



Séminaire « Soutenabilités »

« La modélisation peut-elle nous prémunir de l'insoutenable ? »

Podcast n° 2 :

Est-on capable de modéliser les (in)soutenabilités ?

Point de vue, Pierre-Yves Longaretti

Pierre-Yves Longaretti est astrophysicien théoricien au CNRS. Depuis le milieu des années 2000, il s'intéresse également aux problématiques sociétales et environnementales globales et locales. Son activité de recherche dans ces domaines porte plus précisément sur les risques d'effondrement et risques systémiques globaux, les impacts environnementaux des flux de matière et d'énergie de l'économie, et plus généralement les impacts de l'activité humaine sur les écosystèmes et les services qu'ils apportent à la société.

Entretien réalisé par Julien Bueb, Carole Cocault, Blanche Monjour-De Ridder et Mathilde Viennot

Vous êtes astrophysicien et chercheur sur les questions socio-environnementales. Qu'est-ce qu'un modèle pour ces deux domaines et dans la conjonction des deux ?

Il est important de distinguer théorie et modèle. En sciences dures, alors qu'une théorie repose sur des fondements bien connus, un modèle est utilisé quand on manque de connaissance pour comprendre un phénomène et ainsi relier une description ou analyse du phénomène à des principes premiers théoriques.

En astrophysique par exemple, les fondements théoriques sont bien connus (théorie des fluides, théorie de Newton de la gravité, *etc.*) et ont été validés par un processus scientifique long et complexe. Parallèlement, des modèles existent lorsque nous ne sommes pas capables, en l'état actuel des connaissances, d'expliquer certains phénomènes observés à partir des principes fondamentaux de la physique, du fait de notre ignorance des conditions

physiques prévalant à leur existence, et même parfois, de l'objet astrophysique leur donnant naissance.

Dans les sciences quantitatives de l'environnement, (géologie, géophysique, ou écologie par exemple), les mots « théorie » et « modèle » sont utilisés dans le même sens, même si l'utilisation du mot « modèle » est plus fréquente car nous ne sommes pas forcément capables de relier tous les contextes expérimentaux ou observationnels à des lois fondamentales, lesquelles ne sont pas toujours connues, et que de fait plus de choses relèvent d'hypothèses plus ou moins validées.

En sciences sociales, les termes de théories et modèles n'ont pas le même sens. La théorie désigne un cadre interprétatif qui en général ne relève pas de principes premiers fondamentaux validés et consensuels, et c'est pourquoi il peut y avoir des théories différentes pour un même phénomène social, historique, anthropologique, etc. qui ne sont pas nécessairement contradictoires entre elles. Dans ces disciplines, chaque cadre théorique capture quelque chose de la réalité sans que, sauf exception, il soit possible de les hiérarchiser en importance et pertinence par référence à des principes premiers, ceux-ci n'étant en règle générale ni établis, ni peut-être même existants (je parle ici de principes régissant les phénomènes sociaux, pas de principes méthodologiques d'analyse scientifique en sciences humaines ; ces derniers existent, bien évidemment, sinon il ne s'agirait pas d'une démarche scientifique). Les modèles quant à eux peuvent désigner des instanciations d'une théorie ou quelque chose de totalement empirique ; de fait, la distinction entre théorie et modèle est plus floue dans ces disciplines, selon mon expérience. Théories et modèles ne possèdent pas nécessairement de volets quantifiés, voire quantifiables. Néanmoins, en sciences sociales, beaucoup de modèles s'appuient sur des éléments de quantification, de nature statistique, par exemple. La quantification n'a donc pas le même rôle suivant les disciplines considérées entre sciences dures et sciences humaines. En sciences dures, elle joue un rôle essentiel de validation théorique. En sciences humaines, elle peut n'apporter qu'un élément d'information supplémentaire, toujours utile, mais pas nécessairement central. Évidemment, ces généralités recouvrent de larges différences de pratiques intra- et inter-disciplinaires.

La forme et la complexité des différents modèles, que ce soit en sciences dures ou en sciences sociales ou de l'environnement, dépendent directement du type de questions pour lesquelles ces modèles sont élaborés. Au-delà de cette remarque générale, et du fait de la grande variété des contextes, méthodes et questions abordées, il est impossible de définir une typologie de modèles. On pourrait définir une typologie de méthodes (ça a peut-être déjà été fait d'ailleurs), mais je ne suis pas sûr que ce soit très informatif. Réaliser une typologie des modèles n'a de sens, me semble-t-il, que si on se restreint à une question donnée.

Plus précisément en sciences de l'environnement, quels usages sont faits des modèles ?

Les modèles utilisés en sciences de l'environnement visent deux grandes catégories d'objectifs. Le premier est de mettre en perspective des données quantitatives, dans un but d'information ou de mise en évidence d'un point ou d'un problème particulier. Par exemple, concernant l'empreinte écologique, il s'agit de réaliser à partir de données quantitatives brutes un indicateur simple renseignant sur une forme de limite de durabilité de l'activité humaine, au sens du renouvellement des ressources naturelles que l'on prélève, ou de l'absorption de nos émissions de gaz à effet de serre par les milieux naturels. Le second objectif est un objectif de structuration du débat politique. L'expertise scientifique est plus souvent mobilisée pour le premier type d'objectif, mais le second type joue un rôle important dans le débat public, même s'il est moins visible en tant que tel *a priori*. Par ailleurs, les deux types d'objectifs peuvent être détournés pour défendre des intérêts spécifiques au détriment de l'intérêt commun, sous couvert d'objectivité scientifique. C'est même une pratique de plus en plus fréquente, qui a pour effet de décrédibiliser le discours scientifique et de produire une confusion entre vérités

scientifiques et opinions (mais d'autres pratiques contribuent aussi à cette démonétisation de la science). Notamment, les modèles peuvent facilement être confondus avec des opinions.

La diversité des modèles auxquels vous êtes confronté permet-elle de mieux appréhender certains phénomènes ? Quand vous utilisez différents types de modèles, rencontrez-vous des difficultés méthodologiques et pratiques ?

Les modèles sont par nature toujours conçus pour mieux appréhender la réalité. Certains modèles et certaines modélisations sont plus fiables que d'autres. Par exemple, dans le cadre de ma propre activité de recherche, les types de modèles les plus robustes auxquels j'ai eu recours sont les modèles de flux matériels associés aux échanges économiques, que l'on utilise pour quantifier les pressions environnementales que ces échanges génèrent, en couplant ces modèles à des données issues d'analyses de cycle de vie. La conciliation de ces deux approches – flux matériels et analyses de cycle de vie, les deux restant assez robustes en termes de quantification – permet de savoir qui est responsable de quoi. Par exemple, dans le cas des émissions de gaz à effet de serre, ce genre d'approche appliqué à l'ensemble des productions et consommations permet en principe de savoir qui, en bout de chaîne, est responsable du CO₂ en termes de consommation et pas simplement où celui-ci est émis. Il s'agit d'un point de tension des négociations internationales sur le climat, notamment vis-à-vis de la Chine¹.

Plus généralement, les problèmes liés aux questions méthodologiques sont souvent mieux posés que les questions de principe (« comment mesurer les émissions de gaz à effet de serre » est une question méthodologique bien posée, par rapport à une question comme « qui est responsable de quoi dans les émissions, notamment entre producteurs et consommateurs » ; cf note de bas de page précédente), et les modèles et méthodes correspondants sont en général plus fiables.

Les modèles quantitatifs créent un tropisme : on ne gère que ce qu'on peut mesurer, et réciproquement on gère mal ce qu'on ne mesure pas. Le danger de ce tropisme est qu'il peut exister des choses peu ou pas mesurables, ou dont les mesures sont très fausses (quantitativement mais aussi qualitativement), mais qui sont très importantes pour le fonctionnement de la société. Par exemple, les mesures de la valeur économique de la grande barrière de corail du Pacifique au large de l'Australie varient d'un facteur un à mille. Au-delà de l'incertitude même du chiffre, qui pose problème, cette façon de procéder suppose d'emblée que la monétisation est la meilleure façon d'attribuer une valeur à la nature, ce qui pose des problèmes éthiques et pratiques dont les principaux sont connus depuis l'Antiquité. Or les coraux jouent un rôle essentiel pour la reproduction de la biodiversité marine, dont dépendent des populations entières pour leur survie, et cette approche économique prend très mal en compte ce point, au-delà des questions de validation qualitative de l'approche et d'incertitudes quantitatives. Plus généralement, les points aveugles de ce que les économistes désignent par « externalités négatives » sont directement responsables de la dégradation ou de la perte de fonctionnalités environnementales critiques pour les sociétés humaines. C'est d'ailleurs ce point qui a conduit Nicholas Stern dans son célèbre rapport à désigner le changement climatique comme la plus grande défaillance de marché de tous les temps.

¹ La Chine insiste sur la responsabilité des pays consommateurs, majoritairement occidentaux, qu'elle soit actuelle (du fait de la délocalisation des productions) ou passée. De fait, il est vrai qu'une partie importante de la production chinoise est destinée à la demande occidentale. Réciproquement, cette production localisée en Chine aide aussi celle-ci dans son développement. La question de la quote-part des responsabilités respectives des producteurs et des consommateurs est en fin de compte une question politique, mais il n'est pas possible d'en débattre et arriver à des compromis quantitatifs sans connaissance des empreintes carbone de consommation, beaucoup plus difficiles à établir que la comptabilité carbone des productions.

Ces points illustrent que les limites conceptuelles et méthodologiques des modèles dépendent fortement du type de modèle considéré, et du type de question posée.

Vos travaux portent en partie sur les questions d'effondrement et de risques globaux. Avez-vous recours à des modèles dans ces travaux ? Si oui, que permettent-ils et quelles sont leurs limites ?

Si on s'intéresse à la question de la possibilité d'effondrement des sociétés modernes, on peut distinguer deux grands types de modèles. Le premier produit des projections de long terme – quelques décennies – relativement « certaines », ou à tout le moins régulières, sur le plan qualitatif. Le prototype emblématique de cette catégorie est le modèle *World 3* utilisé dans le rapport Meadows du Club de Rome. C'est en particulier ce rapport et ce modèle qui sont à la source de la plupart des discussions récentes sur les risques d'effondrement.

Le second type de modèle porte sur les risques systémiques globaux, de plus court terme, mais qui portent sur des dynamiques plus aléatoires, tels que la crise de 2008 ou la pandémie du COVID-19, pour citer deux exemples récents. Il y a peu de modèles systémiques de ce genre de crise. Les rares modèles de risques systémiques globaux qui existent se concentrent sur un ou deux secteurs. Regardons à titre d'exemple un peu plus en détail la crise des *subprimes*. En amont de la crise, il y avait une tension sur le prix du pétrole. Cette tension a conduit une partie des ménages américains les plus vulnérables à ne plus pouvoir rembourser les emprunts immobiliers qu'ils avaient contractés (emprunts que par ailleurs ils n'auraient pas dû pouvoir contracter du fait de la faiblesse de leurs revenus), ce qui a déclenché une cascade de défauts de paiements, des particuliers d'abord, des organismes financiers ensuite, puis par effet domino la crise économique de 2008 qui a frappé tous les secteurs d'activité, la plus importante crise depuis celle de 1929. Cette chaîne d'effets dominos d'importance de plus en plus grande au cours de la propagation est caractéristique des risques systémiques : un événement géographiquement et économiquement circonscrit finit par se répercuter dans d'autres secteurs à l'échelle de la planète, du fait de l'interconnexion généralisée de toutes les activités dans notre société moderne. Ces risques globaux ne conduisent pas nécessairement à des effets importants à chaque crise de ce type, mais peuvent néanmoins contribuer à un risque d'effondrement, si les crises qui en résultent s'enchaînent suffisamment rapidement (quelques années entre deux crises par exemple) sans que leurs effets n'aient eu le temps d'être totalement résorbés. C'est l'effet cumulatif de crises aléatoires de ce type qui devient alors un moteur possible d'effondrement.

Il convient de noter l'existence d'un renforcement mutuel entre les deux catégories de processus d'effondrement que je viens brièvement de décrire (dynamiques lentes et régulières du type *World 3*, et dynamiques rapides aléatoires du type risques systémiques). En particulier, l'approche des limites du système Terre (limites sur les ressources ou sur les pollutions) qui joue un rôle central dans le modèle *World 3* est également une source d'accroissement des instabilités qui alimentent les risques systémiques globaux. Par contre, il n'existe pas à ma connaissance d'étude portant sur ce point spécifique d'interaction entre ces deux types de dynamique dans la littérature académique (et peut-être même dans la littérature grise), ce qui en soi constitue un point aveugle important de notre compréhension des risques d'effondrement.

Finalement, dans les deux catégories de modèle, les choix de modélisation sont directement conditionnés par les questions posées, qui définissent le niveau de complexité et de robustesse des modèles que l'on élabore, au même titre que les données disponibles pour calibrer ces modèles. Dans l'équipe STEEP (Soutenabilité, Territoires, Environnement, Économie et Politiques locales) du centre INRIA de Grenoble à laquelle je suis rattaché pour mon travail sur les problématiques socio-environnementales, nous nous intéressons en particulier aux marges de manœuvre dont on dispose à toutes les échelles géographiques, du global au régional ou au local, face à un potentiel effondrement et aux risques globaux. Une

des difficultés posées par les questions d'effondrement et de risques systémiques globaux est celle de la validation des modèles, directement liée à l'absence de reproductibilité. Il n'existe qu'une seule instance de l'Histoire humaine. Or, une des bases de la validation scientifique est la reproductibilité. Ce n'est pas la seule, et la question de la réfutabilité d'une théorie ou d'un modèle sur la base de la reproductibilité des méthodes et résultats est très débattue en épistémologie des sciences. Néanmoins, ce principe de réfutabilité (dû à Karl Popper, et qui en principe permet d'identifier ce qui est scientifiquement faux, et, en creux, approcher par essais-erreurs successifs ce que l'on peut considérer comme juste) capture malgré tout quelque chose d'essentiel de l'établissement de la vérité scientifique en sciences dures, et par extension, dans les éléments quantitatifs des autres sciences (point encore plus débattu mais le discuter m'emmènerait trop loin). De ce fait la validation de modèles d'effondrement pose des problèmes spécifiques². Ce point constitue probablement l'une des limites les plus importantes à la portée des conclusions tirées des modèles d'effondrement. Si les conclusions qualitatives sont relativement robustes – par exemple sur le fait que notre société remplit les conditions d'un effondrement (parce que reposant sur des principes qualitatifs génériques simples et validés par ailleurs) – il est très difficile de définir le degré de confiance que l'on peut accorder aux projections semi-quantitatives issues de ce type de modèle.

Une autre limite importante provient du niveau de complexité extrême du système Terre, qui empêche à la fois d'avoir la certitude d'en avoir identifié tous les éléments essentiels, même au niveau qualitatif, et qui fait que tout modèle, simplificateur par nature, possède une incertitude irréductible dans l'évaluation de sa pertinence, en particulier par rapport aux questions d'effondrement. On peut tenter de réduire cette incertitude, mais elle ne peut pas disparaître. Un des aspects du problème est qu'il est impossible à une personne seule, ou même une équipe, ou même un réseau d'équipes, de concevoir une représentation dont on puisse affirmer avec certitude la fiabilité, même sur le plan qualitatif. Y compris dans le domaine le mieux compris sur le plan des principes premiers (les modèles de climat), on découvre en permanence des erreurs ou des imprécisions. Par ailleurs, ces modèles ne prennent pas en compte les points de basculement possibles des régimes climatiques (points de non-retour divers, par exemple concernant la fonte des calottes polaires) ; notre connaissance actuelle de ces points de basculement est trop grossière pour qu'on puisse la modéliser de façon suffisamment pertinente pour une inclusion dans les modèles de climat.

Dans notre équipe, nous avons actuellement deux thèses en cours sur les problématiques d'effondrement et de risques systémiques. L'une sur le modèle *World 3* qui cherche à en analyser la robustesse mathématique et structurelle par différentes méthodes, et tente par cette analyse de clarifier son niveau de fiabilité. La seconde concerne les risques systémiques et porte sur le noyau (*nexus*) énergie-finance-agroalimentaire-logistique. Le focus sur ce nœud est directement lié à l'importance centrale de ces secteurs pour le fonctionnement de nos sociétés modernes. La question n'est pas de qualifier la probabilité d'occurrence d'une crise (c'est-à-dire, d'un problème localisé se propageant dans l'ensemble des activités humaines), mais de cerner plus précisément comment les propagations en chaîne dont j'ai parlé plus haut se font, et où se situent les points de fragilité essentiels du système. En fait, la variété de risques de ce type est très grande, et couvre de très nombreux secteurs et infrastructures au-delà des quatre retenus. Une modélisation complète est inenvisageable dans un premier temps, et probablement même à terme. C'est pour cette raison que nous nous sommes restreints à un noyau qui nous paraît incontournable.

² La même remarque est valable pour la cosmologie.

Vous défendez l'idée qu'il faille réduire la complexité de nos sociétés afin de limiter les risques d'effondrement, en vous basant notamment sur les travaux de Joseph Tainter. Les modèles peuvent-ils y contribuer ? Si oui, comment ?

La réduction de la complexité est la seule voie possible pour atténuer les risques d'effondrement. Il est difficile de prouver cette assertion, mais d'une part je ne suis pas le seul à avoir ce point de vue, et d'autre part, il est évidemment que passé un certain seuil de complexité, le système devient ingérable, et donc subit plus qu'il ne contrôle sa propre évolution. En fait, historiquement, un effondrement est toujours le résultat, à un niveau très macroscopique d'analyse, d'un besoin de simplification, qui n'a pas pu se réaliser autrement. Les circonstances varient considérablement, de même que les causes d'effondrement, d'un exemple historique à l'autre, mais le résultat en termes de simplification semble être une constante. Dans l'Histoire, ce processus n'a quasiment jamais été mise en œuvre de manière volontaire.

Joseph Tainter met en évidence les rendements décroissants de la complexité dans un très grand nombre de sociétés historiques (y compris la nôtre). Très brièvement, l'accroissement de complexité est une voie assez naturelle d'augmentation d'efficacité dans la résolution des problèmes auxquels les sociétés sont confrontées, qu'il s'agisse de problèmes externes ou de problèmes produits par leur propre fonctionnement. Dans les premiers temps (phases initiales de développement d'une société), une augmentation de complexité produit un bénéfice supérieur aux coûts induits. C'est donc relativement naturellement que la complexité augmente, même si la question n'est pas formulée dans ces termes dans les sociétés en question. Toutefois, ce ratio coût/bénéfice tend à décroître dans le temps. Les effets de cette décroissance ne sont généralement pas ressentis, car les principaux bénéficiaires de la complexité (les élites) sont également les moins susceptibles d'en porter les coûts. La décroissance de ce ratio se poursuit jusqu'à un point où les coûts d'un accroissement de complexité dépassent les bénéfices relatifs de celle-ci. C'est à partir de ce seuil que les sociétés deviennent vulnérables à l'effondrement, qui peut alors survenir pour de nombreuses raisons, dépendantes du contexte spécifique de chaque société. Les critiques de la théorie de Tainter sont mineures. Elles se focalisent sur son approche plutôt descriptive qu'explicative et généraliste plutôt que particulariste. Mais à ce niveau macroscopique d'analyse, le poids des circonstances spécifiques ou des décisions humaines particulières tend à s'effacer devant des tendances de plus long terme (ce point nécessiterait un long débat).

Sur ces questions, l'objectif de notre équipe est de comprendre le type de complexité des sociétés modernes afin de trouver des moyens de s'organiser institutionnellement et géographiquement face aux problèmes auxquels nous sommes confrontés, qu'il s'agisse de problèmes environnementaux ou de questions de développement humain (les deux n'étant pas indépendants). Dans ce cadre, nous développons aussi un projet de recherche et différents éléments de modélisation, qui portent sur les modes d'organisation locaux possibles face aux dégradations annoncées dans le courant du siècle. Le projet vise à la fois la construction et la caractérisation de l'empreinte environnementale de modes d'organisation sociotechniques alternatifs, mais aussi sur la question de la prise de décision collective à ce sujet, via par exemple des méthodes d'ingénierie des processus participatifs.

À titre personnel, je pense qu'il n'est pas possible de réduire volontairement la complexité au niveau national, européen ou mondial, d'autant plus que ce n'est pour l'instant pas perçu comme une nécessité. De fait, je pense qu'on n'échappera pas à un effondrement global, mais ce n'est pas là l'enjeu principal. La question des modes d'organisation alternatifs pendant une période d'effondrement (qui peut être très longue) est elle-même passablement complexe. Face à cette complexité, serons-nous capables d'anticipation collective, ou allons-nous comme dans les effondrements du passé simplement nous adapter de façon réactive et plus ou moins brutale ? C'est à mon sens le principal enjeu. Je ne suis pas certain que l'effort de modélisation que l'on a entrepris dans l'équipe sur ce front soit à la hauteur du défi. Cette

remarque ne porte d'ailleurs pas que sur les travaux de notre équipe – dont la contribution à cette problématique ne peut être que modeste vu sa taille.