événement renvoyant à un continuum de niveau allant de dimensions explicites à implicites

Le sens commun habitué aux « choses » observées à notre échelle crédibilise un point de vue à hauteur d'homme « solipsiste » et rend inattentif aux dispositifs d'observation à partir desquels on saisit les phénomènes et en particulier aux effets d'échelles. En regard des multiples niveaux d'intelligibilité et des multiples temporalités des événements qui se produisent, l'absence de réflexions concernant les échelles auxquelles les chercheurs réfèrent leurs explications ainsi que des modélisations des relations existantes entre ces différentes échelles interroge. « *La complexité des systèmes naturels et sociaux provient de l'existence de plusieurs niveaux d'organisation correspondant à différentes échelles spatio-temporelles. L'un des principaux défis de la science des systèmes complexes consiste à développer ... des méthodes de modélisation capables de saisir toutes les dynamiques d'un système par l'intégration de ses activités à de nombreux niveaux, souvent organisés hiérarchiquement* »⁴².

La notion d'échelle ouvre différentes pistes pour l'explication des phénomènes et permet d'envisager la continuité (ou non) de ce qui observé d'un niveau à l'autre. La manifestation d'un événement en tel lieu, à tel instant peut être qualifié en fonction de l'échelle et/ou les échelles d'observation. De quelles échelles s'agit-il ? On parle généralement d'échelles spatiales, d'échelles temporelles, mais aussi d'échelles micro - macro.

Différentes pistes apparaissent pour dépasser les oppositions classiques micro vs macro – temps court vs temps long et pour appréhender un modèle d'articulation entre échelles : i) celles référant au(x) rôle(s) du phénomène de niveau macro qui est conçu comme influençant et/ou contraignant la(les) configuration de l'événement localisé de manière descendante (Top-down) ; ii) celles relevant les singularités focalisées sur le niveau local et s'inscrivant dans une logique d'agrégation bottom-up. Une voie alternative référée au paradigme de la complexité, consiste à appréhender les niveaux micro et macro en interaction récursive au sein d'un système auto-organisant, et rechercher les explications de leur évolution dans ce fonctionnement systémique et la forme des interactions qui y sont associées⁴³.

« Agréger » « conjoindre » par les interactions (itérées) locales et dynamiques – et non plus par l'agrégat moyenne – s'écarte des modèles habituels et ouvre la question de la modélisation-simulation des phénomènes. La modélisation peut être présentée comme l'action de conception - construction, à l'aide d'artefacts symboliques, de représentations de phénomènes perçus ou conçus par un « observateur-descripteur ». Les modèles sont des simplifications du système étudié qui peuvent être manipulées à la place de ce dernier pour contourner les limites de l'expérimentation. Dès lors que l'on interprète leurs résultats comme des hypothèses susceptibles d'être considérées dans tel ou tel contexte, cette démarche exploratoire et heuristique apparaît comme un outil de choix pour étudier « in silico » les

⁴² Chavalarias D., Bourguine P., Perrier E., Amblard F., Arlabosse F., Auger P., Baillon J.-B., Barreteau O., Baudot P., Bouchaud E. French Roadmap for Complex Systems 2008-2009, French National Network for Complex Systems (RNCS), Paris Ile-de France Complex Systems Institute (ISC-PIF) and IXXI, Entretiens de Cargèse 2008, 2008.<https://roadmap.iscpif.fr/2017/06/20/dynamique-multi-echelle-et-multi-niveau-changement-dechelle-et-emergence/>

⁴³ Lena Sanders (2009) Du lieu au territoire, de l'événement à l'histoire : modèles et échelles. In Dominique Hervé, Francis Laloë : Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés. Éditions Quæ - Collection : Indisciplines

systèmes complexes car elle permet de tester rapidement différents scénarios et alternatives⁴⁴.

III. Une perspective : la modélisation et la simulation des phénomènes

Sous le vocable « objet de recherche », les sciences dites positivistes postulent l'existence de réalités en soi, c'est-à-dire existantes en dehors de l'observateur. La tâche de celui-ci est de les décrire de façon aussi objective que possible. On suppose alors que ces objets sont réellement tels qu'on les perçoit, dotés de propriétés permanentes qui leur sont propres et qui sont indépendantes de nos actions pour les connaître « *Tout a conspiré à nous à mettre en présence d'objets que nous pouvons tenir comme invariables*⁴⁵ ».

Le paradigme épistémologique de la complexité appelle à réfléchir cette posture épistémologique. La connaissance produite par les scientifiques n'est pas « la » réalité, mais une connaissance située dans le temps et selon le contexte⁴⁶. A la suite de Mioara Mugur-Schächter⁴⁷, il nous apparaît important de souligner que ce qui décide du mode de description possible pour une entité-objet de description donnée, n'est pas la constitution physique interne de cette entité-objet, mais la situation cognitive dans laquelle l'observateur-concepteur se trouve relativement à l'entité-objet considérée. Une pluralité de points de vue sur un même objet étant possible, le regard subjectif de l'observateur joue dans la construction de l'objet de recherche. Dans ce cadre, la complexité n'est pas qu'une caractéristique de l'objet, elle est aussi le fruit du regard de l'observateur. « *Dès lors que nous convenons que nous n'accédons à l'intelligence de la complexité d'un phénomène que par les représentations (ou modèles, systèmes de symboles eux-mêmes perçus complexes) que nous en construisons, nous ne pouvons plus séparer le système modélisateur (l'esprit humain produisant des descriptions intelligibles) du phénomène modélisé (lequel n'a peut-être d'autre réalité que celle des représentations que l'esprit s'en construit)*⁴⁸ ».

En veillant à ce que les langages et dispositifs informatiques ne se transforment pas en grilles d'analyse préconstruites et « fermées » qui occultent la réalité à laquelle ils prétendent donner accès, la question de la modélisation (et de la simulation) mise en œuvre pour saisir les temporalités multiples et irrégulières des « processus-événement » montrent bien les défis à relever pour que celles-ci participent de l'objet empirique d'intelligibilité du monde en changement du fait même du déroulement des événements⁴⁹.

⁴⁴ Varenne, F., Silberstein, M., Modéliser & Simuler - Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, Tome 1. Editions Matériologiques

⁴⁵ Henri Bergson (1938) la pensée et le mouvant

[https://fr.wikisource.org/wiki/La_Pensée_et_le_mouvant/Introduction_\(deuxième_partie\)](https://fr.wikisource.org/wiki/La_Pensée_et_le_mouvant/Introduction_(deuxième_partie))

⁴⁶ Marie José Avenier « Une description ne peut être considérée comme la description du système observé ; mais comme la description que le système observant fait du système observé ». Les paradigmes épistémologiques constructivistes : post-modernisme ou pragmatisme ? <http://www.cairn.info/revue-management-et-avenier-2011-3-page-372.html>

⁴⁷ Mioara Mugur-Schächter, sous le nom de Méthode de Conceptualisation Relativisée. Sur le tissage des connaissances. Hermès-Lavoisier, 2006

⁴⁸ Jean-Louis Le MOIGNE « La modélisation des systèmes complexes ». Dunod, 1990

⁴⁹ Cf. The Journal of Artificial Societies and Social Simulation : an interdisciplinary journal for the exploration and understanding of social processes by means of computer simulation. https://www.jasss.org/index_by_issue.html

III.1 Modélisation à base d'Automates Cellulaires (AC) et de Systèmes Multi Agents (SMA)

Comment des systèmes complexes modélisés (et implémentés) sur une machine informatique, c'est-à-dire composés d'un nombre important d'éléments en interaction, peuvent-ils démontrer des comportements organisés tels que ceux que l'on retrouve dans les systèmes physiques, biologiques et sociaux ? L'idée fondamentale est que l'ordonnement entre les composantes qui sous-tend le comportement observé sur le plan collectif (niveau macroscopique) résulte précisément et seulement des « simples » interactions qu'elles entretiennent les unes avec les autres sur le plan individuel (niveau microscopique). Dans ce traitement de la complexité la modélisation mathématique non linéaire traite des interactions entre « agents » qui sont itérées au fil du temps et donnent lieu à l'étude des formes d'auto-organisation et d'émergence qui étaient jusqu'à présent peu étudiées par les sciences conventionnelles.

Les automates cellulaires⁵⁰ apportent une réponse. Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini et qui peut évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps $t+1$ est fonction de l'état au temps t d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ». À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente. Le modèle des automates cellulaires est remarquable par l'écart entre la simplicité de la définition des règles et la complexité que peuvent atteindre certains comportements macroscopiques : l'évolution dans le temps de l'ensemble des cellules ne se réduit pas (simplement) à la règle locale qui définit le système⁵¹. De nombreux automates cellulaires ont été conçus concernant la « vie artificielle » : le « jeu de la vie » de John Conway » (1976), les comportements et mouvements d'ensemble d'un groupe d'oiseaux (Boids), d'animaux terrestres (les insectes sociaux comme les fourmis) ou de bancs de poissons, d'une foule en déplacement⁵², ... mais aussi le comportement des cellules, les interactions entre les gènes et protéines⁵³.

La question du lien micro-macro et de l'émergence est aussi traitée – de manière technique – avec des outils considérés comme appropriés pour des représentations multiniveaux. Ce sont les systèmes Multi Agents (SMA), utilisés comme outils de modélisation de ces systèmes complexes. Contrairement à la cellule de l'AC, l'agent est mobile et son environnement va changer au cours de ses déplacements. Sa structure de voisinage peut varier dans le temps et lui permettre d'avoir une grande souplesse comportementale. Sur un automate cellulaire, le voisinage d'une cellule est une structure invariante du système, en revanche, cette structure devient une dynamique du système dans un modèle à base d'agents. L'agent peut être un élément d'un composant donné à l'instant t_1 et passer dans un autre composant à l'instant t_2 . Il doit être capable de recalculer à tout instant ses composants internes, le composant hôte sur lequel il se situe et les composants de ses voisins. Il doit également pouvoir adapter ses

⁵⁰ https://www.wikiwand.com/fr/Automate_cellulaire

⁵¹ https://www.wikiwand.com/en/Stuart_Kauffman

⁵² Voir la présentation et les liens proposés par de Jean-Philippe RENNARD <http://www.rennard.org/alife/french/liens.html>

⁵³ <https://interstices.info/predire-le-comportement-des-cellules-avec-la-modelisation-booleenne/>

fonctions comportementales en conséquence. Si un agent change d'environnement, il doit être également capable de modifier de comportement selon le milieu avec lequel il interagit. Un système composé d'agents est donc plus générique qu'un système cellulaire.

« Tout modèle à base d'agents est un système composé d'entités multiples ou agents qui évoluent dans un environnement, conçu comme une entité particulière, dans lequel ils sont localisés. Ces agents sont dotés d'attributs, de comportements, et de capacités de perception et de communication. L'ensemble des valeurs des attributs d'une entité à un instant donné constitue l'état de cette entité, et la réunion de l'ensemble des états des entités forme l'état microscopique ou – dit plus simplement – l'état du système. Les capacités de perception des entités leur permettent de consulter un sous-ensemble de cet état microscopique, habituellement de façon localisée dans l'environnement. Les comportements sont des règles contrôlant à chaque instant l'évolution de cet état, en intervenant sur les états des entités qui les portent ou sur leur existence même (création et destruction), ainsi que sur les états et existences des autres entités intervenant dans les éventuelles actions, communications ou interactions décrites dans les comportements⁵⁴ ».

L'implémentation et la construction des modèles sont souvent effectuées avec le logiciel Netlogo⁵⁵. Le langage d'instructions possède une syntaxe très adaptée pour définir le comportement des agents simulés et est particulièrement facile à prendre en main. NetLogo est un logiciel libre et open source. Il est écrit en Scala et Java et fonctionne sur la machine virtuelle Java et la nature de la programmation utilisée dans Netlogo est orientée objet⁵⁶. De plus, NetLogo offre un affichage en deux ou trois dimensions permettant de mieux distinguer les agents mobiles des cellules du maillage spatial sur lesquelles ils se déplacent et interagissent. Un exemple – parmi bien d'autres – concerne une modélisation du changement climatique. Il s'agit d'un modèle de flux d'énergie dans la terre, en particulier d'énergie thermique⁵⁷. Ce modèle peut être utilisé en ligne⁵⁸. Il y a, bien sûr, de nombreuses simplifications dans ce modèle et ceci conforte nos remarques introductives sur l'aspect heuristique des modèles. Ce qui est intéressant, c'est qu'un modèle réagisse à certains égards comme le système qu'il est censé modéliser. C'est ce que fait ce modèle en montrant comment l'effet de serre est causé par le CO₂ et d'autres gaz qui absorbent les infrarouges.

III.2 Modélisation à base d'équations différentielles

Une autre alternative concernant la modélisation des systèmes complexes concerne le domaine des systèmes dynamiques en mathématiques (systèmes d'équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles)⁵⁹.

⁵⁴ Treuil Jean-Pierre, Drogoul Alexis, Zucker Daniel, Bourguin P., Perrier Edith (2008). Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques. Paris : Dunod

⁵⁵ Wilensky, 1999 : NetLogo <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

⁵⁶ https://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_orient%C3%A9e_objet

⁵⁷ <https://ccl-northwestern>

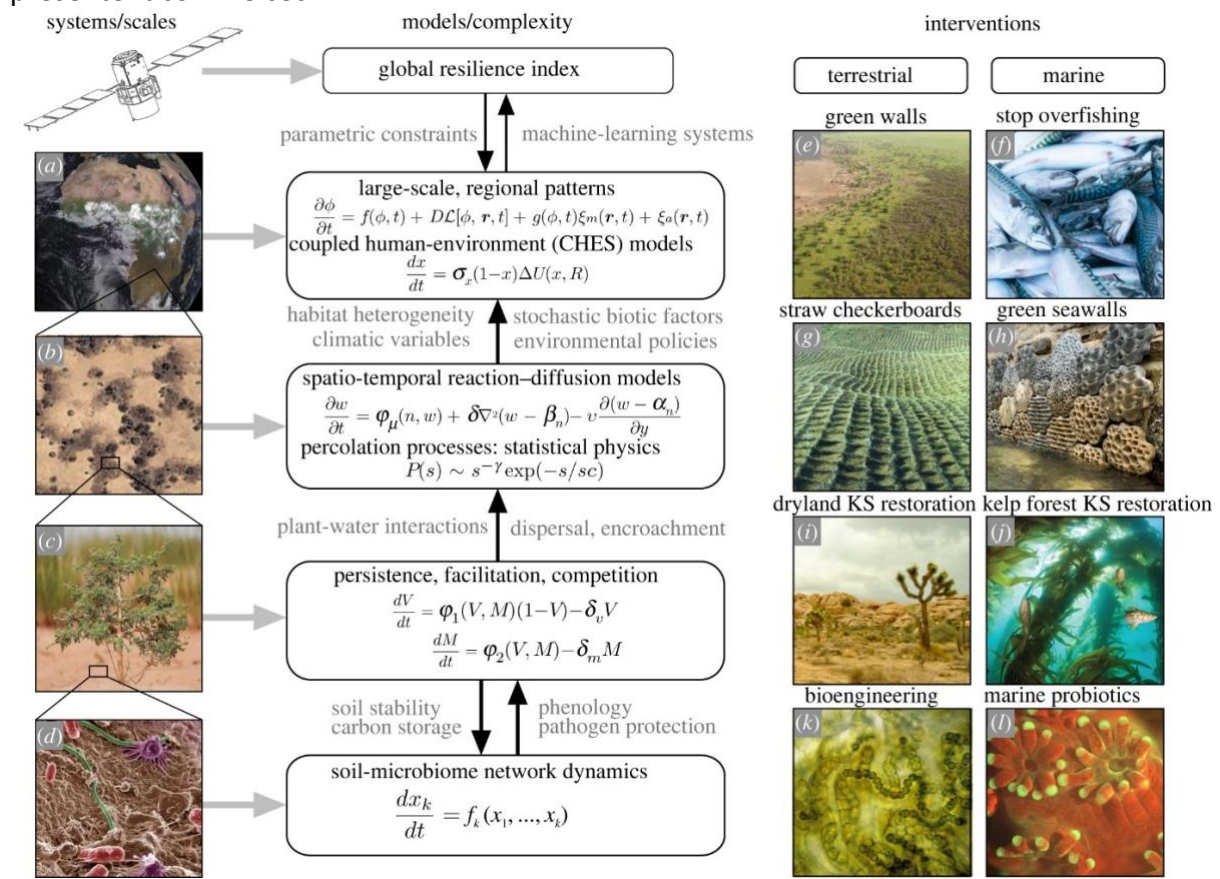
[edu.translate.goog/netlogo/models/ClimateChange? x tr sl=auto& x tr tl=fr& x tr hl=fr](https://ccl-northwestern.edu.translate.goog/netlogo/models/ClimateChange? x tr sl=auto& x tr tl=fr& x tr hl=fr)

⁵⁸<http://www.netlogoweb.org/launch#http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/models/Sample%20Model/s/Earth%20Science/Climate%20Change.nlogo>

⁵⁹ En mathématiques, une équation différentielle est une équation dont la ou les inconnues sont des fonctions ; elle se présente sous la forme d'une relation entre ces fonctions inconnues et leurs dérivées successives. On distingue les équations différentielles partielles, plutôt appelées équations aux dérivées partielles, lorsque la ou

Nils Berglund⁶⁰ (2020) présente des modèles mathématiques « simples » permettant de comprendre certains mécanismes de base des changements climatiques en ce qui concerne la circulation thermohaline atlantique nord (c'est-à-dire du Gulf Stream et des courants qui le prolongent jusque dans les régions arctiques).

Dans une revue de synthèse sur le climat « Ecological complexity and the biosphere : the next 30 years⁶¹ » les auteurs considèrent l'année 2050 comme représentant un horizon futur et présentent plusieurs concepts clés associés à la nature complexe et non linéaire de notre biosphère. Ils discutent aussi de l'impact de ces non-linéarités sur les tendances futures et en particulier de l'identification de futurs points de basculement potentiels. L'un des objectifs de leurs modélisations des écosystèmes est d'identifier le répertoire potentiel des états alternatifs associés aux phénomènes de type transition. Pour ce faire, les schémas statistiques associés à la percolation⁶² ainsi que la description dynamique donnée par les modèles mathématiques non linéaires se combinent pour aborder cette complexité. Les auteurs, les présentent comme ceci :



les fonctions inconnues peuvent dépendre de plusieurs variables indépendantes. Cf <http://images.math.cnrs.fr/Qu-est-ce-qu-une-Equation-aux-Derivees-Partielles-Stochastique.html>

⁶⁰ Nils Berglund (2020) « Modèles simples du climat » — Images des Mathématiques, CNRS. <http://images.math.cnrs.fr/+Modeles-simples-de-climat+.html>

⁶¹ Solé R, Levin S. 2022 Ecological complexity and the biosphere: the next 30 years. Phil. Trans. R. Soc. B 377 : 20210376. <https://royalsocietypublishing.org/toc/rstb/2022/377/1857> - <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2021.0376>

⁶² <http://images.math.cnrs.fr/La-percolation-jeu-de-pavages-aleatoires#:~:text=La%20percolation%20désigne%2C%20à%20,se%20poser%20des%20questions%20élémentaires.>

Ces modélisations « globalisantes » peuvent être régionalisées pour caractériser le changement climatique et ses impacts sur de nombreux écosystèmes naturels et secteurs socio-économiques à l'échelle « locale » d'une région. *« Les modèles couvrant toute la planète simulent l'évolution du système climatique terrestre et son énergétique globale sous l'effet de forçages externes et de sa variabilité interne. ... ils ne représentent aujourd'hui le climat de la Terre que sur des mailles de l'ordre de 100 à 200 km et, de fait, de nombreuses caractéristiques qui pourraient s'avérer essentielles n'y sont que grossièrement prises en compte. Par exemple, la topographie utilisée par les modèles globaux pour le Sud de la France (un ensemble montagneux contigu allant des Alpes aux Pyrénées) ne reflète pas bien le relief varié de cette région. En conséquence, ces modèles ne peuvent pas, par construction, simuler des épisodes de Mistral, vent local dû à l'accélération du flux par le couloir rhodanien. De même, ce type de modèle ne reproduit pas bien les pluies torrentielles d'automne dans le Sud-Est de la France (les événements cévenols) et les orages en été. Pour affiner spatialement les scénarios de changement climatique, il faut donc augmenter la résolution du maillage. Au cours des 20 dernières années, la communauté française a développé plusieurs modèles régionaux de climat et est pionnière dans les modèles régionaux couplés intégrant atmosphère, continent, fleuve et océan. Mais au-delà, il reste encore de nombreux progrès à faire pour améliorer la capacité des modèles à simuler les événements extrêmes régionaux, pour mieux quantifier les incertitudes des projections régionales, pour améliorer la résolution spatiale (1-5 km), et pour tenir compte des lacs, des villes, de la chimie atmosphérique, des aérosols naturels et de la biogéochimie⁶³ ».*

III.3 La dimension heuristique de la modélisation : « Modéliser, c'est apprendre⁶⁴ »

Si ces outils offrent un support méthodologique adéquat pour modéliser les phénomènes multiscalaires, des limites importantes sont à signifier pour leur passage à l'échelle « réelle ». La définition même de ce qui est pertinent lors du déroulement d'un phénomène ne préexiste pas aux « données » de l'état initial – références de la modélisation – nous rappelle Yves Citton (2012) : *« Le problème tient à ce que la définition même des pertinences ne préexiste pas aux données. Elle est en partie issue des nouvelles données elles-mêmes, ce qui conduit à affoler toutes nos boussoles. La question centrale peut donc se formuler de la façon suivante : comment « traiter » les données (nouvelles) sans que ce traitement ne neutralise leurs virtualités émergentes ?⁶⁵ ».*

Ceci argumente la nécessité d'une insertion progressive de données d'observation dans des constructions interprétatives et des modélisations toujours susceptibles d'être reprises chemin faisant.

⁶³ Robert Vautard et Samuel Somot (2015) <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/evolution-future/regionalisation-par-samuel-somot-robert-vautard>

⁶⁴ Arnaud Banos (2016). Modéliser, c'est apprendre Itinéraire d'un géographe. Editions Matériologiques. Collection : Modélisations, simulations, systèmes complexes

⁶⁵ Citton Y. (2012), Traiter les données : entre économie de l'attention et mycélium de la signification, *Multitudes*, Vol.49, n°2, p.143-149.

A posteriori, ceci est illustré par les modélisations COVID 19 (modèles basés sur SIR - Susceptible, Infected, Recovered - et sur ceux de Neil Ferguson de l'Imperial College) qui se complexifient au fur et à mesure du développement de la pandémie (cf. <https://covprehension.org>) « *les résultats ne peuvent pas être plus certains que les hypothèses, qui étaient à ce moment-là très peu certaines*⁶⁶ ».

IV. Une réflexion organisationnelle et managériale

L'ambition de ce texte est de provoquer une réflexion sur les choix impensés de nos cultures épistémologiques afin de prendre du recul par rapport à nos patterns cognitifs et organisationnels. Dans un monde qui change vite, où de nouveaux défis apparaissent, où les interdépendances changent d'échelle, entre les sociétés, entre l'humanité et la biosphère, les cadres conceptuels et institutionnels peuvent devenir le principal obstacle à notre capacité à faire face. Nous considérerons la pensée complexe, non comme un outil immédiatement résolutoire des problèmes perçus, mais comme la manière dont on s'engage humainement dans l'intelligibilité de ces systèmes. C'est-à-dire l'attitude avec laquelle nous abordons les systèmes dits complexes mais aussi, comme un espace de débats épistémologiques, concernant les processus de pensée ou les modèles que nous utilisons pour comprendre les réalités que nous considérons complexes. Engager et/ou continuer cette réflexion individuelle et collective au sein d'une institution de recherche et d'expertise, nécessite sûrement de (re)penser les conditions organisationnelles, managériales, humaines et matérielles, permettant l'intelligence de ces situations.

⁶⁶ Juliette Rouchier et Victorien Barbet (2021) *La diffusion de la Covid-19. Que peuvent les modèles ?* Éditions Matériologiques. Compte rendu : <https://www.nonfiction.fr/article-10766-modeliser-la-diffusion-de-la-covid-les-enjeux-et-limites-des-modeles.htm>