



Transdisciplinarité “ forte ” en Anthropocène : retour d’expérience d’un dialogue croisé entre sciences sociales et modélisation

Louis Delannoy, Angélique Palle, Noémie Rebière, Baptiste Andrieu

► To cite this version:

Louis Delannoy, Angélique Palle, Noémie Rebière, Baptiste Andrieu. Transdisciplinarité “ forte ” en Anthropocène : retour d’expérience d’un dialogue croisé entre sciences sociales et modélisation. *Hérodote - Revue de géographie et de géopolitique*, 2023, N°188 (1), pp.41-52. <10.3917/her.188.0041>. <hal-04087637>

HAL Id: hal-04087637

<https://hal.science/hal-04087637v1>

Submitted on 3 May 2023

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 CC0 1.0 - Universal - International License

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/369473731>

Transdisciplinarité « forte » en Anthropocène : retour d'expérience d'un dialogue croisé entre sciences sociales et modélisation

Article in *Hérodote* · March 2023

DOI: 10.3917/her.188.0041

CITATIONS

0

READS

33

4 authors, including:



Louis Delannoy

National Institute for Research in Computer Science and Control

11 PUBLICATIONS 66 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Angélique Palle

Institute for Strategic Research (IRSEM, Paris)

61 PUBLICATIONS 157 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Baptiste Andrieu

ISTerre

8 PUBLICATIONS 22 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Integration of variable renewable energy sources into power networks / Intégration des ENR variables dans le système électrique [View project](#)



Climate security, crisis anticipation and management [View project](#)

Transdisciplinarité 'forte' en Anthropocène : retour d'expérience d'un dialogue croisé entre sciences sociales et modélisation

'Strong' transdisciplinarity in the Anthropocene: lessons from a cross dialogue between social and modeling sciences

Louis Delannoy, Angélique Palle, Noémie Rebière, Baptiste Andrieu

Coordonnées postales et mail :

Louis Delannoy : INRIA, 655 Av. de l'Europe, 38330 Montbonnot-Saint-Martin / delannoy.louis@outlook.com

Angélique Palle : IRSEM, Ecole Militaire case 37, 1 place Joffre 75007 Paris / angelique.palle@gmail.com

Noémie Rebière : Institut Français de Géopolitique / rebierenoemie@protonmail.com / Le Thuret, 41170 Arville.

Baptiste Andrieu : ISTerre, 1381, rue de la Piscine 38610 Gières / baptiste.andrieu@theshiftproject.org / 2 rue des violettes 38100 Grenoble

Pas de cartes ni graphiques.

Résumé (1000 signes) français

En établissant une causalité entre les activités des sociétés humaines et la transformation des phénomènes biophysiques globaux, la notion d'Anthropocène a imposé des approches systémiques et transdisciplinaires, seules à même de saisir l'ampleur des enjeux soulevés. Le dialogue proposé par cet article s'inscrit dans la lignée de ces travaux récents. Il rassemble deux collectifs de jeunes chercheurs, l'un en sciences sociales l'autre en sciences de la modélisation qui, à travers une interaction croisée, explorent les défis pratiques de l'analyse des risques systémiques globaux. Les échanges tenus soulignent les apports mutuels des sciences dures et sociales et illustrent la pertinence de la modélisation pour tester ou valider des trajectoires de transitions écologiques, tout en exposant ses propres limites épistémologiques et méthodologiques. Enfin, ce dialogue étend la notion de transdisciplinarité 'forte', dans laquelle les interactions entre disciplines auraient lieu à chaque étape du processus de création scientifique, en opposition à une transdisciplinarité "faible", où les échanges seraient cloisonnés à certains temps précis.

Résumé (1000 signes) anglais

By establishing a causality between the activities of human societies and the transformation of global biophysical processes, the notion of the Anthropocene has imposed systemic and transdisciplinary approaches, the only ones capable of grasping the magnitude of the issues raised. The dialogue proposed in this article is in line with this recent work. It brings together two groups of young researchers, one in the social sciences and the other in modeling

sciences, who, through cross interaction, explore the practical challenges of global systemic risk analysis. The exchanges highlight the mutual contributions of hard and social sciences and illustrate the relevance of numerical models to test or validate ecological transition trajectories, while exposing its own epistemological and methodological limitations. Finally, this dialogue extends the notion of 'strong' transdisciplinarity, in which interactions between disciplines would take place at every stage of the scientific creation process, as opposed to 'weak' transdisciplinarity, in which exchanges would be compartmentalized at certain specific times.

Remerciements : si cet article a été écrit à huit mains, par deux modélisateurs et deux géopoliticiennes, il est le résultat d'interactions entre deux groupes de recherche que nous souhaitons ici remercier et en particulier, Audrey Sérandour, Wahel Rashid, Nicolas Jonquieres, Karine Watrin, Simon Chazel, François Verzier, Antonin Berthe et Hugo Martin.

Introduction

La mondialisation des échanges et l'interconnexion des sociétés ont fait émerger un nouveau type de crises dites "systémiques". Susceptibles de générer des effets de ruptures importantes, ces crises interagissent à tel point qu'elles ne formeraient plus qu'une crise globale polymorphe, privant le terme de "crise" de son sens premier puisqu'il ne préfigure plus une issue mais désigne une tourmente permanente sans temporalité, gouvernance ni réponse simple et schématique [Revault d'Allonnes, 2013]. Au cœur de ces crises multiples ou mégachocs, se trouvent pour une large part les conséquences des activités humaines sur leur environnement : zoonoses liées à la destruction des habitats naturels de certaines espèces, ruptures d'approvisionnement en ressources agricoles ou énergétiques, événements climatiques extrêmes plus fréquents et intenses, etc. Pour témoigner de l'empreinte récente et durable des activités humaines sur les processus géologiques, climatiques et environnementaux, il est communément admis que la Terre est entrée dans une nouvelle époque géologique, l'Anthropocène [Bonneuil et Fressoz, 2016].

La capacité des territoires, du secteur privé, des États et de la communauté internationale à faire face aux risques et crises systémiques globaux est l'un des éléments conditionnant un futur soutenable. Les efforts entrepris se heurtent toutefois à un manque : les acteurs n'ont à ce jour ni la culture ni les outils pour mettre en œuvre une approche qui saisit la complexité des risques systémiques globaux et leurs effets en cascade (par exemple, les conséquences multiples de coupures de courant prolongées ou de périodes de sécheresse). Dans ce contexte, des outils de simulation numérique, aussi appelés 'modèles', peuvent être utilisés afin d'appuyer des politiques visant à réduire les vulnérabilités liées aux transitions écologiques, pour imaginer la typologie des crises de demain ou pour la simulation d'exercices de gestion de crise. Pour répondre à de tels objectifs, les modèles doivent impérativement s'inscrire dans une approche systémique, concept hérité de la dynamique des systèmes appréhendant un système complexe non pas par la somme de ses sous-systèmes mais par l'analyse des interrelations entre ceux-ci.

La notion d'Anthropocène impose des approches systémiques et transdisciplinaires, seules à même de saisir l'ampleur des enjeux soulevés. Le paysage de la recherche français, où de nombreuses initiatives ont émergé, se fait l'écho de ce besoin. Les ateliers d'écologie

politique (Ecopols) qui ont vu le jour à la suite de la création de celui de Toulouse (AtEcoPol) rassemblent des chercheurs et des chercheuses soucieux de se former ou *a minima* de s'informer sur d'autres disciplines que les leurs. Des écoles d'été interdisciplinaires ont été organisées par des unités de recherche comme celle "Autour du 2^o" organisée en 2017 et 2019 par l'Université de Grenoble Alpes ou "Anthropocene Facts", visant à fournir un référentiel en libre accès de modules éducatifs [Mathy, Labussière, Lavorel, Lebel, Schmitt, 2021]. En 2022, le colloque "Archipel"¹ sur les enjeux de l'Anthropocène a regroupé des chercheurs de tous horizons pour définir ensemble des axes de collaboration et former une communauté de recherche francophone.

Le dialogue proposé par cet article s'inscrit dans la lignée de ces évolutions et ces travaux récents. Il rassemble deux collectifs de jeunes chercheurs l'un en sciences sociales étudiant les ressources, notamment sous l'angle géopolitique, l'autre en sciences de la modélisation, qui rassemble principalement des doctorants et jeunes docteurs du laboratoire ISTerre et de l'équipe de recherche STEEP (INRIA). Cet article présente dans un premier temps les deux groupes et relate les modalités de leur rencontre. Il expose ensuite les problématiques d'interdisciplinarité relevées sur les plans théoriques et pratiques, et propose un protocole méthodologique pour les surmonter. Enfin, il étend la notion de transdisciplinarité 'forte', en opposition à la transdisciplinarité 'faible', et discute des critères permettant son identification et son développement, notamment à travers la proposition d'un découpage en trois temps de collaboration.

Rencontre autour des risques systémiques globaux : enjeux d'un dialogue entre sciences sociales et sciences de la modélisation

Modéliser les risques systémiques pour penser les crises actuelles et futures

Il est en pratique possible de distinguer deux types de risques systémiques² globaux, en fonction des processus en jeu : les risques de contagion systémique à court terme (mois ou années) et les risques tendanciels à long terme (décennies) [Longaretti, 2020]. Les premiers, plus intermittents et aléatoires, font référence à la propagation de chocs qui, amplifiés par des mécanismes de rétroaction³, se propagent pour initier des défaillances ou des catastrophes intersectorielles en cascade dans différents secteurs. La crise financière de 2007-08 ou la propagation rapide de l'épidémie de COVID-19, deux événements qui ont eu de graves répercussions sur nos systèmes sanitaires, sociaux et économiques, en sont de parfaits exemples. Les seconds, les risques tendanciels à long terme, émergent de la double relation entre complexité et énergie, et de la transgression des limites biophysiques du système mondial actuel (illustrée par la transgression des limites planétaires) [Steffen et al., 2015]. Leur situation est d'autant plus préoccupante que la détérioration des fonctions vitales de la planète, induite par l'activité humaine, ne cesse de s'accélérer, rendant *in fine* possible l'effondrement partiel ou total de la biocapacité planétaire. La vulnérabilité du système est d'autant plus mise à l'épreuve que nous entrons dans une ère de grande

¹ Le site du colloque est accessible à l'adresse : <https://archipel.inria.fr/> celui d'Anthropocene Facts à l'adresse <http://www.afacts.lautre.net/>

² Les risques sont "systémiques" au sens où ils menacent l'existence même du système globalisé.

³ C'est à dire les phénomènes d'influence mutuelle entre variables produisant des effets stabilisants ou déstabilisants.

incertitude quant à notre capacité à produire assez d'énergie décarbonée pour alimenter le système tout en limitant le dérèglement climatique.

Les sciences de la modélisation offrent des moyens techniques pour analyser les interdépendances complexes. Cependant, les modèles numériques de risques adoptant une approche systémique sont peu nombreux. Pour les risques de long-terme, notons l'iconique modèle World3 ou ses héritiers revendiqués World7, Earth4 et MEDEAS ainsi que dans un cadre plus stylisé TranSim, EUROGREEN et TEMPLE, entre autres. Pour les risques de court-terme, seuls les modèles ERRE ou E3ME paraissent pertinents, sans toutefois s'abstraire du cadre de l'économie néoclassique, peu pertinent pour ce genre d'exercice⁴ [Pottier, 2016]. Au sein du territoire français, diverses actions scientifiques de modélisation hétérodoxe⁴ ont récemment émergé, notamment au sein de l'équipe de recherche STEEP de l'INRIA, du laboratoire ISTerre, du groupe modélisation de l'Agence Française de Développement (AFD) ou de l'initiative IRIS menée par Carbone 4. Toutes ces actions sont relativement récentes et illustrent le retard pris dans la modélisation et plus largement dans les politiques d'adaptation et d'atténuation des risques systémiques globaux.

Un objectif partagé par ces modèles est d'identifier les boucles de rétroaction critiques entre différents secteurs et les sources de vulnérabilité du système à des aléas. Il est à ce stade primordial de comprendre que les modèles ne sont pas capables de prédire le futur et ils n'ont pas vocation à le devenir vu leurs cadres méthodologiques et épistémologiques. Leur utilisation permet seulement de définir un ensemble de futurs possibles en se basant sur un certain nombre de critères socio-économiques et physiques comme la disponibilité géologique des matières premières. Bien souvent, les enseignements des modèles sont avant tout qualitatifs, quelquefois semi-quantitatifs [Verburg et al., 2016]. Leur portée est également limitée par les incertitudes d'ordres sociopolitiques, géopolitiques, etc. La collaboration entre modélisateurs et chercheurs en sciences humaines et sociales permet de préciser les implications sociales, politiques, économiques, géopolitiques et stratégiques des différents choix possibles.

Intégrer le raisonnement géopolitique à la modélisation des risques systémiques

L'école française de géopolitique construite autour de l'héritage d'Yves Lacoste [Lacoste, 2008] et attachée aux analyses multiscalaires offre des perspectives d'interdisciplinarité avec les modèles systémiques en cours de développement. La pratique du diatope⁵ notamment, propose l'analyse de systèmes géopolitiques construits à plusieurs échelles autour des notions d'enjeux, d'acteurs et de territoires. Parfois interprétées comme des modèles systémiques qualitatifs par les équipes de modélisateurs, ces analyses en diatope ont pu servir de base à la construction du dialogue interdisciplinaire. Les évolutions récentes de la géopolitique des ressources ont également permis des entrées interdisciplinaires

⁴ Il existe en économie deux types d'approches : une dominante (l'école néoclassique) et l'autre hétérodoxe. Cette dernière comporte divers courants, comme les Marxistes et les post Keynésiens, qui pointent du doigt les profonds manques conceptuels et pratiques de la première. Les modèles néoclassiques, par construction, ne peuvent en effet ni prévoir ni prendre en compte des phénomènes de crise à proprement parler et se placent, au mieux, dans une perspective de soutenabilité faible. C'est ce qui explique en partie que la plupart des modèles intégrés globaux ne présentent qu'un intérêt limité pour l'étude des risques systémiques couvrant le court et long terme.

⁵ Un diatope est une construction schématique qui permet de superposer en perspective cavalière différents plans d'analyse spatiale selon les ordres de grandeur.

autour d'objets de recherches communs, comme des études de chaîne de valeur de matières premières.

Le champ de la géopolitique des ressources a partiellement transformé ses objets de recherches au cours des deux dernières décennies pour absorber des questionnements liés à la notion de changements environnementaux globaux [Groupe Cynorrhodon, 2020], des transitions sociétales et des risques qui leurs sont associés. Plus précisément, l'effondrement de la biosphère, les changements climatiques, les politiques de transition écologiques recomposent les compétitions classiques d'accès ou de contrôle des ressources (énergies fossiles et minières, ressources hydriques, agroalimentaires, foncières, etc.). Parce qu'elles sont la condition des politiques publiques de transition récemment amorcées, comme le développement des batteries électriques pour la décarbonation des transports ou celui de nouveaux modèles agricoles, les ressources énergétiques ou agricoles sont des enjeux de transformations politiques, économiques et sociales des sociétés [Palle, 2021]. Leur analyse à travers le prisme des rapports de pouvoirs, du contrôle de l'accès, de la mise en ressource et de la distribution rejoint l'écologie politique, typifiée par le rapport Meadows [Meadows *et al.*, 1972].

Modalités d'une rencontre entre géopolitique des ressources et sciences de la modélisation

La première rencontre interdisciplinaire entre chercheurs en sciences de la modélisation⁶ et en géopolitique des ressources⁷ s'est faite lors du séminaire "Risques systémiques globaux : enjeux de modélisation pour une réflexion prospective", organisé les 2 et 3 septembre 2021. L'objectif de ce séminaire était de rassembler les chercheurs modélisant les risques systémiques globaux, des acteurs issus de la recherche en sciences humaines et sociales (SHS) ainsi que des acteurs institutionnels (ministère de la transition énergétique, ministère des armées, ADEME, etc.), concernés par les résultats de ces travaux de recherche voire "consommateurs" de leurs conclusions pour la définition des politiques publiques, notamment des outils de modélisation comme outils d'aide à la décision.

Cette première rencontre a matérialisé la nécessité d'une coopération ou *a minima* d'un dialogue sur les méthodologies et les objectifs de recherche portés par les deux équipes. Elle a en parallèle révélé les difficultés du dialogue interdisciplinaire, qu'elles aient trait au langage utilisé, à la destination et aux objectifs des travaux de recherche menés, à leur perception ou appropriation ultérieure par les pouvoirs publics, ou encore à la validité des méthodologies employées. Forts de cette expérience, les deux groupes ont organisé une suite en une série de séminaires méthodologiques pour explorer la possibilité de rendre opérationnel leur échange. Six séances ont eu lieu entre septembre 2021 et juin 2022, une quinzaine de chercheurs d'horizons scientifiques et institutionnels différents y participant.

⁶ Le groupe des modélisateurs est constitué de doctorants et jeunes docteurs de l'équipe de recherche STEEP (INRIA, Grenoble), du laboratoire ISTerre, de l'Environmental Justice Program de l'Université de Georgetown (USA) et du Shift Project, ainsi que de membres de l'Initiative IRIS menée par Carbone 4.

⁷ Recherches-Ressources est un groupe pluridisciplinaire et pluri-institutionnel de jeunes chercheurs, issus des sciences humaines et sociales (géopolitique, géographie, histoire, sciences politiques, sociologie politique, etc.), travaillant sur les ressources sous toutes leurs formes (matières premières, déchets, usages, etc.).

D'un dialogue à la mise en pratique de la transdisciplinarité, itinéraire méthodologique

Défis du dialogue interdisciplinaire

La première barrière à l'interdisciplinarité est celle du lexique propre à chaque discipline. La difficulté la plus grande surgit classiquement lorsqu'un même terme est utilisé pour définir deux concepts ou deux réalités différentes par les deux groupes. La notion de ressources "naturelles" est ainsi contestée par la géopolitique et la géographie politique des ressources qui proposent d'étudier la mise en ressources de matières naturelles partant du principe qu'une matière naturelle n'est jamais une ressource en soi mais que la ressource résulte d'un processus de mise en usage par les sociétés. De même, le traitement des échelles a posé question : la géographie partant du principe qu'il n'existe pas d'échelle en soi mais qu'elles résultent d'un processus de construction par les sociétés qui est susceptible d'évoluer. La pertinence d'une échelle d'analyse est ainsi le résultat d'un débat et non une convention.

La deuxième barrière à l'interdisciplinarité est la différence de prismes de lecture du monde, et donc d'approches. La démarche de modélisation vise dans un premier temps à comprendre et reproduire les interactions entre développement économique, consommation d'énergie, consommation de matières premières et impacts sur la biosphère. Cette première étape permet d'identifier les dynamiques à l'œuvre historiquement et les trajectoires futures possibles. Une analyse plus poussée permet d'effectuer des analyses de risques sur certains flux, pouvant avoir des conséquences en cascade. La démarche SHS, plus spécifiquement géopolitique, prend en compte une typologie de facteurs, en les analysant comme différents enjeux qui interagissent entre eux pour créer des situations de conflictualité, de compétition, de coopération, etc.

Deux exemples identifiés lors des séminaires collectifs illustrent cette deuxième barrière. Le premier concerne l'absence d'un certain nombre de variables dans les modèles, jugées pourtant essentielles par le groupe SHS dans la mesure où elles rendent les projections moins réalistes et laissent de côté certains impacts environnementaux et sociétaux. L'intégration d'une variable concernant la disponibilité en eau et les flux hydriques dans un scénario de production de biomasse peut donc faire l'objet d'échanges nourris. Le deuxième exemple concerne le choix de l'échelle géographique du modèle. Les modèles globaux divisent la plupart du temps le monde en grandes régions qui rendent impossible l'étude de certains enjeux dont l'appréhension demande des échelles fines. C'est le cas des enjeux liés à l'eau qui nécessitent de considérer les bassins versants. L'échelle temporelle employée dans les modèles, la plupart du temps très large (plusieurs années voire décennies), traduit des tendances de long terme. Ces modèles ne peuvent donc pas intégrer avec précision des événements en dessous de cette échelle temporelle : crises géopolitiques, grèves, invasions, etc. Enfin, l'hypothèse induite par défaut à la base de ces modèles globaux est celle d'un monde stable, sans troubles sociaux et effets de collaborations ou d'oppositions entre acteurs de la scène internationale. Ces limites résultent de compromis réalisés par les modélisateurs entre description précise des logiques mondiales, limites abstraites de certaines variables, puissance de calcul et lisibilité des résultats.

Un protocole méthodologique pour surmonter les barrières

La méthodologie employée pour faire face à ces barrières a d'abord consisté en deux formations croisées aux langages et aux approches de chacun des deux groupes lors des deux premières séances de travail. Dans la première séance, le groupe SHS s'est formé à la structure d'un raisonnement de modélisation (sources utilisées, nature des relations possibles entre les différents éléments du modèle, degré de complexité envisageable, types de résultats possibles et exploitables) pour y chercher des points d'entrée. Dans la seconde séance, c'est le raisonnement géopolitique multiscalaire qui a été présenté au groupe de modélisateurs qui ont cherché à identifier les relations modélisables entre acteurs et les données numériques associées pouvant alimenter le modèle et ont discuté les éventuels (re-)cadres scalaires possibles de leurs outils. Cet échange préliminaire a aussi permis d'identifier un certain nombre de termes clés⁸ pour les deux groupes, ensuite redéfinis pour permettre une compréhension commune.

Les quatre séances suivantes se sont composées d'études de cas pour proposer une analyse multidimensionnelle (économique, géopolitique, environnementale, technique, sociale, etc.). Afin de travailler sur un objet simple et compréhensible par l'ensemble des chercheurs, le choix s'est porté sur l'étude des flux du lithium, métal nécessaire pour l'électrification de la mobilité. Un exemple des dimensions multiples à l'œuvre ici est celui de la transformation d'une ressource de lithium en une réserve de lithium⁹. Anticiper les risques de tensions sur les approvisionnements en lithium nécessite donc de modéliser la demande, mais aussi les taux de progrès technologiques, les besoins en énergie et les prix. Les résultats doivent ensuite être interprétés avec un prisme géopolitique. Afin d'estimer les besoins en lithium pour le secteur de la mobilité, les modélisateurs trouvent des données ou font des hypothèses sur les points suivants : le lien entre parc de véhicules dans une région et PIB par habitant, le PIB par habitant régional futur, le taux futur d'électrification des véhicules, la quantité de lithium par batterie (dépendant des technologies futures et de l'autonomie désirée), la durée de vie des batteries et les taux de recyclage des batteries [Vidal et al., 2022]. Les flux de lithium entre pays dépendent ensuite des réserves de chaque pays au cours du temps, modélisées par ailleurs.

Seulement, le modèle sélectionné pour l'exercice ne peut pas prendre en compte les facteurs de nature géopolitique, comme par exemple un acteur étatique qui contraindrait un flux (blocage d'un territoire de transit, embargo économique, politique de nationalisation, etc). Les interactions entre les chercheurs visent alors à soulever les questions suivantes : quelles conséquences aurait cet événement non quantifiable sur la dynamique du flux, sur le système ? Comment intégrer des éléments non quantifiables au modèle ? Comment restituer une réalité complexe au travers d'un modèle qui "simplifie" nécessairement les objets analysés, tout particulièrement pour un modèle à échelle mondiale.

Retour d'expérience et propositions

⁸ Du côté des sciences de la modélisation, les termes suivants ont été identifiés comme clés : modèle, scénario, système, risques systémiques, acteurs, échelles géographiques), matières premières, flux, stocks, dynamiques temporelles, économie réelle. Du côté des sciences sociales, ceux-ci : diatope, analyse multiscalaire, acteurs, enjeux, échelles, territoires, représentations, ressources, matières premières et flux.

⁹ Les ressources de lithium sont constituées de l'ensemble des gisements de lithium présents dans la croûte terrestre. Les réserves de lithium représentent la part de ce lithium qui est économiquement, techniquement, politiquement et socialement exploitable à un instant t .

Divers temps de collaborations

Un premier temps de collaboration possible est identifié en amont de la modélisation. Il concerne particulièrement (i) sélection des variables du modèle et la possibilité d'intégrer des variables de coopération ou de conflictualité (sociales, économiques ou militaires) avec des effets sur les flux du système ; (ii) la caractérisation des variables : définition, rétrospective, dynamiques de changement, interdépendances, etc. Pour les variables de coopération ou de conflictualité directement issues d'hypothèses SHS, la définition de modes et l'étude des dynamiques de changement pouvant entraîner le passage d'un mode à un autre est une option considérée.

Un deuxième temps de collaboration est possible *in itinere*, c'est-à-dire lors du fonctionnement du modèle. Il consisterait à anticiper et définir un certain nombre de pas de temps, entre lesquels la simulation serait arrêtée pour permettre l'intervention des SHS sur les hypothèses ou le calibrage des variables. L'un des exemples les plus parlant concerne le taux de chômage d'une société. Son inacceptabilité sociale est telle qu'il semble peu réaliste de laisser un modèle le faire dépasser un certain seuil sans anticiper une réaction politique et sociale d'une ampleur telle qu'elle viendrait modifier profondément les hypothèses de la modélisation. L'alternative à cette collaboration *in itinere* consiste à endogénéiser certaines de ces variables, c'est-à-dire internaliser la façon dont certaines variables vont évoluer en fonction des paramètres du modèle. Les lois régissant l'évolution de ces variables sont complexes à définir et nécessitent par essence une expertise transdisciplinaire.

Un troisième temps de collaboration se situe après l'opération du modèle, pour l'analyse des conditions de réalisation du scénario. Il s'agit alors (i) de proposer un cadre organisationnel cohérent des flux physiques simulés, c'est-à-dire qui permette de les faire advenir tout en étant cohérents vis-à-vis des hypothèses initiales du scénario ; (ii) d'analyser après l'opération du modèle, les points de tension dans les résultats. Il s'agit de formuler des relations d'interdépendance telles que "ce résultat X est possible, mais il suppose que l'approvisionnement en eau de l'Egypte, qui provient à 95% de l'extérieur de son territoire, ne soit pas mis en péril".

Transdisciplinarité 'faible' vs. 'forte'

Lorsqu'un modèle a déjà été construit, il est souvent complexe de modifier sa structure pour intégrer de nouvelles variables. Ainsi, si les contraintes des SHS n'ont pas été intégrées dès le commencement du projet scientifique, les interactions risquent d'être bridées par les choix méthodologiques initiaux. Pour qu'une expérience transdisciplinaire soit concluante, toutes les étapes nécessaires à la création scientifique (ici : observation, hypothèses, modélisation, résultats, interprétation, conclusion) doivent donc être réalisées conjointement, et suivant un motif d'échange structuré, et transparent. Nous soutenons que ce processus, s'il est respecté, présente les caractéristiques d'une transdisciplinarité 'forte', en opposition à une transdisciplinarité 'faible' où les interactions entre SHS et modélisateurs seraient restreintes à certains temps uniquement, bien souvent en aval de la modélisation. Cette proposition d'extension pratique de la transdisciplinarité 'forte' et faible', théorisées par Max-Neef [2005], permet de remettre l'opérationnalité de la pratique au centre de la discussion. Elle nous permet également de poser les bases opérationnelles de ce qu'est la "manière d'être" transdisciplinaire [Rigolot, 2020].

Conclusion et perspectives futures

Les urgences sociales, environnementales, climatiques et économiques de l'Anthropocène requièrent des changements de paradigme nombreux. La recherche, en acteur clé des compréhensions socio-écologiques, se doit d'assumer pleinement sa mue, d'un fonctionnement en silos à un champ transdisciplinaire où les sciences dures et sociales interagissent pleinement. Ce changement d'approche connaît divers freins politiques, en plus de présenter des difficultés intrinsèques [Fini *et al.*, 2022]. Celles-ci se sont trouvées au cœur d'un dialogue croisé entre deux collectifs de jeunes chercheurs l'un en sciences sociales travaillant la question des ressources, l'autre en sciences de la modélisation, exposé dans le présent article.

Les enseignements principaux de cette rencontre soulignent les apports mutuels des sciences dures et sociales, tout en permettant de valider un certain nombre d'étapes nécessaires à la bonne compréhension et interaction des groupes. La construction d'un vocabulaire commun a notamment été la pierre fondatrice d'une collaboration sur le thème de l'incorporation de la géopolitique des ressources dans un modèle numérique de risques systémiques globaux. Les échanges tenus permettent de mettre en lumière la pertinence de la modélisation pour tester ou valider des trajectoires de transitions écologiques, tout en exposant ses propres limites épistémologiques et méthodologiques. Enfin, nous proposons une extension du concept de transdisciplinarité "forte", dans laquelle les interactions entre disciplines auraient lieu à chaque étape du processus de création scientifique, en opposition à une transdisciplinarité "faible", où les échanges seraient cloisonnés à certains temps précis. Une transdisciplinarité forte nécessite un investissement conséquent et une confiance importante entre chercheurs. De futurs travaux sont nécessaires pour affiner le protocole méthodologique esquissé ici et le mettre en œuvre sur de plus gros projets.

Ces travaux permettraient en outre de convaincre les décideurs publics d'intégrer des outils de visualisation et d'analyse des risques systémiques dans les pratiques opérationnelles de gestion de crise, et également dans les politiques d'anticipation et d'atténuation des effets de l'Anthropocène. Plusieurs initiatives en ce sens sont déjà en cours, notamment dans le cadre du LaboCrise¹⁰ mené par le Ministère de la transition écologique, en collaboration avec le Ministère des armées et la Gendarmerie nationale, ainsi que des acteurs des collectivités territoriales et du secteur privé. Un exercice, auquel ont participé les auteurs du présent article, simulant un scénario de sécheresse sur le territoire national a permis d'expérimenter différentes modalités d'intelligence collective en situation de gestion de crise. Celles-ci impliquaient la représentation et la visualisation des interdépendances complexes et des effets cascades d'une crise sectorielle sur d'autres secteurs d'importance vitale. Les résultats de cette expérimentation ont confirmé la pertinence d'une approche systémique et transdisciplinaire des risques en situation de crise ayant des implications multisectorielles.

Bibliographie

Ouvrages

¹⁰ Cette initiative est référencée sur le site : <https://www.projet-sanctum.com/>

BONNEUIL, C. et FRESSOZ, J-B. (2016), *L'évènement Anthropocène: La Terre, l'histoire et nous*, Points.

MEADOWS, D.H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., BEHRENS, W. (1972), *The limits to growth: A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind* (Les limites de la croissance : Un rapport pour le projet du club de Rome sur la situation critique de l'humanité), Universe Books.

GROUPE CYNORRHODON. (2020), *Dictionnaire critique de l'anthropocène*, Editions du CNRS, Paris.

POTTIER, A. (2016), *Comment les économistes réchauffent la planète*, Seuil.

REVAULT D'ALLONNES, M. (2013), *La crise sans fin: Essai sur l'expérience moderne du temps*, Points.

Articles

FINI, R., JOURDAN, J., PERKMANN, M., & TOSCHI, L. (2022). A New Take on the Categorical Imperative: Gatekeeping, Boundary Maintenance, and Evaluation Penalties in Science. In *Organization Science*. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <https://doi.org/10.1287/orsc.2022.1610>

LACOSTE, Y. (2008), La géographie, la géopolitique et le raisonnement géographique, *Hérodote*, numéro 130, 17–42.

LONGARETTI, P-Y. (2020], Risques systémiques globaux et risques d'effondrement Quels éléments d'analyse scientifique, pour quels types de risques ?. *LIREC Lettre d'Information sur les Risques et Crises*, pp.1-6.

MAX-NEEF, M. A. (2005). Foundations of transdisciplinarity (Fondements de la transdisciplinarité). In *Ecological Economics* (Vol. 53, Issue 1, p. 5-16). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.01.014>

MATHY, S., LABUSSIÈRE, O., LAVOREL, S., LEBEL, T., SCHMITT, B. et le collectif « Autour du 2 °C 2019 ». (2021), Les enjeux de l'interdisciplinarité de la recherche et des parcours de formation sur le changement climatique : l'école d'été « Autour du 2°C ». *Natures Sciences Sociétés*, numéro 29, 68-76. <https://doi.org/10.1051/nss/2021017>

PALLE, A. (2021), Bringing geopolitics to energy transition research (Intégrer la géopolitique dans la recherche sur la transition énergétique), *Energy Research & Social Science*, numéro 81. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102233>

RIGOLOT, C (2020). Transdisciplinarity as a discipline and a way of being: complementarities and creative tensions (La transdisciplinarité comme discipline et comme manière d'être : complémentarités et tensions créatives). *Humanit Soc Sci Commun* 7, 100. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00598-5>

STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTROM, J., CORNELL, S. E., FETZER, I., BENNETT, E. M., BIGGS, R., CARPENTER, S. R., DE VRIES, W., DE WIT, C. A., FOLKE,

C., GERTEN, D., HEINKE, J., MACE, G. M., PERSSON, L. M., RAMANATHAN, V., REYERS, B., SORLIN, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet (Les frontières planétaires : Guider le développement humain sur une planète en mutation), *Science*, volume 347, numéro 6223, American Association for the Advancement of Science (AAAS). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

VERBURG, P. H., DEARING, J. A., DYKE, J. G., LEEUW, S. VAN DER SEITZINGER, S., STEFFEN, W., SYVITSKI, J. (2016). Methods and approaches to modelling the Anthropocene (Méthodes et approches de la modélisation de l'Anthropocène), *Global Environmental Change*, numéro 39, p. 328-340, Elsevier BV, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.007>

VIDAL, O.; LE BOULZEC, H.; ANDRIEU, B.; VERZIER, F. (2022), Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World (Modélisation de la demande et de l'accès aux ressources minérales dans un monde en mutation), *Sustainability*, 14, 11. <https://doi.org/10.3390/su14010011>