



HAL
open science

Les outils de modélisation numérique actuels peuvent-ils nous aider à penser et faire face aux crises ?

Hugo Le Boulzec, Sacha Hodencq, Emmanuel Prados

► To cite this version:

Hugo Le Boulzec, Sacha Hodencq, Emmanuel Prados. Les outils de modélisation numérique actuels peuvent-ils nous aider à penser et faire face aux crises ?. Zoé Steep. Les limites à la croissance - Meadows: questions raisonnées, Excès, pp.157-164, 2023, Voix publiques, 978-2-9581188-7-7. hal-04868462

HAL Id: hal-04868462

<https://inria.hal.science/hal-04868462v1>

Submitted on 6 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

LES OUTILS DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE ACTUELS PEUVENT-ILS NOUS AIDER À PENSER LES CRISES ET LEUR FAIRE FACE ?

Premier modèle numérique dit systémique, World3 a permis de révéler les limites d'une croissance physique des sociétés humaines. À partir de la dynamique des systèmes, les auteurs des *Limites à la croissance* ont modélisé les interactions complexes entre les systèmes humains et terrestres selon un panel de scénarios. Dans plusieurs cas, la modélisation conduit à un effondrement des ressources, de la production agricole et industrielle et de la population, révélant la possibilité d'émergence d'une crise globale. Il y a cinquante ans, World3 a donc permis d'identifier et de penser les crises à venir.

Malgré ce message fort, malgré les appels successifs à l'action et les avancées en termes de modélisation des systèmes humains et terrestres, la trajectoire tendancielle de développement des sociétés humaines est restée la même. Le recours massif et non soutenable aux ressources naturelles reste d'actualité. Quelle part de responsabilité ont les limites intrinsèques des modèles et de leurs usages dans cet échec ? Faut-il les raffiner pour faire face aujourd'hui à notre situation historique de crise multiforme ?

Limites des modèles intégrés globaux face aux crises

Penser et faire face aux crises : définition du cadre

Le rapport des *Limites à la croissance* a permis de penser les crises de manière agrégée. La compréhension de l'impact des systèmes humains sur les systèmes naturels et celle du fonctionnement de ces derniers ont considérablement progressé au cours des dernières décennies, et plusieurs cadres de pensée permettent aujourd'hui de définir le concept de crise socio-écologique. La notion de limite planétaire est l'un d'entre eux.

Cinq des neuf limites planétaires ont aujourd'hui été dépassées. Cela signifie que l'humanité se situe au-delà de plusieurs seuils compromettant les conditions favorables dans lesquelles elle a pu se développer. Mais cela compromet aussi sa capacité à vivre durablement dans un écosystème sûr, c'est-à-dire évitant les modifications brutales et difficilement prévisibles de l'environnement planétaire (Rockström *et al.*, 2009).

En 2012, l'économiste Kate Raworth complète les limites planétaires en leur ajoutant un « plancher social » : onze frontières intérieures correspondant aux besoins humains essentiels. Les limites planétaires et le plancher social forment alors un anneau au sein duquel les besoins de chacun sont satisfaits tout en préservant l'environnement dont l'humanité dépend.

Des interrelations fortes existent entre les enjeux sociaux et écologiques (Laurent, 2015). Celles-ci nous amènent à rassembler crises sociales et crises écologiques en une seule et même crise : une crise socio-écologique qui touche le vivant dans son ensemble et tous les aspects de la société humaine ; une crise où causes et effets sont interdépendants et peuvent donner lieu à des modifications brutales et difficilement prévisibles.

Que signifie alors « penser ces crises et leur faire face » ? Avant même de penser et faire face, il s'agit d'identifier et de comprendre les processus sous-jacents et correspondants à ces crises. Penser peut alors consister à imaginer les différentes trajectoires qu'elles peuvent suivre et les différentes formes qu'elles peuvent prendre ; à les évaluer au regard de leurs impacts et probabilités ; à prévoir leur temporalité. Cela peut aussi consister à les discuter collectivement. Deux types d'actions peuvent être considérés pour faire face : agir sur les facteurs qui sont en amont des risques, de façon à réduire leurs probabilités d'occurrence et leur amplitude ; améliorer nos capacités d'adaptation (démarche se plaçant davantage dans une logique ou une temporalité de réaction) : par exemple, les « mitigation and adaptation » des rapports du GIEC face à la crise du dérèglement climatique. Dans tous les cas, *faire face* amène à prendre des décisions et à agir sur le monde.

Faire face aux crises nécessite en particulier des prises de décision pour orienter l'action collective. Dans ce domaine, les crises apparaissent comme un exemple typique de problème complexe (Nouvel, 2002) où se présentent :

- Des variables qui s'influencent mutuellement ;
- Un contexte de forte incertitude ;
- De multiples acteurs aux systèmes de valeurs divergents.

Comment la modélisation peut-elle – ou non – répondre à ces trois facettes de la complexité ?

Les modèles d'évaluation intégrés

Les modèles d'évaluation intégrés¹ sont des simulations numériques des interactions complexes et des rétroactions entre le système socio-économique et le système naturel (Van Beek *et al.*, 2020). Ils jouent un rôle central dans l'analyse et l'élaboration de scénarios de transition, et se situent à l'interface entre science et politique. Les modèles d'évaluation intégrés utilisés actuellement sont apparus dans leur forme initiale à la fin des années 1970. Ils ont progressivement gagné en complexité et en intérêt avec la politisation des enjeux climatiques et de pollution atmosphérique². Ils opèrent principalement au niveau mondial et multirégional, et deux principaux courants de modèles d'évaluation intégrés coexistent actuellement dans la littérature³.

Les modèles de transition : ils sont construits autour de modules centraux – principalement économiques et énergétiques – correspondant au développement historique de chaque modèle. Ils reposent sur une forte désagrégation⁴ sectorielle et incorporent une grande variété de modules (par exemple : climat, pollution, usage des sols, agriculture, économie, énergie). Ces modèles permettent typiquement d'évaluer les impacts environnementaux d'un scénario de transition technologique et économique. Ils sont essentiels dans l'analyse des trajectoires de transition et fournissent notamment les scénarios d'évolution des systèmes économiques, énergétiques et d'utilisation des sols actuellement utilisés dans les travaux du GIEC portant sur l'atténuation (groupe de travail n° 3).

1. « *Integrated Assessment Models* » (IAM) dans la littérature anglo-saxonne.

2. Voir la notice 18.

3. Cette segmentation est simplificatrice et ne permet pas de pleinement décrire la diversité des modèles au sein de chaque catégorie. De nombreux modèles ont été développés ; pour plus de détails sur les IAM, voir la notice 19.

4. Un modèle est dit « désagrégé » lorsqu'il détaille les objets qu'il prend en compte comme, par exemple, les secteurs économiques ou les technologies. La désagrégation peut aussi être spatiale ; par exemple, le modèle peut identifier séparément les États ou plusieurs groupes d'États...

Les modèles d'impact : ils se concentrent sur le lien entre l'économie et le climat et reposent sur deux outils méthodologiques controversés (Pottier, 2016) : les fonctions de dommages⁵ et les analyses coûts-bénéfices⁶. Ces modèles sont très agrégés⁷ et ne présentent pas de désagrégation sectorielle. Leur objectif est d'estimer les trajectoires d'atténuation du changement climatique qui réduisent au maximum les impacts estimés sur le système économique⁸. Ces modèles sont notamment utilisés dans l'élaboration des politiques climatiques américaines.

Limites des modèles d'évaluation intégrés pour penser les crises

La majorité des modèles d'évaluation intégrés présentent de nombreuses limites impactant leur capacité à nous aider à penser les crises. Les modèles de transition ont été élaborés dans l'objectif de proposer des trajectoires technologiques de transition, notamment des mix énergétiques régionaux, selon plusieurs approches : tendancielle, avec une projection des trajectoires actuelles ; exploratoire, dans laquelle les trajectoires environnementales d'un mix donné sont étudiées ; normative, définissant au préalable un objectif quantifié – principalement lié au réchauffement climatique – et analysant les technologies permettant de l'atteindre. Ils ne permettent donc de répondre qu'à un type de questions assez limité.

Dans la majorité des modèles de transition, ces trajectoires sont modélisées à partir d'hypothèses socio-économiques exogènes telles que, par exemple, la croissance puis la stabilisation à neuf milliards de personnes de la population mondiale, ou le maintien de la croissance du produit intérieur brut à 2 %. En d'autres termes, les évolutions de ces variables

5. Les fonctions de dommages modélisent les impacts économiques du changement climatique en reliant directement des grandeurs caractéristiques de celui-ci (par exemple la température ou les émissions de CO₂) à une ou plusieurs grandeurs économiques comme le niveau du PIB ou sa croissance.

6. Les analyses « coût-bénéfice » consistent à attribuer des valeurs monétaires à l'ensemble des coûts et l'ensemble des bénéfices d'une action politique, puis à comparer ces valeurs.

7. C'est-à-dire qu'ils n'utilisent que des variables très globales, comme par exemple le PIB mondial, la somme des dettes des états, la population mondiale, le revenu moyen...

8. Ces impacts peuvent être négatifs (par exemple, la chute du stock de poissons dans certaines régions) ou positifs (l'augmentation des récoltes agricoles dans certaines régions).

socio-économiques sont scénarisées. Celles-ci ne sont donc pas sujettes à des rétroactions, c'est-à-dire à des processus ou des dynamiques internes au modèle modifiant ces variables socio-économiques elles-mêmes (que cela soit suite à des changements de gouvernance, des impacts environnementaux, ou à des chocs externes). Dans le cas spécifique des modèles de la seconde catégorie, qui reposent principalement sur la théorie économique néoclassique (et ne considèrent donc pas le capital naturel⁹), la population et le progrès technologique constituent l'une et l'autre des variables exogènes. Aucune rétroaction du changement climatique sur ces variables et sur les systèmes naturels n'est donc intégrée dans la modélisation. Or il est essentiel de prendre en compte et comprendre toutes ces boucles de rétroactions si l'on veut penser complètement ces crises et leur faire face.

Enfin, les modèles des deux catégories identifiées n'intègrent pas plusieurs aspects importants, dont deux points essentiels. Premièrement, les enjeux sociaux sont souvent ignorés. La majorité des modèles d'évaluation intégrés considèrent un agent unique, simplifiant l'hétérogénéité des comportements des acteurs face aux transitions sociétales et ignorant les notions de justice et d'équité dans la modélisation (Vågerö & Zeyringer, 2023). Les crises sociales ou les enjeux de gouvernance ne peuvent donc pas émerger, et les impacts prévus manquent de réalisme sociologique (Saujot *et al.*, 2022). Deuxièmement, le secteur financier joue un rôle minimal – voire nul – dans la modélisation intégrée actuelle. Cela empêche toute discussion sur les enjeux de crise systémique émergeant d'une déstabilisation du secteur financier dans un contexte de transition. Certains modèles répondent progressivement à ces enjeux, tels que MUSE pour l'approche multi-agents (Giarola *et al.*, 2022), ou TEMPLE pour la prise en compte des liens entre énergie, finance et économie (Jacques *et al.*, 2022). Mais aucun modèle n'intègre cependant l'ensemble de ces aspects.

Ainsi, bien que ces modèles proposent une représentation des systèmes humains et terrestres de plus en plus fine, ils ne permettent qu'une identification partielle des crises

9. L'ensemble des ressources naturelles renouvelables et non renouvelables présentant une valeur pour le système productif.

potentielles, en se cantonnant souvent à la crise climatique, et plusieurs rétroactions essentielles restent absentes. Afin de pallier ces limites, comment faire évoluer les modèles pour mieux modéliser ?

Doit-on revenir à des modèles systémiques actualisés ?

La modélisation systémique proposée par les auteurs des *Limites à la croissance* dans le modèle World3 a permis l'identification de trajectoires menant potentiellement à des crises socio-écologiques majeures. Le modèle présentait une structure agrégée, en raison d'un manque de données historiques pour la calibration des variables et paramètres, d'une connaissance des systèmes humains et terrestres moins fine qu'actuellement, et d'une puissance de calcul limitée. Les progrès scientifiques et techniques ont par la suite permis une modélisation plus fine des systèmes humains et terrestres, notamment dans les modèles d'évaluation intégrée. Pourtant, la majorité de ces modèles ne sont pas pleinement systémiques et souffrent encore et toujours d'un certain nombre de limitations liées à des difficultés méthodologiques et de quantification¹⁰, à un manque de connaissances des interactions¹¹ ou encore à des choix de périmètre trop étroit concernant les secteurs pris en compte dans le modèle¹², ce qui handicape notre capacité à penser les crises.

Aussi le développement de nouveaux modèles systémiques encore plus détaillés, plus précis et plus complets pourrait-il sembler tentant. Cette démarche de complexification des modèles est cependant limitée par quelques barrières et peut mener à des impasses.

Limites à une complexification croissante

En effet, améliorer le niveau de détail des exercices de prospective à long terme, multisectoriels et multirégionaux n'impliquerait pas nécessairement une meilleure précision des résultats. Une tendance inverse pourrait émerger en raison de l'incertitude forte caractérisant les phénomènes étudiés. L'incertitude

10. En ce qui concerne les enjeux sociaux ou l'hétérogénéité des agents par exemple.

11. On peut citer ici les interactions entre énergie et économie ou entre matières premières et énergie.

12. Prenant par exemple insuffisamment en compte le secteur de la finance ou le secteur minier.

apparaît en modélisation comme un ensemble d'imprécisions se propageant jusqu'aux résultats lors de la simulation. Ces imprécisions peuvent être associées à deux types d'incertitudes :

- L'incertitude épistémique, relative à la connaissance partielle des processus modélisés. Elle est intrinsèque à la structure du modèle ;
- L'incertitude présente dans les données utilisées pour estimer les paramètres du modèle ainsi que les variables exogènes dont les valeurs sont sujettes à une forte variabilité¹³.

Leur compréhension et leur quantification ne sont pas toujours aisées, notamment dans le cas de l'incertitude épistémique. Leur accumulation pendant le processus de simulation présente un danger majeur car elle a régulièrement tendance à être exponentielle¹⁴. Plus le modèle est complexe et plus il est difficile, voire impossible, de comprendre et anticiper celle-ci. Dans de nombreux cas, une hyper-complexification du modèle peut aboutir à lui faire dire n'importe quoi. Par ailleurs, comme nous venons de le mentionner, les modèles systémiques permettant de penser ces crises sont confrontés au fait qu'ils reposent sur un couplage de facteurs, dont un certain nombre sont très mal compris (comme les phénomènes socio-politico-économiques). Or, comme chronométrer à la main une course athlétique avec un chronomètre au millième de seconde, coupler des modules très détaillés et précis avec des modules très grossiers et reposant sur des paramètres très incertains n'a pas de sens. Le niveau de précision de tous les modules doit être limité à celui du module le moins précis. Ainsi, une sur-complexification peut donner une impression de précision tout en aboutissant à des résultats quantitativement absurdes et faux. Une simplification intelligible et appropriée peut en revanche permettre d'aboutir à des résultats qualitativement plus justes. Un arbitrage entre simplification et complexification à chaque étape de la modélisation est indispensable, afin d'atteindre un niveau de simplicité maximal pour un objectif donné (Legay, 1997).

13. Ces variables ne sont d'ailleurs généralement pas endogénéisées (c'est-à-dire estimées *via* des équations faisant partie du modèle) car leurs dynamiques dépendent d'objets non représentés dans le modèle et/ou d'interactions inconnues ou trop complexes avec les autres variables du modèle.

14. Qui se traduit par une augmentation toujours plus rapide et qui finit par « exploser »...

Limites observées de l'impact politique réel des modèles

Indépendamment de ces considérations techniques, il est désormais légitime de se poser une autre question clé : la meilleure représentation du réel supposément atteinte par la complexification des modèles augmente-t-elle réellement son impact politique ? Autrement dit, génère-t-elle davantage d'actions ou de « meilleures » réponses politiques face aux crises ? Une analyse historique de la réception politique et de l'utilisation des résultats des modèles démontre la différence entre la vérité scientifique et la vérité politique. Ainsi, il ne suffit pas d'avoir raison scientifiquement pour avoir un impact sur le réel, malgré la légitimité apparente de la parole scientifique. En 1972, la publication du rapport a eu un retentissement fort dans le débat public, mais des conséquences limitées – voire nulles – sur les trajectoires tendancielle¹⁵. Plus récemment, l'inquiétude croissante observée dans les rapports du GIEC et le consensus alarmiste de presque 15 000 scientifiques signataires des « World Scientists' Warning to Humanity » successifs n'ont pas permis d'infléchir la trajectoire des impacts socio-écologiques. Cela pose à la fois la question de la volonté politique sur les enjeux socio-écologiques, celle de la pertinence du format de valorisation et de vulgarisation des travaux scientifiques sur ces thématiques, enfin celle du rôle des scientifiques dans l'interface entre science et société.

En adoptant une approche systémique, le modèle World3 a permis de représenter les limites d'une croissance physique infinie dans un monde fini et les crises potentielles en résultant. Malgré la puissance du message, l'action politique qui s'en est suivie est restée marginale. Ces travaux ont donné naissance aux modèles d'évaluation intégrés actuellement utilisés dans les exercices prospectifs. Ils participent à la réflexion et à l'aide à la décision quant aux crises sociales et écologiques auxquelles nous faisons face, mais restent limités dans leur capacité même à envisager les crises dans leur complexité. Leurs effets politiques réels observés sont faibles, là encore. Une réflexion sur de meilleures pratiques de modélisation et plus largement sur le rôle du modélisateur semble donc nécessaire¹⁶.

15. Voir les notices 6 et 10.

16. Voir la notice 22.