

# Modéliser l'économie dans l'environnement

## Des concepts aux données : une modélisation sous contraintes

**Hugo Bailly<sup>1,2</sup>, Camille Guittonneau<sup>1</sup>, Pierre Jacques<sup>3</sup>,  
Hugo A. Martin<sup>1</sup>, Paul Valcke<sup>1</sup>, Francois Verzier<sup>4</sup>**

(1) Environmental Justice Program, Georgetown

(2) Centre d'économie de la Sorbonne

(3) Université catholique de Louvain

(4) Laboratoire ISTerre

[hugo.bailly@gmail.com](mailto:hugo.bailly@gmail.com), [cg1240@georgetown.edu](mailto:cg1240@georgetown.edu), [p.jacques@uclouvain.be](mailto:p.jacques@uclouvain.be),  
[martin\\_hugo@ymail.com](mailto:martin_hugo@ymail.com), [paul.valcke@gmail.com](mailto:paul.valcke@gmail.com), [fran.verzier@gmail.com](mailto:fran.verzier@gmail.com)

### Résumé

---

Depuis le rapport du club de Rome de 1972, les contraintes environnementales dans lesquelles s'inscrit l'économie mondiale sont désormais reconnues cruciales dans l'évaluation des politiques publiques de transition. Dans ce contexte, la modélisation mathématique est un outil incontournable de compréhension des interactions économie-environnement et d'aide à la décision.

Cependant, cette approche est confrontée à deux types de contraintes méthodologiques : d'une part, relier les dynamiques économiques et financières à celles de phénomènes physiques multiples (climat, énergie et flux de matières), requiert le couplage de modèles reposant sur des concepts fondamentalement différents. D'autre part, même lorsqu'une telle approche est possible, les modèles couplés qui en résultent sont souvent difficiles à calibrer et à valider avec des données réelles. Ainsi, il faut parfois restreindre l'analyse à des phénomènes régionaux et sectoriels pour obtenir des modèles cohérents avec les données réelles.

Au cours de ce symposium, nous présentons plusieurs approches de modélisation macro-économiques permettant le couplage avec des modèles climatiques et biophysiques. Nous montrons ensuite l'intérêt des couplages aux échelles globales et régionales pour appréhender les défis des politiques de transition écologique. Enfin, nous discutons les limites de ces approches en termes de calibration et de reproductibilité des données.

### Mots-clés

---

Modélisation, Macroéconomie, Complexité, Environnement, Changement climatique, Ressources, Énergie, Systèmes dynamiques

### Déclaration des auteurs

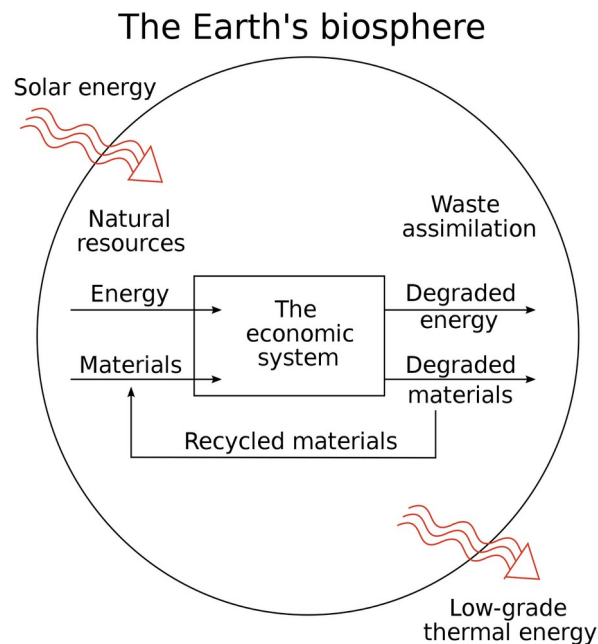
---

L'ordre des auteurs est alphabétique et ne correspond donc pas à la part de contribution.

## 1. Introduction : modélisations en économie, une divergence d'approches

### 1.1. Des définitions de l'économie

L'économie est une notion polysémique : ici nous la définissons comme “le corps physique et informationnel de la société” dont nous faisons partie, à une échelle macroscopique.



**Figure 1** : Représentation de l'économie comme un système dissipatif faisant partie de l'environnement, tel que théorisé par Nicolas (Georgescu-Roegen, 1971) via les concepts mis en avant par Ilya (Prigogine, 1985)

La science économique concerne à la fois la description de sa structure et de la manière dont elle change (descriptivité), et a pour objectif la proposition d'un ensemble de changements qui permettrait à la société d'accomplir certains des objectifs qu'elle se fixe (normativité). La structure économique est dite dissipative : elle transforme son environnement externe comme le climat, les terres et les ressources, pour créer sa propre organisation et structure interne, du wifi jusqu'à la sécurité sociale. C'est un système dit ouvert, car en interaction avec d'autres économies et surtout, avec le reste de la nature, son environnement.

Cette relation d'ouverture, de transformation, rend nécessaire l'étude du système couplé économie-environnement : en effet, les propriétés d'un organisme, sa capacité à être adapté à un milieu, et donc les stratégies à suivre ne peuvent être décrites sans décrire le milieu lui-même.

### 1.2. Réduire pour mieux comprendre

Le but de la modélisation est de réduire la complexité du réel jusqu'à obtenir une structure logique la plus simple possible, qui permette de construire une vision explicite, compréhensible et pertinente du monde. L'enjeu de la modélisation économie-environnement est donc de comprendre comment faire parler notre compréhension des logiques de l'économie et notre compréhension des logiques de l'environnement.

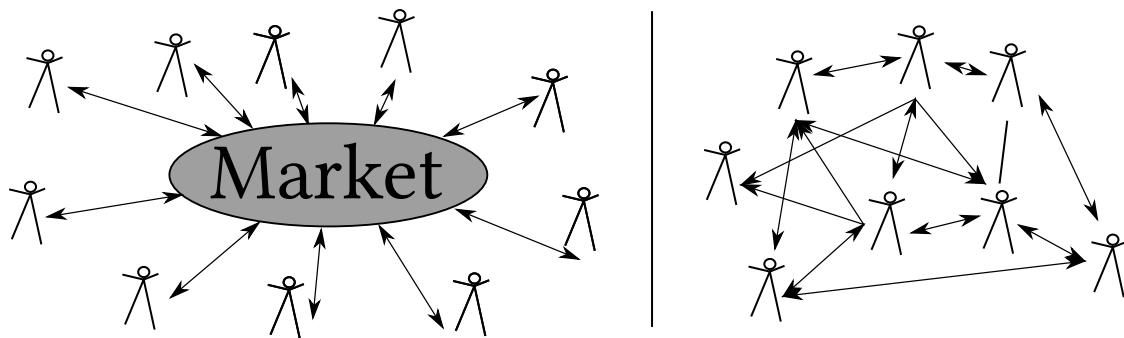


Les théories de la valeur et de la financiarisation des marchés deviennent dominantes, et l'environnement naturel peut passer au second plan, car substitué par les propriétés des nouveaux capitaux<sup>1</sup>. La théorie économique classique s'éloigne des sciences naturelles, de même que les concepts qu'elle développe pour décrire le monde.

### 1.4. Une théorie sur des axiomes éloignés des sciences naturelles

Les concepts utilisés viennent majoritairement de la théorie micro-économique : des agents ayant une perception rationnelle au monde (et donc du futur), souhaitant maximiser leur bien-être (utilité) du présent et du futur. Le long terme y est ce qui détermine la dynamique du court terme : la flèche du temps y est inverse par rapport aux systèmes biophysiques, dans lesquels le long terme est composé de pas myopes vers le futur<sup>2</sup>.

Le passage de l'échelle du micro (individu) au macro (société) est, lui aussi, difficile : les interactions entre agents créent de nombreuses propriétés émergentes qui devraient supplanter les propriétés des individus, de la même manière qu'un organisme n'a pas du tout les mêmes propriétés que les atomes qui le constituent. La méthodologie utilisée de description des interactions entre individus, tous reliés au marché et parfaitement synchronisés à l'équilibre, permettent le passage en négligeant toute la complexité qui fait d'un groupe d'humains une société<sup>3</sup>.



**Figure 3** : Passage du micro au macro : à gauche, centralisation par un marché permettant d'éviter les propriétés émergentes complexes ; à droite, un réseau hétérogène d'agent a propriété émergentes

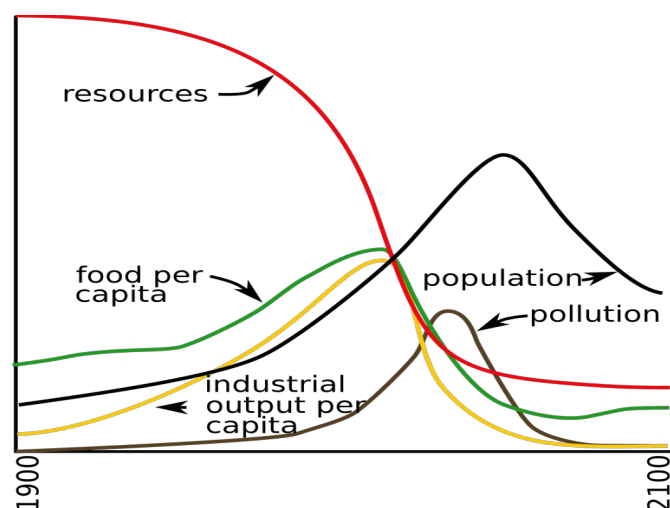
### 1.5. Le retour de la nécessité environnementale

L'impact de travaux non directement économiques tel que « Limits to growth » en 1972 incite la théorie dominante à réintégrer l'environnement dans le cadre central de leur théorie. Mais l'éloignement méthodologique rend la tâche difficile. Faire parler les disciplines d'égale à égale dans une construction commune est devenue impossible par la nature même du temps dans les modèles, et l'une des techniques majoritaires est de traduire l'environnement en variable économique, en estimant sa valeur, puis en utilisant la théorie économique.

1 Paradoxalement, ce capital productif a un impact bien plus fort sur l'environnement que l'homme sans ces exosomatismes (Stiegler, 2020), simplement l'environnement agissant comme un buffer rendait à court terme invisible cet impact, mise à part la pollution par particule de charbon (Fressoz, 2020)

2 Exception faite au principe de moindre action et des intégrales de chemin en physique, mais qui donnent une description différentielle contrairement à l'optimisation inter-temporelle économique

3 Les « agents based models » cherchent à corriger ce problème en proposant une microfondation complexe de la microéconomie, mais ont de fortes difficultés à produire des résultats clairs en termes de propriétés émergentes rendant difficile l'émergence de discours ou de normativité par leurs résultats



**Figure 4** : Forme des sorties du modèle "world3" sur lequel est basé le rapport "limits to growth".

Le déclin/collapse qui est montré Figure 4 est profondément différent des résultats habituels en économie de l'époque, et à force la communauté des économistes a profondément changé ce qu'ils prennent en compte. Si la partie pré-collapse de ces courbes correspond plutôt bien aux observables 50 ans après leur simulation, cela ne veut pas nécessairement que nous sommes destinés à suivre cette trajectoire. Les hypothèses mathématiques du modèle ne sont plus valides dans une période de décroissance.

La théorie majoritaire ne cherche donc pas à "modéliser l'économie dans l'environnement" mais plutôt "modéliser l'environnement dans l'économie" voir "modéliser l'environnement comme une valeur économique" (Pottier, 2016). Ce phénomène "d'inversion des sphères" fut anticipé par Karl Polany (Polany, 1944) comme l'un des risques sociétaux fort en termes de boussole, donnant un rôle disproportionné aux théories de la valeur induisant une distorsion forte de notre environnement. C'est l'approche la mieux documentée aujourd'hui, construite par incrément de temps court de la théorie mathématique dominante. Il s'agit là de la première contrainte de la modélisation de "l'économie dans l'environnement" : l'historicité de la discipline économique et de ses concepts mis en avant.

## 1.6. Faire autrement : l'économie comme un environnement

Bien sûr, le développement de théories est hétérogène, et les différentes disciplines s'influencent et apportent leurs contributions. Les théories des dynamiques écologiques et de l'auto-organisation comme la théorie de l'évolution se sont développées et mathématisées au fil du XX<sup>ème</sup> siècle, notamment via les systèmes dynamiques, et permettent une approche radicalement différente de l'économie. De ces racines émerge d'autres approches hétérodoxes de l'économie, dont une partie se basent sur un set axiomatique et des éléments descriptifs différents comme :

- la description des écosystèmes et interactions économiques en tant qu'écosystème et non en tant que leur valeur, avec un refus de traduction directe ;
- la non nécessité de description par inter-optimisation temporelle faite par des agents rationnels, mais plutôt un ensemble de processus, parfois antagonistes, qui traversent la société ;
- la comptabilité avec les principes de la thermodynamique.

Les différents modèles explorés dans cet article correspondent à ce cahier des charges. Le premier principe est respecté grâce à ce que l'on appelle la consistance stock-flux : tout flux d'argent ou d'une quantité physique correspond à une variation d'un stock. Lorsque ces flux sont des transformations, elles respectent le second principe de la thermodynamique d'irréversibilité et de pertes, que l'on appelle hypothèse de métabolisme. Lorsque ces flux sont des déplacements, ils sont régis par une dernière classe d'hypothèse appelées "hypothèses de comportement", qui décrivent les actions des agents sociaux en fonction de leur

## Modéliser l'économie dans l'environnement

environnement local : à quel point des ouvriers arrivent à négocier une augmentation de salaire, ou à quel point une entreprise va choisir d'investir dans une technologie.

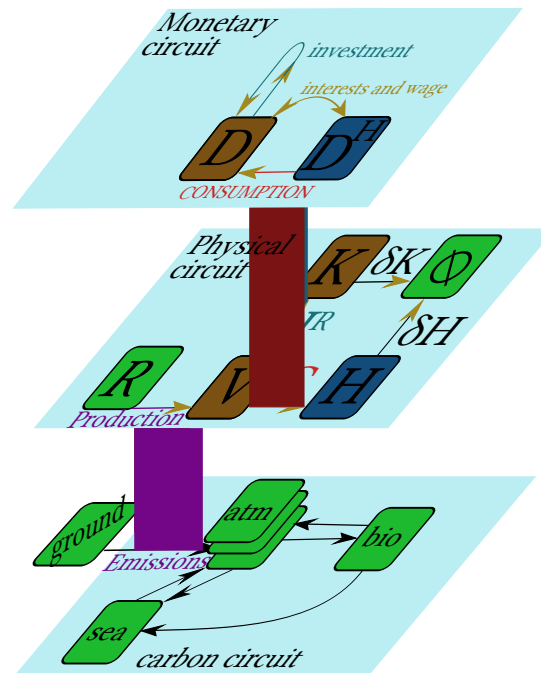
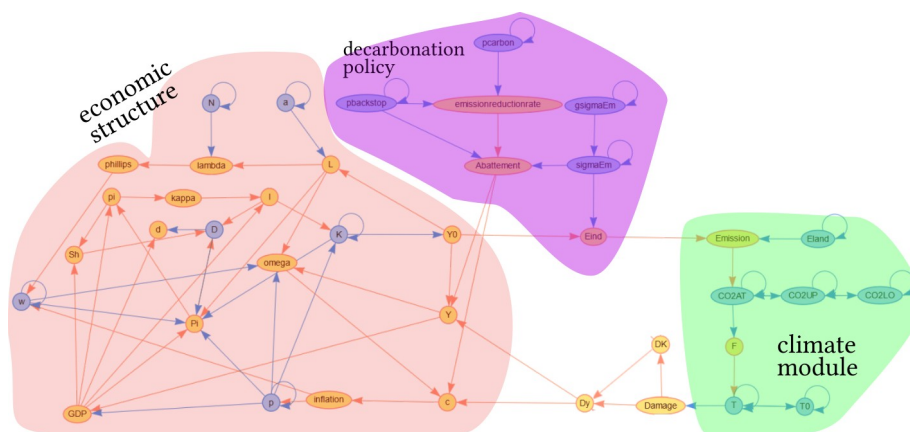


Figure 5 : Triple circuit stock-flux cohérent

On suppose dans la Figure 5 deux secteurs, un **secteur productif**, possédant une dette  $D$ , des machines  $K$  et un inventaire de produit physique  $V$  et des **Travailleurs**, possédant des biens  $H$ , et une dette  $D^H$ . Il y a des échanges de bien physique  $C$ ,  $I \wedge R$  qui vident l'inventaire et remplissent  $K$  et  $H$ . Tout mouvement dans le circuit physique y est associé d'une transaction dans le circuit monétaire, symbolisée par l'union verticale entre les plans qui fait le couplage. La **production** vient transformer des entrants naturels en produits commerciaux, et va par ce processus de transformation faire des émissions, qui vont évoluer dans le circuit du carbone. Ce dernier est ensuite couplé à un circuit de l'énergie (température) qui vient à son tour impacter le reste des processus (non représenté ici).

Chaque type de grandeur (monnaie,  $CO_2$ , ressources, biens physiques) est associée à un circuit dans lequel il va être transporté selon les processus qui le décrivent (transactions, capture carbone par l'océan), et certains flux dans un circuit comme les émissions de  $CO_2$  sont lié au flux de la production de bien physique dans un autre circuit : il y a couplage.





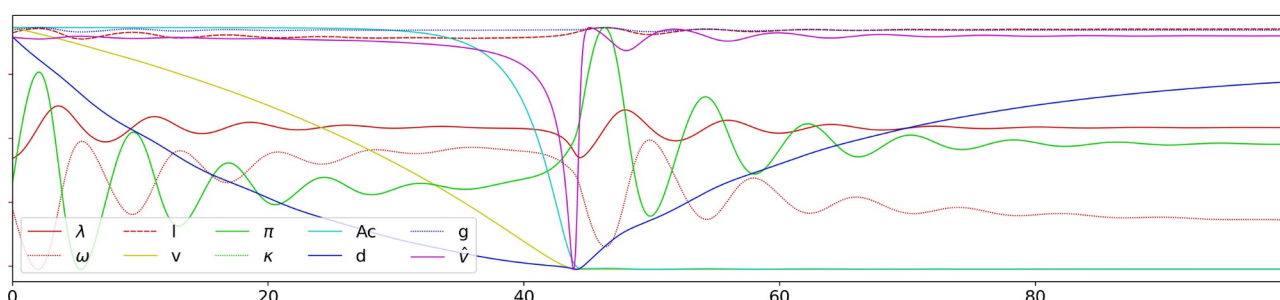
**Figure 6** : Schéma d'interaction des variables au sein d'un modèle de type GEMMES, étudiant l'interaction entre une économie et le CO<sup>2</sup>

Dans la Figure 6, les différentes variables vont venir impacter les valeurs des autres variables, et le système itère sur lui-même pour décrire son évolution dans le temps. Chaque sous-système en couleur peut être étudié séparément, puis mis tous ensemble pour une étude des propriétés émergentes entre eux

## 1.7. Des propriétés radicalement différentes

On obtient, via ces constructions, des systèmes dynamiques hors équilibre, qui couplent naturellement l'économie et son environnement. Toute action a des conséquences, et des déséquilibres ou perturbations viennent se propager dans les différents endroits du système.

Sous certaines conditions, le système peut les absorber et revenir vers son équilibre, mais dans certains cas, la perturbation peut emmener le système loin de son fonctionnement normal : cela correspond à une crise ou un effondrement. Outre le fait que ces modèles utilisent les mêmes langages par processus, ils permettent de mettre en avant les antagonismes qui parcourent une société, les angles aveugles de certaines de leurs logiques et les instabilités inhérentes qui la parcourent. En soi, c'est une description qui décrit une économie comme un environnement ou un organisme, au sein d'un environnement.



**Figure 7** : Exemple de trajectoire dans une économie modélisé en système complexe selon la méthodologie décrite ci-dessus. En haut trajectoire temporelle, à gauche trajectoire dans l'espace de phases, c'est-à-dire lien entre les variables importantes de l'espace au cours du temps.

Dans la simulation de la Figure 7, le système crée une crise endogène de produits disponible en surconsommant (visible autour de l'année 40), ce qui crée une crise de la production, conduisant à du licenciement temporaire et une crise des salaires, puis vient se re-stabiliser à un niveau plus faible de pouvoir d'achat.

## 1.8. Une modélisation toujours parcellaire et partielle

Ces méthodes alternatives ne sont pas sans défaut : elles considèrent comme moins fondamentale les propriétés d'anticipation de ses acteurs, elles sont plus loin des données un d'une partie de la littérature économique traditionnelle, et les choix de ce qui est représenté ou non et soumis à une subjectivité. Ainsi le choix des circuits existant dans le modèle (par exemple, considérer la biodiversité ou non), le choix des variables et quantité qui y apparaissent (par exemple, raisonner sur une consommation monétaire plutôt qu'un temps alloué au travail), le choix des mécanismes causaux (la dynamique économique vient-elle de l'offre produite ou de la demande ?), sont autant de choix partiels nécessaires pour garder une structure compréhensible, mais qui vont générer dans le modèle des angles aveugles. Certains modèles traitant de choses en apparence différentes et coupables peuvent contenir implicitement des hypothèses exclusives, par exemple sur les dynamiques d'offre et de demande, rendant le couplage entre sous-modèles une difficile opération chirurgicale. Il s'agit là d'une deuxième contrainte forte dans le travail de modélisation : la non-exclusivité d'éléments que l'on cherche à rapprocher.

## 1.9. Un ensemble de satellites pour explorer toutes les facettes de l'économie écologique

Les différents modèles présentés ici ont tous une base commune : en leur cœur est ce que l'on appelle un modèle de Goodwin, une structure stock-flux cohérent avec ménages et entreprises, dans laquelle le niveau des salaires et des prix est une convention sociale : décrite par sa variation via un processus de déséquilibre rapport de force, et non sa valeur. Le couplage des logiques en son sein lui donne une dynamique émergente de croissance, qui est donc une conséquence des autres processus. C'est aussi un système avec des variables antagonistes, donnant dans certains cas une logique proie-prédatrice entre la part des salaires et le taux d'emploi, créant des cycles économiques. Sur cette structure peuvent se construire des extensions, des raffinements d'hypothèses. Ici sont présentés :

- une connexion avec le climat, par les émissions de gaz au climat et des fonctions de dommage impactant l'économie, suivant la logique du modèle GEMMES (section 2),
- avec un secteur d'énergie renouvelable nécessaire à la production, le modèle TEMPLE (section 3),
- avec décomposition de l'empreinte en ressource de la société : le modèle MATER (section 4).

Les deux sections précédentes explorent notamment la faisabilité des transitions énergétiques.

Nous finirons en discutant la calibration et la confiance que l'on peut accorder à des modèles mathématiques dans un cadre d'aide à la décision (section 5).

Cette décomposition en facette permet l'étude approfondie et compréhensible de l'interaction entre l'économie et une facette écologique. Ils permettent à la fois de comprendre, d'illustrer, de quantifier les enjeux, et construire séparément des briques compatibles d'une compréhension globale des enjeux de l'anthropocène.

## 2. Économie et climat : le modèle GEMMES

Dans cette section, nous commencerons donc la discussion de la prise en compte de l'environnement dans l'économie (ou de l'économie dans l'environnement), en considérant l'environnement comme uniquement caractérisé par l'état des conditions climatiques de la zone considérée, dans un certain espace et sur une certaine période de temps. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte ici des flux et stocks de ressources en matières physiques, de type énergétique, des métaux, etc., mais seulement des conditions climatiques de la zone économique considérée.

Historiquement, les premiers économistes n'ont pas intégré les rapports sociaux qu'ils étaient en train d'étudier dans l'environnement climatique où ces derniers opéraient. Au mieux, Smith, Ricardo, Marx, Keynes et Kalecki constatèrent bien que les conditions climatiques étaient de première importance dans l'état atteint par une certaine zone économique, mais ces conditions étaient supposées constantes, maintenant les



différences inter-régionales inchangées au cours du temps. Considérer l'évolution des conditions climatiques est donc une tendance relativement récente dans les milieux économiques.

La raison en est pourtant simple : au-delà de la *doxa* dans laquelle s'inscrivent les différentes écoles d'économie politique, tout modélisateur suit une sorte de « principe de moindre action » dans les stratégies de modélisation qu'il met en œuvre pour aller au bout de son étude. Or, faire l'hypothèse que le climat demeurerait constant était loin d'être une hypothèse farfelue jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. En effet, rappelons que la nature évolutive de court terme du climat, c'est-à-dire celle opérant à l'échelle de la dizaine d'années, n'a fait l'objet d'un réel consensus parmi les climatologues qu'à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle. Ce n'est que par l'intermédiaire des gigantesques travaux de synthèse du GIEC qu'un consensus a pu émerger au sein des climatologues, stipulant que, depuis deux siècles, non seulement le climat terrestre était en évolution permanente, sur des échelles de court et de moyen terme (*i.e.*, de l'année au quart de siècle), mais que de plus, cette évolution était directement causée par les activités thermo-industrielles humaines.

Par conséquent, nous pouvons difficilement blâmer l'hypothèse qu'appliquèrent les premiers économistes dans leurs modèles d'économies agrégées, où le climat était supposé constant, et était donc au mieux implicitement pris en compte lors du calibrage. Par exemple, en calibrant un tel modèle sur une région donnée, disons l'Europe, on pouvait implicitement prendre en compte les propriétés climatiques de la région car, tout chose étant égale par ailleurs, la calibration d'une autre région aurait été différente.

À l'inverse, le modèle GEMMES, présenté au cours de ce symposium, et qui repose sur des hypothèses communes avec les modèles présentés dans les sections suivantes, correspond plutôt à la prise en compte d'une économie qui s'inscrit et évolue dans un environnement climatique également en évolution. Cette évolution climatique est non seulement causée par les activités humaines, représentées dans le modèle par le niveau de l'activité économique de la zone, mais elle impacte en plus l'économie par l'intermédiaire de dégâts climatiques. Notons qu'un tel couplage nécessite fondamentalement que la partie économique du modèle soit fondée sur une théorie hétérodoxe, puisque, par hypothèse dans les modèles néoclassiques d'équilibre général, cet équilibre permanent ne peut permettre la simulation de trajectoires évolutives hors équilibres. Pourtant, considérer un modèle économique hors équilibre est ici crucial, car les rétroactions climatiques peuvent être les causes de nouvelles trajectoires, potentiellement dramatiques pour l'économie.

Comme on peut le constater par les étapes suivantes, l'idée du couplage économie/climat est relativement simple :

- *Sens direct, de l'économie vers le climat* : Plus l'économie s'active et plus les émissions de CO<sup>2</sup> qu'elle génère dans l'atmosphère sont importantes. Or, plus les concentrations en CO<sup>2</sup> sont élevées dans l'atmosphère et plus le climat se réchauffe globalement.
- *Sens indirect, du climat vers l'économie* : Plus la température augmente et plus les conditions de réalisation de l'économie varient, induisant alors un stress sur l'économie, car cette dernière doit alors s'adapter à de nouvelles conditions, entraînant généralement des coûts de production supplémentaires. Par exemple, il faudra refinancer du capital rendu inutilisable par la montée des eaux. On quantifie ce stress par des fonctions de dommages, augmentant avec la température globale. À un certain niveau de réchauffement, un taux de dommage est donné, et à niveau plus élevé, ce taux de dommage augmente.

Pour comprendre l'intérêt que porte cette approche couplée, il faut la mettre à la lumière des stratégies suivies dans les simulations du GIEC. En effet, les stratégies utilisées dans le GIEC ne sont pas à proprement parler des couplages, puisque l'économie et les émissions qui en résultent sont vues comme des forçages externes de l'évolution climatique. Les étapes de modélisation sont grossièrement les suivantes :

- Initialement, un *scenario* d'évolutions sociétales est dressé, impliquant de faire le choix de l'évolution de la production, en vue d'atteindre un certain développement économique, en tenant compte des technologies employées, de la taille de la population, de sa consommation, etc.
- Ensuite, les émissions et autres externalités (par exemple la pollution) d'un tel *scenario* sont calculées, permettant alors de dresser une courbe des émissions générées.

## Modéliser l'économie dans l'environnement

- Enfin, les modèles climatiques simulent l'évolution du climat terrestre en prenant comme forçage externe les émissions précédemment calculées.

Finalement, nous voyons donc que, contrairement à la stratégie que nous avons proposée, l'économie se développe indépendamment des conditions climatiques dans lesquelles s'opèrent les activités humaines. Cela peut conduire à des résultats absurdes, faisant régulièrement les gros titres de la presse, dans lesquels on parle de la possibilité d'atteindre des niveaux de réchauffement climatique atteignant +8°C par rapport à la moyenne pré-industrielle.

À l'inverse, en tenant compte d'infimes dommages climatiques, nos résultats montrent que de tels *scenarii* sont impossibles à atteindre étant donné la structure économique que nous connaissons, car les conditions de réalisation de telles émissions sont rendues inopérantes par la destruction totale de l'économie telle que nous la connaissons.

En effet, lorsque de nombreuses parties du monde sont rendues inaptes à la vie humaine, par exemple via l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur mortelles (Mora et al., 2017), et même en tenant compte de très faibles dégâts impactés par le climat sur l'économie, notre modèle couplé ne peut en aucun cas maintenir un système économique reposant sur les mêmes bases de rapports sociaux que les nôtres (voir les effondrements économiques simulés par le modèle GEMMES (Bovari et al., 2018)).

Or, lorsqu'un modèle économique mondial arrive à un tel point d'effondrement, nous savons que les liens sociaux sur lesquels il a été fondé deviennent caducs. Historiquement, lorsque de tels moments sont atteints, d'autres types de relations interpersonnelles se mettent en place. Ainsi, nous ne disons pas que de tels niveaux de réchauffement sont impossibles à atteindre pour toute société humaine. Nous disons qu'ils sont impossibles à atteindre pour la nôtre, c'est-à-dire, telle que nous la connaissons depuis l'émergence des états-nations capitalistes, car notre société actuelle ne pourra pas encaisser une variation aussi soudaine et brutale de l'environnement climatique.

Alors devons nous le déplorer ? Rien n'est moins sûr. Nous ne répondrons pas à cette nouvelle question ici mais notre travail montre au moins que notre imaginaire de l'effondrement causé par les limites à la croissance, souvent réduit à la seule question de la finitude des ressources, change dès que nous insérons l'économie dans son environnement climatique. S'il paraît sage d'étudier la question des limites via le prisme des ressources ou de l'énergie, il paraît maintenant clair que l'ensemble des rapports sociaux régissant la façon particulière qu'ont nos sociétés de s'organiser, forme un système bien plus fragile et instable.

Dans une perspective de développement de la qualité de la vie humaine, la première question qui se pose après un tel constat est à la fois technique et politique, puisqu'elle consistera à déterminer comment nous devrions sortir de cette impasse écologique, imposée par la combinaison particulière de nos structures sociales et des limites physiques de notre monde. Soit cette sortie est pensée dès à présent, en amont des futures crises, soit elle sera subie, et ce, potentiellement au détriment du niveau de vie moyen des populations. Ainsi, si cette série de crises économiques et financières demeure un impensé des projections futures, elle pourrait bien ironiquement devenir la seule et unique porte de sortie effective d'un système entré en contradiction. Pourtant, changer radicalement nos structures sociales de production serait une autre voie. La seconde question qui en découle est, cette fois, uniquement politique, puisqu'elle consistera à déterminer si ces changements sociaux s'effectueront pour le meilleur ou pour le pire. Cette question est sans doute la plus cruciale car, plus que jamais, laisser la main invisible des économistes *mainstream* arbitrer la manière dont nous opérerons de tels changements sociaux est certainement la plus facile mais aussi la pire des stratégies.

Le couplage de modèles macroéconomiques avec d'autres systèmes offre de nombreuses possibilités d'application. En particulier, estimer la faisabilité des transitions énergétiques. Les deux sections suivantes explorent différentes approches de cette question.

### 3. Économie et énergie : le modèle TEMPLE

Dans la section précédente, nous avons souligné les caractéristiques principales et l'intérêt du couplage entre un modèle macro-économique et un modèle climatique. L'accent était mis sur le lien entre l'économie

et l'environnement dans sa fonction de puits. Dans le présent paragraphe, nous nous basons sur le même modèle macro-économique mais explorons cette fois les liens avec l'environnement en tant que source d'énergie. Plus précisément, nous rajoutons un secteur énergétique au modèle GEMMES, pour le transformer en le modèle TEMPLE (Jacques, 2022)<sup>4</sup>. Dans le modèle TEMPLE, qui ne comprend pas de module climatique, le secteur productif de l'économie produit deux types de biens: les biens énergétiques et les biens finaux. Ces deux types de bien servent aussi bien pour la consommation des ménages que comme facteurs de production des entreprises. Les facteurs de production sont alors au nombre de trois: le capital (constitué de biens finaux), l'énergie et le travail. C'est par le biais de l'évolution des intensités de ces trois facteurs de production pour les firmes énergétiques que la transition énergétique va s'exprimer. En effet, sur base d'une analyse de l'évolution future du taux de retour énergétique (TRE) des énergies fossiles et renouvelables, des courbes sont produites pour la variation de l'intensité capitaliste et énergétique de la production d'énergie en fonction du taux de pénétration des renouvelables. L'évolution de ce taux de pénétration est ensuite modélisée en imposant de manière exogène une transition énergétique qui serait compatible avec l'Accord de Paris. Le modèle TEMPLE a en effet été construit dans le but d'étudier quelles seraient les dynamiques macro-économiques engendrées par une transition énergétique volontariste conduite à l'échelle mondiale; pas de modéliser les conditions et incitations qui permettraient à une telle transition énergétique d'advenir. Les résultats obtenus par simulation du modèle TEMPLE sont frappants: une transition énergétique dans une économie mondiale en croissance demanderait tellement d'investissements dans le secteur renouvelable que la capacité productive de l'économie ne pourrait pas suivre. Le déséquilibre entre la demande (tirée par l'intensité en capital des panneaux solaires et éoliennes) et l'offre de biens finaux conduirait à une dynamique inflationniste soutenue, de l'ordre de 10%. De plus, le taux d'épargne de l'économie s'élèverait à plus de 40%, ce qui revient à dire que l'économie mondiale devrait entrer dans un mode d'économie de guerre toute entière consacrée à la décarbonation du système énergétique. Ces dynamiques, qui indiquent l'immense défi (ou illusion) que représente la "croissance verte", ne seraient pas observables en se focalisant sur le système énergétique ou sur l'économie seuls. C'est véritablement l'insertion de dynamiques biophysiques dans un modèle macro-économique - en d'autres termes, l'interaction "économie-énergie" - qui permet leur émerger.

#### 4. Économie et matière : le modèle MATER

Nous avons vu que la transition énergétique peut rencontrer des freins économiques et financiers. La société requiert de l'énergie pour toutes les activités nécessaires à son bon fonctionnement mais elle ne peut pas se passer non plus de matières premières, renouvelables ou non. La construction des bâtiments demande d'immenses quantités de béton, la production des voitures consomme de l'acier mais aussi du cuivre avec l'avènement des voitures électriques. De plus, il faut de l'énergie pour extraire les matières premières et il faut des matières premières pour construire les moyens de production d'énergie.

L'Agence internationale de l'énergie a identifié plusieurs métaux critiques pour les transitions énergétiques vers des émissions nettes nulles (IEA, 2021). Pour la mobilité électrique, le nickel, le cobalt, le graphite et le manganèse. Pour la production d'électricité décarbonée, le zinc et le silicium. Enfin, le cuivre est essentiel pour la production, la transmission et le stockage de l'électricité, ainsi que pour les véhicules électriques. Pour une tendance économique donnée (taux d'emploi, PIB, etc.) et un scénario de mix énergétique donné, quelles quantités de ressources sont alors nécessaires ? En supposant que l'humanité vise un niveau global de confort et d'aisance similaire à celui dont jouissent aujourd'hui les pays développés, les transitions énergétiques sont-elles réalisables en termes de ressources minérales ?

Le modèle DyMEMDs/MATER vise à comptabiliser les flux physiques de la société et ainsi capturer les rétroactions énergie-matériaux qui pourraient enrayer la transition énergétique.

---

4 TEMPLE diffère de GEMMES également par d'autres aspects, notamment par le fait que TEMPLE est un modèle de demande et non un modèle d'offre, et qu'une distinction logique est introduite dans le secteur des ménages entre travailleurs et capitalistes

## Modéliser l'économie dans l'environnement

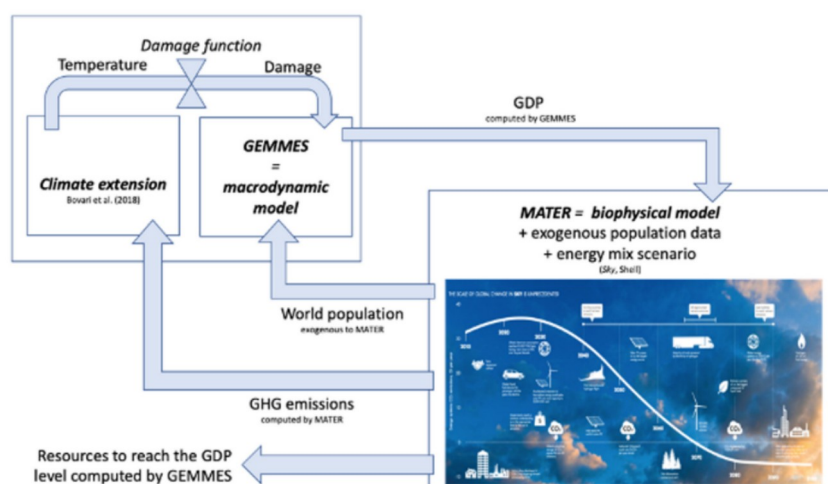
Ce modèle dynamique de comptabilité de l'énergie, des ressources et des pollutions suit une méthodologie relativement simple: La société est désagrégée en plusieurs secteurs (transport, bâtiments, industries, etc...) eux-mêmes décomposés en différentes infrastructures (voitures, motos, camions, etc...). A chaque pas de temps, le modèle prend en entrée une consigne de stock exogène par infrastructure. Ce stock est comparé au stock de l'itération précédente. Le flux de nouvelles infrastructures est calculé comme la dérivée du stock consigne plus les infrastructures en fin de vie à renouveler. Il y a des recettes de production (en énergie et matière) pour chaque infrastructure, ajoutées à la consommation en fonctionnement de ces mêmes infrastructures cela donne les consommations totales d'énergie et de matières. Enfin, le modèle comprend une dynamique de recyclage pour les infrastructures en fin de vie ce qui permet de récupérer des matières premières pour répondre à une partie de la demande totale.

Cette modélisation se fait sur une grande quantité d'infrastructures, de ressources et d'impacts. Cela permet d'avoir une comptabilité globale et exhaustive qui rend le modèle robuste pour l'analyse des scénarios futurs. Les flux de matière et d'énergie entre grandes régions mondiales sont également représentés par des dynamiques de commerce bilatéral. Il est ainsi possible d'étudier la transition énergétique d'une région au regard des transitions des autres régions.

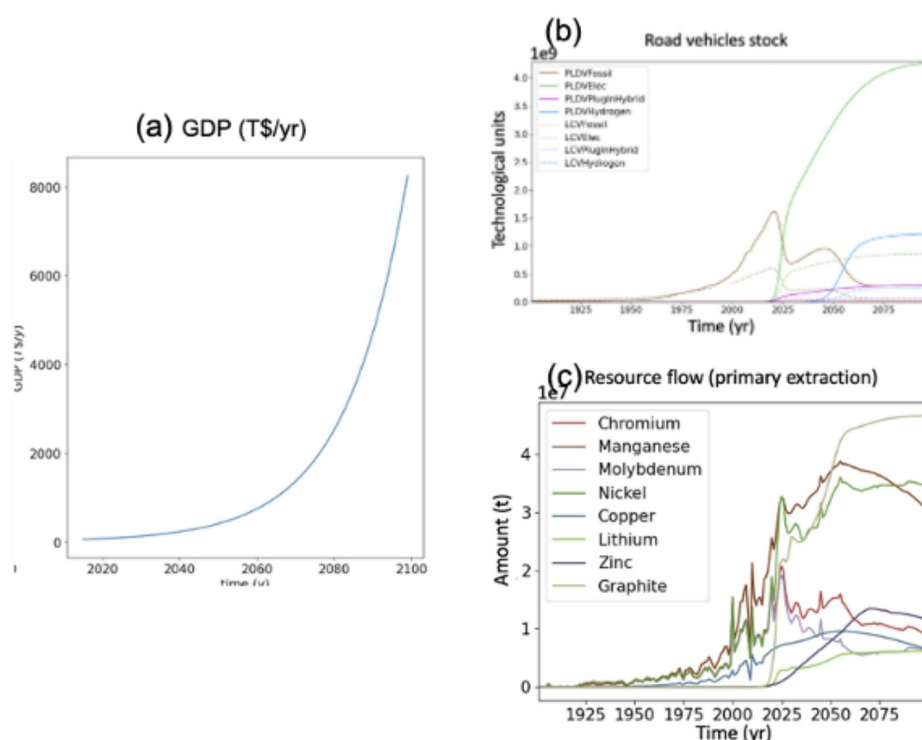
A ce stade, le modèle DyMEMDS/MATER ne comprend pas de module économie et ne permet donc pas de modéliser l'économie dans l'environnement. Cependant, nous avons développé une théorie empirique de désagrégation du PIB en plusieurs services (de mobilité, de logement, etc...). Cela permet de coupler ce modèle à un modèle économique qui calcule le PIB et prend en entrée des flux physiques.

Par ailleurs, il est possible de coupler ce modèle avec un sous-système issu d'un autre modèle. C'est ce qui a été réalisé avec GEMMES. Nous nous appuyons sur l'entrée en PIB de DyMEMDS/MATER. L'économie est décomposée entre quatre secteurs : le bâtiment, la production d'énergie, l'industrie et les transports. Pour un niveau de PIB donné, sur la base des tendances historiques dans les pays développés, DyMEMDS/MATER fournit la désagrégation du PIB entre ces quatre secteurs, et, là encore, entre les différentes infrastructures à construire dans ces secteurs, chaque infrastructure nécessitant un certain montant de diverses matières premières et ayant un impact particulier sur l'environnement. Pour un scénario de mix énergétique donné et donc une désagrégation des infrastructures, DyMEMDS/MATER nous fournit la quantité de différentes ressources naturelles nécessaires, ainsi que les émissions de CO<sup>2</sup> associées.

L'entrée en PIB du modèle repose sur le modèle économique GEMMES décrit par (Bovari et al., 2018), qui comprend un module climatique. Ce dernier permet de modéliser l'impact du climat sur le PIB, à travers une fonction qui reflète les dommages sur le capital productif et la production, comme dans les travaux de (Dietz & Stern, 2015).



**Figure 8** : Le modèle comporte trois blocs : le sous-système macroéconomique, le sous-système climat, et le sous-système ressources. Ces blocs communiquent par l'intermédiaire de variables communes aux différents sous-systèmes. Le couplage fonctionne de la façon qui suit : pour chaque pas de temps, le module économie transmet un PIB au module ressource. Ce PIB est ensuite désagrégé selon un scénario fortement inspiré du scénario Sky de Shell. La quantité de CO<sup>2</sup> alors calculée par le module biophysique est communiquée au module climat, ce qui permet d'affecter le nouveau PIB



**Figure 9** : À partir du modèle décrit sur la Figure 8, nous évaluons les quantités de ressources naturelles nécessaires pour atteindre le niveau de PIB calculé par le module économique du scénario de mix énergétique inspiré par Sky tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle.

Dans la Figure 9 : (a) Le PIB continue de croître malgré la fonction de dommage. Cela est cohérent avec la transition énergétique voulue par le scénario. (b) Simultanément, le parc de véhicules routiers augmente à

mesure que les pays continuent de se développer. Les quantités de véhicules électriques continuent de croître tandis que celles des véhicules thermiques diminuent. (c) Les flux des principales ressources extraites ont également tendance à augmenter tout au long du siècle.

Comme le montre la Figure 9(a), pour le scénario choisi, le PIB continue de croître malgré la fonction de dommage de (Dietz & Stern, 2015). Cela est cohérent avec le fait que le mix énergétique décrit dans ce scénario vise à respecter l'Accord de Paris, atténuant ainsi le changement climatique et les impacts sur l'économie qui pourraient en résulter.

Simultanément, le parc de véhicules routiers augmente à mesure que les pays continuent de se développer, comme le montre la Figure 9(b). En effet, à mesure que le PIB augmente, un pays a besoin d'équipements d'infrastructure supplémentaires, y compris de véhicules (individuels, de transport collectif, de fret...). Les stocks de véhicules électriques continuent de croître tandis que les stocks de véhicules à moteur thermique diminuent dans les années 2020, en raison des nouvelles réglementations ambitieuses que reflète le scénario.

La Figure 9(c) montre que les flux des principales ressources extraites ont également tendance à augmenter tout au long du siècle. La production d'électricité éolienne nécessite du zinc, tandis que la production d'électricité et les véhicules électriques nécessitent encore de grandes quantités de cuivre. Les véhicules électriques entraînent également une explosion de la consommation de graphite jusqu'à saturation du marché. On constate que la saturation du marché du graphite intervient en même temps que la saturation des flottes de poids lourds et de véhicules de tourisme, pour lesquelles ce métal est nécessaire.

L'expérience peut être réitérée avec d'autres scénarios ou encore d'autres fonctions de dommages. Les tendances de demande en métaux fournies par un tel modèle doivent être confrontées à des analyses prospectives de disponibilité, dans les domaines de la géophysique ou de la géopolitique, par exemple. Dans le cas du scénario fondé sur Sky, une telle étude permettra d'évaluer la faisabilité d'une transition énergétique respectueuse de l'Accord de Paris tout en soutenant la croissance économique. Alors que l'Agence Internationale de l'Énergie avertit que l'approvisionnement en ressources minérales critiques pourrait retarder les transitions énergétiques et affecter ainsi le climat et l'économie mondiale, notre méthodologie pourrait aider les décideurs à déterminer l'allocation et la planification des utilisations des ressources minérales.

Il est intéressant de souligner que deux utilisations différentes d'un modèle de type GEMMES (sections 3 et 4) permettent d'étudier différentes limites potentielles aux transitions énergétiques. Dans un cas, la disponibilité des capacités productives. Dans l'autre, la disponibilité des ressources naturelles.

## 5. Backtesting - quelle cohérence des modèles vis à vis du passé ?

Jusqu'à présent, l'approche présentée repose sur l'idée d'ajouter des couches théoriques au modèle pour y intégrer des phénomènes de plus en plus nombreux, afin de refléter au mieux la « réalité ». Cette complexification d'un modèle se matérialise par l'ajout d'équations et donc de paramètres. Sont appelés paramètres des grandeurs dont la valeur est jugée fixe lors des simulations, tels que le taux de dépréciation du capital ou le taux de croissance de la productivité du travail.

Afin de réaliser des simulations à l'aide d'un modèle, une valeur numérique doit être assignée à chacun des paramètres. Cette étape, qui fait le lien entre grandeurs réelles et modèle théorique, s'appelle la calibration.

Bien que le choix des paramètres affecte largement les résultats d'un modèle, l'étape de calibration est souvent jugée secondaire dans les travaux de modélisation. D'une part, la complexité théorique des modèles est souvent en décalage avec l'aspect rudimentaire des méthodes de calibration. D'autre part, la grande incertitude associée à la calibration des modèles n'est presque jamais retranscrite dans les résultats des simulations.

Se pose alors une question méthodologique : comment penser la relation entre les équations théoriques des modèles d'une part et les données réelles d'autre part ?

Un premier axe de réflexion concerne la calibration des modèles ainsi que la prise en compte de l'incertitude portant sur la valeur des paramètres dans le cadre des simulations. Habituellement, la calibration est réalisée « par morceau », c'est-à-dire que l'on cherche une valeur pour chacun des paramètres de façon



séparée. Cette approche pose toutefois deux problèmes. D'une part, elle ne prend pas en compte l'interaction entre les équations du modèle lors du processus d'estimation, ce qui peut engendrer des biais. D'autre part, elle rend difficile la prise en compte de l'incertitude associée au processus de calibration du modèle. L'incertitude liée à l'ensemble des paramètres estimés séparément peut en effet difficilement être agrégée.

Afin de dépasser ces difficultés, des travaux en cours visent à appliquer des méthodes de statistique bayésienne lors de la calibration d'un modèle. Cette approche permet d'estimer simultanément et de façon cohérente l'ensemble des paramètres. Le recours à une approche bayésienne permet aussi de prendre en compte l'incertitude portant sur ces paramètres : l'estimation aboutit à une distribution pour chaque paramètre et non à une unique valeur ponctuelle. Enfin, l'incertitude associée au processus d'estimation peut être transférée aux projections du modèle. La trajectoire unique des variables est alors remplacée par une distribution de trajectoires, reflétant de façon plus rigoureuse les évolutions futures.

Un second axe de réflexion doit permettre de comprendre comment les données réelles peuvent servir à tester et valider les modèles théoriques. À cet égard, le backtesting (ou hindcasting) constitue une approche intéressante. Le principe est de calibrer les paramètres du modèle sur une période historique donnée et de comparer les projections du modèle pour les périodes suivantes avec les données réelles. Cette approche repose sur l'idée que si le modèle est incapable de prédire le passé, il est sûrement trop erroné pour aider à la prise de décision dans le futur.

Aussi étonnant que cela puisse paraître, le backtesting est rarement appliqué en économie. (Millner & McDermott, 2016) ont pourtant mis en lumière la pertinence de cette méthode. Leurs résultats indiquent en particulier que la composante économique du modèle d'évaluation intégré DICE a une faible capacité prédictive au cours du XX<sup>ème</sup> siècle.

Il convient toutefois de garder à l'esprit que des décisions politiques ou des événements historiques peuvent affecter les variables économiques sans pour autant être prévisibles par les modèles. C'est l'enjeu des « changements de régimes ». Ces événements, qui mettent nécessairement en échec les prévisions des modèles, rappellent l'immensité de la tâche visant à faire cohabiter dans des modèles unifiés les sciences physiques et les sciences sociales.

## 6. Conclusion

Les activités humaines contemporaines ne sont pas neutres ou trans-historiques. Elles ont émergé dans un certain espace-temps, en une forme particulière de rapports sociaux. Au cœur de cette machinerie sociale se trouvent les processus de production, point central de nos sociétés, qui résultent en des échanges de flux affectant des stocks, qu'ils soient le produit de conventions humaines (salaires, dividendes, financements, dettes, etc.), ou physiques (extraction, destruction et échanges de matière, utilisation d'énergie, etc.).

Depuis les premières révolutions industrielles, nos processus de production sont devenus si prépondérants qu'ils sont capables de changer les équilibres terrestres, aussi bien en termes de climat, d'énergie, et de ressources, si bien qu'il semble raisonnable de qualifier cette ère géologique nouvelle via le terme d'anthropocène, ou de *capitalocène* si l'on veut mettre l'accent sur la structure sociale. *Modéliser l'économie dans l'environnement*, c'est s'intéresser au rôle joué par ces processus, d'en extraire les principaux procédés, et d'en déterminer les boucles de rétro-action avec les environnements dans lesquels ces procédés s'activent, aussi bien physiques que sociaux.

Ainsi, selon la perception du réel du modélisateur, ces étapes peuvent découler en théories reposant sur des ensembles d'hypothèses radicalement différentes (et même parfois opposées), ce qui explique, en partie, le grand nombre d'écoles économiques. Les modèles économiques présentés ici peuvent avoir des dynamiques hors équilibres et ne reposent pas sur la maximisation du bien être des agents (rationalité absolue). Ces derniers ne sont que raisonnablement rationnels, ils font au mieux pour réaliser des profits dans un monde incertain. Pour ces raisons, les présents modèles s'inscrivent dans une tradition de modèles économiques hétérodoxes.

Les modèles économiques sont souvent utilisés comme outils d'aide à la décision. Néanmoins, même si l'on souscrit à l'hypothèse de « non ergodicité de l'économie, » qui stipule que l'économie du passé ne peut

nous permettre de prédire l'économie du futur<sup>5</sup>, les nombreuses incertitudes qui existent, aussi bien liées à la calibration des modèles qu'à l'absence de *backtesting* (section 5) doivent nous maintenir en état de vigilance vis-à-vis de leurs prédictions. Néanmoins, si l'on se contente d'en examiner les tendances, les travaux présentés au cours de ce *symposium* peuvent apporter certaines réponses sur les anticipations que l'on peut faire :

- L'économie mondiale ne peut s'adapter aux changements climatiques tels que prédits par les *scenarii* sur lesquels elle est embarquée, sans voir émerger une série de crises économiques et financières de grande ampleur (section 2). Il est impossible de prédire les nouvelles structures sociales qui émergeraient de telles crises, ni si elles seront à l'avantage ou au désavantage du plus grand nombre.
- Une transition écologique, sociale et immédiate pourrait permettre de suffisants changements sociaux, afin de transformer nos processus de productions de telle sorte qu'ils deviennent écologiquement et socialement soutenables. Le financement d'une telle transition ne peut se faire sans régulations importantes et nécessite un rôle majeur joué par les politiques publiques (sections 2 et 4), et l'implication de toutes et tous dans les processus décisionnels, quels qu'ils soient.
- Une telle transition devra notamment se faire en repensant radicalement la notion de croissance (section 3), et donc de la notion sous-jacente de richesse. En particulier, il faudra reconsidérer les richesses humaines, jusque là mises de côté, telles que la maîtrise du temps, la pensée, la qualité des relations sociales, la coopération, le jeu, l'amour, le soin etc. (Tanuro, 2020).
- La « croissance verte, » tant désirée par une partie de nos politiques, ne peut être économiquement soutenable avec les Taux de Retour Énergétiques (TRE) projetés (section 3), et les gigantesques quantités de matières nécessaires ne permettent pas à l'ensemble de tous les pays de faire cette transition (sections 4). De plus, l'économie de guerre qu'il faudrait mettre en place pour cette « croissance verte » (section 3) pourrait conduire à l'émergence de bureaucraties autoritaires, ce qui conduirait bien à rendre la planète relativement propre et l'économie soutenable mais à de nouvelles structures de rapports sociaux potentiellement peu enviables.

D'un côté, puisque les ressources historiques sur lesquelles l'économie mondiale s'est fondée s'amenuisent, il paraît clair qu'elle devra faire face aux difficultés que représente le déficit de produire différemment. Elle devra en plus le faire dans un contexte de changement durable des conditions climatiques, difficiles à prédire, et qui impacteront à coup sûr les infrastructures existantes, devenues obsolètes. D'un autre côté, face à ces défis nouveaux imposés par le monde physique, il paraît également clair que les structures sociales de l'économie évolueront au cours de ces transformations, elles qui ont évolué si vite ces deux derniers siècles. À l'approche de ces limites externes, l'économie verra donc probablement l'émergence de limites sociales internes, qui devraient résulter en changements sociaux qui restent difficiles à anticiper. Pourtant, ce n'est qu'en poursuivant la modélisation de l'économie dans l'environnement que ce type de résultats peuvent émerger.

---

5 Sous hypothèse de non ergodicité, l'économie est supposée en perpétuelle évolution, avec des innovations qui empêche tout retour en arrière possible. En conséquence, le futur de l'économie n'est pas un reflet statistique du passé. On ne peut quantifier une probabilité qu'un événement se répète. Chaque crise nouvelle est unique, chaque innovation est imprévisible, tout comme ses conséquences.

## Références

- E. Bovari, G. Giraud, & F. Mc Isaac (2018) *Coping With Collapse: A Stock-Flow Consistent Monetary Macrodynamics of Global Warming*. *Ecological Economics*, 147(August 2016), 383–398.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.034>
- Simon Dietz & Nicholas Stern (2015) *Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: how Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions*. *The Economic Journal*. doi.org/10.1111/econj.12188.
- Jean-Baptiste Fressoz & Fabien Locher (2020) *Les Révoltes du ciel Une histoire du changement climatique XVe-XXe siècle* Paris, Seuil, coll. « L'Univers historique », 320 p., ISBN : 978-2-02-105814-7.
- Nicholas Georgescu-Roegen (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, 457 p.
- IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Pierre Jacques, Louis Delannoy, Baptiste Andrieu, Devrim Yilmaz, Hervé Jeanmart, & Antoine Godin (2022) *Assessing the Economic Consequences of an Energy Transition Through a Biophysical Stock-Flow Consistent Model*. Disponible à SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4174917> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4174917>
- Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers & William W. Behrens III (1972) *Limits to Growth*, Potomac Associates – Universe Books, 205 p.
- A. Millner, & T.K. McDermott (2016). *Model confirmation in climate economics*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(31), 8675-8680.
- C. Mora, B. Dousset, I. R. Caldwell, F. E. Powell, R. C. Geronimo, C. R. Bielecki, C. W. W. Counsell, B. S. Dietrich, E. T. Johnston, L. V. Louis, M. P. Lucas, M. M. Mckenzie, A. G. Shea, H. Tseng, T. W. Giambelluca, L. R. Leon, E. Hawkins, & C. Trauernicht (2017). *Global risk of deadly heat*. *Nature Climate Change*, 7(7), 501–506.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Safa Motesharrei, Jorge Rivas & Eugenia Kalnay (2014) *Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies*, *Ecological Economics*, Volume 101, pp. 90-102.
- Ilya Prigogine & Grégoire Nicolis (1985) *Self-Organisation in Nonequilibrium Systems: Towards A Dynamics of Complexity*. In: Hazewinkel, M., Jurkovich, R., Paelinck, J.H.P. (eds) *Bifurcation Analysis*. Springer, Dordrecht.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-009-6239-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6239-2_1)
- Bernard Stiegler (2020) *The Initial Trauma of Exosomatization Lecture for the Italian Society of Psychopathology National Congress (SOPSI)*, 19 février 2020.
- Daniel Tanuro (2020) *Trop tard pour être pessimiste !* Éditions Textuel, 324 p. ISBN : 978-2-84597-825-6