

OPINIONS & DÉBATS

N°23 - Septembre 2021

**Scénarios et modèles économie-climat :
une grille de lecture pour la finance durable**

**Climate-economic scenarios and models:
a reading guide for sustainable finance**

**Jean-Charles Hourcade & Frédéric Gheri & Romain Grandjean
Julien Lefèvre & Peter Tankov & Stéphane Voisin**



SOMMAIRE

Résumé	9
Scénarios et modèles économie-climat : des outils indispensables pour préparer l'avenir... à manipuler avec prudence	10
Les modèles intégrés économie-climat : quels usages pour quelles décisions ?	16
Introduction	16
I. Ce que sont et ne sont pas les modèles intégrés	17
1.1. Un rappel historique pour comprendre l'état de l'art actuel	17
1.2. Une taxonomie pour se repérer dans la jungle des IAM	19
1.3. Les IAM à un point de bifurcation	22
II. Des limites de l'état de l'art des IAM aux erreurs de cadrage	24
2.1. Quiproquos sur les IAM, malentendus sur la notion de dommage	24
2.2. Les risques de l'énergie-centrisme	25
2.3. Représentation des choix techniques, le défi de l'incertitude	26
2.4. Problèmes de cadrage macroéconomique, les tensions court terme/long terme	26
III. Du bon usage des scénarios des IAM pour le secteur financier	29
3.1. Quels besoins d'information pour quels usages ? Évaluation des impacts, alignement des portefeuilles et <i>stress tests</i>	29
3.2. Leçons de l'architecture de modélisation ACPR / Banque de France	30
3.2.1. Une architecture qui mobilise plusieurs outils de modélisation	30
3.2.2. Questions de cohérence entre NiGEM - modèle multisectoriel – IAM	32
3.3. Implications : une cartographie biaisée des risques	34
3.4. Scénarios, analyse des risques et stratégies d'alignement des portefeuilles	35
Conclusion : Gouvernance de l'utilisation des IAM en finance	37
Notes	38
Annexe : Classifications des modèles d'évaluation intégrée	42
Références	76

Opinions & Débats N° 23 - Septembre 2021

Publication de l'Institut Louis Bachelier

Palais Brongniart - 28 place de la Bourse 75002 Paris ♦ Tél. : 01 73 01 93 40 ♦ www.institutlouisbachelier.org

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Jean-Michel Beacco ♦ COORDINATION ÉDITORIALE : Ryadh Benlahrech

CONTACT : ryadh.benlahrech@institutlouisbachelier.org

CONCEPTION GRAPHIQUE : Vega Conseil 01 48 85 92 01

CONTENTS

Abstract	43
Economy-climate models and scenarios: essential tools for preparing the future... to be handled with caution	44
Integrated economy-climate models and their uses for decision-making	50
Introduction	50
I. What integrated models are and are not	51
1.1. A historical review to understand the current state of the art	51
1.2. A taxonomy for navigating the IAM jungle	53
1.3. IAMs at a bifurcation point	56
II. From the limitations of the state of the art of IAMs to framing errors	57
2.1. Misunderstandings about IAMs and the concept of damage	57
2.2. The risks of energy-centrism	58
2.3. Representation of technical choices and the challenge of uncertainty	59
2.4. Macroeconomic framing issues, short-term and long-term tensions	60
III. The proper use of IAM scenarios for the financial sector	62
3.1. What information is needed for specific uses? Impact assessment, portfolio alignment and stress tests	62
3.2. Lessons from the ACPR / Banque de France modelling architecture	63
3.2.1. An architecture that mobilises several modelling tools	63
3.2.2. Questions of consistency between NiGEM, the multisector model and IAMs	65
3.3. Implications: biased risk mapping	66
3.4. Scenarios, risk analysis and portfolio alignment strategies	68
Conclusion: governance of the use of IAMs in finance	70
Notes	71
Annex: Classifications of integrated assessment models	75
References	76

Les articles publiés dans la série “Opinions & Débats” offrent aux spécialistes, aux universitaires et aux décideurs économiques un accès aux travaux de recherche les plus récents. Ils abordent les principales questions d’actualité économique et financière et fournissent des recommandations en termes de politiques publiques.

The Opinions and Debates series sheds scientific light on current topics in economics and finance. Bringing together several types of expertise (from mathematicians, statisticians, economists, lawyers, etc.) this publication makes recommendations in the formulation and implementation of public economic policy.





Jean-Michel Beacco

*Délégué général
de l'Institut Louis Bachelier*

L'urgence climatique devient malheureusement de plus en plus tangible sur notre planète. En témoignent les récents phénomènes météorologiques, qui se sont manifestés partout dans le monde. Hélas, ces événements ont en commun de lourds bilans humains et matériels. Et de nombreux experts estiment que leur fréquence est amenée à augmenter sans inflexion majeure à la baisse de la courbe des émissions de gaz à effet de serre. La première partie du rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), n'incite guère à l'optimisme.

Dans ce contexte préoccupant, les risques climatiques, à la fois physiques et de transition, sont amenés à augmenter et constituent une épée de Damoclès pour le secteur financier, particulièrement exposé et qui doit, de surcroît, aider au financement d'une économie bas-carbone. À l'Institut Louis Bachelier, notre ambition est de contribuer - modestement à notre échelle - à faire émerger des réponses pertinentes au problème du réchauffement climatique. Parmi les domaines étudiés dans nos programmes de recherche, au sein du Green and Sustainable Finance Programme, figurent celui des modélisations de scénarios climatiques en finance. Ceux-ci se caractérisent par de très fortes incertitudes et des horizons temporels de long terme, qui nécessitent des évolutions et adaptations importantes des méthodologies par rapport à la gestion des risques financiers classiques.

Ce numéro de la collection *Opinions & Débats*, réalisé par des chercheurs et experts dans la modélisation et en finance durable, fournit ainsi une grille de lecture pour mieux cerner les défis auxquels sont confrontés les entreprises et le secteur financier. Or, sans une compréhension fine des modèles et des scénarios qui en sont issus, il sera plus difficile de parvenir à contenir le réchauffement climatique sous les deux degrés. Cette nouvelle édition est une formidable occasion de passer en revue les différentes méthodologies employées et de formuler des axes de progression à la communauté financière, mais aussi académique.

Bonne lecture !

The climate emergency is unfortunately becoming ever more acute, as shown by recent meteorological phenomena around the planet. These extreme events have, regrettably, exacted a heavy toll, both human and material. And many experts believe that their frequency will increase unless there is a major reduction in greenhouse gas emissions. Yet the first part of the most recent IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report gives little cause for optimism.

In this worrying situation, climate risks, both physical and transition-related, are set to increase. This growing threat amounts to a sword of Damocles for finance, a sector which is particularly exposed and which has an obligation, therefore, to help fund the low-carbon economy. At the Institut Louis Bachelier, our ambition is to contribute – modestly, in accordance with our resources – to the emergence of appropriate responses to the problem of global warming. One of the areas studied in our research, as part of the Green and Sustainable Finance Programme, is the modelling of climate scenarios in finance. Characterised by very high levels of uncertainty and long-term time horizons, such scenarios call for significant changes to and adaptations of methodologies compared to traditional financial risk management.

This issue of *Opinions & Débats*, produced by researchers and experts in modelling and sustainable finance, provides an analytical framework for better understanding the challenges facing businesses and the financial sector. Without a thorough understanding of the models and the scenarios arising from them, it will be more difficult to keep global warming below two degrees. This new edition of O&D is a welcome opportunity to review the different methodologies used and to provide the financial community – and the academic community – with ways forward.

Enjoy your reading!

BIOGRAPHIE



Frédéric Gherzi

Frédéric Gherzi est chercheur au CNRS affecté au Centre International de Recherche sur l'environnement et le Développement (CIRED) à Paris. Depuis 1997, il travaille sur la modélisation des interactions économie-énergie-environnement (3E), qu'il applique au développement de prospectives sur l'efficacité et l'équité des politiques climatiques et des transitions énergétiques. Ses recherches actuelles portent sur la macroéconomie de la finance des politiques climatiques, sur les impacts distributifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et sur le transfert de la méthode IMACLIM (hybridation de modèles et de données) à des partenaires académiques internationaux dans le cadre du réseau IMACLIM, qui s'étend désormais à onze pays dont la France et les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud).

Frédéric Gherzi is a French CNRS researcher assigned to the Centre International de Recherche sur l'environnement et le Développement (CIRED), Paris. Since 1997, he has been working on hybrid bottom-up and top-down modelling of economy-energy-environment (3E) interactions, which he applies to develop outlooks on the efficiency and equity of climate policies and energy transitions. His current research focuses on the macroeconomics of climate finance; on the distributional impacts of the French National Low Carbon Strategy (SNBC); and on the transfer of the IMACLIM method (model and data hybridization) to international academic partners in the framework of the IMACLIM Network, now extending to eleven countries including France and the BRICS.

Diplômé de l'école des Arts et Métiers ParisTech et de l'IFP School, **Romain Grandjean** a travaillé au sein d'un groupe pétrolier pendant plusieurs années avant d'intégrer The Shift Project en 2016. Il est le chef de projet et l'auteur principal des deux études réalisées par The Shift Project en partenariat avec l'Afep (Association française des entreprises privées) : "Analyse du risque climat : acteurs, méthodologie, perspectives" (2018) et "Scénarios énergie-climat : évaluation et mode d'emploi" (2019). Depuis avril 2020, il participe au développement d'un projet (l'Initiative IRIS) qui vise à fédérer de grandes entreprises françaises et européennes pour concevoir de nouveaux outils de prospective stratégique et ainsi les aider à maîtriser leur destin face aux enjeux de la transition bas-carbone et de l'adaptation au changement climatique.



Romain Grandjean

A graduate of Arts et Métiers ParisTech and IFP School, **Romain Grandjean** worked in an oil company for several years before joining The Shift Project in 2016. He is the project manager and lead author of the two studies conducted by The Shift Project in partnership with Afep (the French Association of Private Enterprises): "Climate risk analysis: actors, methodology, perspectives" (2018) and "Energy-climate scenarios: evaluation and guidance" (2019). Since April 2020 Romain has been involved in the development of a project (the IRIS Initiative) that aims to bring together large French and European companies to design new strategic foresight tools and thus help them control their future development in the face of the challenges of the low-carbon transition and adaptation to climate change.



Jean-Charles Hourcade

Jean-Charles Hourcade, (HEC 1971, Docteur en Sciences Sociales, Docteur d'Etat en Sciences Economique) a dirigé le CIREAD de 1985 à 2012 où il a développé le modèle intégré IMACLIM. Auteur de 192 articles dans des revues à comité de lecture, il a dirigé plusieurs projets de recherche Européens et a été expert pour la plupart des agences internationales sur l'environnement et l'énergie (OCDE, PNUE, Banque mondiale, AIE, AIEA, UNESCO). Il a été membre du Comité National de la Recherche de 1989 à 1999, puis de 2006 à 2010. Membre actif de l'équipe de négociation française sur le climat entre la COP3 (Kyoto) et la COP6 (La Haye), auteur coordinateur et auteur principal de cinq rapports du GIEC dont le rapport 1,5° C, il est contributeur au prix Nobel de la paix du GIEC en 2007. Il vient de publier un rapport pour le Fonds Vert Mondial sur le financement de la transition bas carbone.

Jean-Charles Hourcade, (HEC 1971, PhD in Social Sciences, Doctorat d'Etat in Economics) from 1985 to 2012 was the director of CIREAD where he developed the integrated model IMACLIM. Author of 192 articles in peer-reviewed journals, he has led several European research projects and has been an expert for most international agencies focusing on environment and energy (OECD, UNEP, World Bank, IEA, UNESCO). He was a member of the National Research Committee from 1989 to 1999 and from 2006 to 2010. He was an active member of the French climate negotiation team between COP3 (Kyoto) and COP6 (The Hague), coordinating author and lead author of five IPCC reports, including the 1.5° C report, and a contributor to the IPCC Nobel Peace Prize in 2007. He has just published a report for the Global Green Fund on financing the low-carbon transition.

Julien Lefèvre est ingénieur des Ponts, des Eaux et Forêts, chercheur au CIREAD et enseignant à AgroParisTech. Ses travaux portent sur la modélisation intégrée énergie-économie appliquée à l'analyse prospective des aspects socio-économiques des transitions énergétique et bas carbone. Ses recherches actuelles portent sur les impacts macroéconomiques, énergétiques et matières des politiques climatiques et stratégies bas-carbone au niveau national (e.g. SNBC en France) et sur les enjeux macroéconomiques de la transition bas carbone au niveau mondial.



Julien Lefèvre

Julien Lefèvre is a researcher at CIREAD and lecturer at AgroParisTech. He has been working on energy-economy integrated models used to assess the socio-economic implications of energy and low carbon transitions. His current research focuses on the macroeconomic, energy and material impacts of climate policies and low carbon strategies at national level (e.g. the French National Low Carbon Strategy – SNBC) and on the macroeconomic implications of the low carbon transition at the global scale.



Peter Tankov

Professeur de finance quantitative et responsable de la voie finance/gestion des risques à l'ENSAE, **Peter Tankov** est diplômé de l'École polytechnique (X98) il a été professeur à l'Université Paris Diderot et professeur chargé des cours à l'École polytechnique. Sa recherche est centrée sur les domaines de finance quantitative de l'énergie et de la finance verte. Il travaille sur les sujets liés aux marchés de l'électricité, scénarios de mix énergétique, prévision et gestion des risques pour l'industrie de l'énergie renouvelable. Il est l'auteur de plus de 45 articles de recherche et d'un livre de référence sur la modélisation stochastique avec sauts. Il est membre du directoire scientifique de l'Institut Louis Bachelier où il est aussi le responsable scientifique du programme de recherche interdisciplinaire sur la finance verte et durable (Green and Sustainable Finance - GSF). Il siège au conseil d'administration du réseau de recherche international GRASFI sur la finance durable.

Peter Tankov is professor of quantitative finance and head of the finance/risk management track at ENSAE. He graduated from École polytechnique (X98) and was professor at the University of Paris Diderot and lecturer at École polytechnique. His research focuses on quantitative energy finance and green finance. He works on topics related to electricity markets, energy mix scenarios, forecasting and risk management for the renewable energy industry. He is the author of more than 45 research papers and a reference book on stochastic modelling with jumps. He is a member of the scientific board of the Louis Bachelier Institute where he is also the scientific leader of the interdisciplinary research program on green and sustainable finance (GSF). He sits on the board of the international research network GRASFI on sustainable finance.

Stéphane Voisin coordonne à l'Institut Louis Bachelier le Programme Interdisciplinaire sur la Finance Verte et Durable. Il est membre de la Plateforme de la Commission Européenne sur la Finance Durable et membre de plusieurs Comités Scientifiques dont celui de l'Observatoire de la Finance Durable. Analyste financier et ESG et membre de la SFAF (Société française des analystes financiers), il a dirigé le bureau de recherche Sustainability de Cheuvreux, puis de Kepler Cheuvreux. Il conseille différentes institutions dans leur stratégie de finance durable, une matière qu'il enseigne à l'Université Paris-Dauphine et à Sciences Po.



Stéphane Voisin

Stéphane Voisin coordinates the Interdisciplinary Programme on Green and Sustainable Finance at the Institut Louis Bachelier. He is a member of the European Commission's Platform on Sustainable Finance and a member of several Scientific Committees including the Sustainable Finance Observatory. A financial and ESG analyst and member of the SFAF (French Society of Financial Analysts), he headed the Sustainability research office of Cheuvreux, then of Kepler Cheuvreux. He advises various institutions in their sustainable finance strategy, a subject he teaches at the University of Paris-Dauphine and at Sciences Po.

Scénarios et modèles économie-climat : une grille de lecture pour la finance durable

Résumé

Au vu de l'urgence climatique, il ne fait aucun doute que la transition vers une économie bas carbone entrainera des changements profonds du système économique et du fonctionnement de la société dans les années et les décennies à venir. La manière dont ces changements vont intervenir, les risques et les opportunités qu'ils vont créer pour les agents économiques sont en revanche difficiles à prévoir. Face à une telle incertitude, les modèles intégrés économie-climat cherchent à décrire les scénarios possibles de la transition, et à fournir aux décideurs publics les outils pour optimiser leurs actions, et aux agents économiques les informations pour comprendre les avènements possibles auxquels ils doivent se préparer.

Jusqu'ici réservée à une petite communauté d'initiés, l'utilisation des scénarios est maintenant exigée des entreprises et des institutions financières par les organismes internationaux comme le TCFD (*Task Force on Climate-related Financial Disclosures*) ou le NGFS (*Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System*). Ce numéro de la collection Opinions et Débats propose donc d'apporter une grille de lecture et des éléments de contexte aux utilisateurs des modèles intégrés et des scénarios qui sont produits à l'aide de ces modèles.

Ce numéro réunit deux articles dont le premier pose les bases du débat en rappelant l'importance des scénarios pour le monde de l'entreprise et les principales critiques des modèles intégrés. Après un rappel historique, le deuxième article présente l'état de l'art des modèles intégrés, en décomposant l'ensemble des modèles selon trois axes : le degré de précision technologique, le niveau de complexité des rétroactions macroéconomiques et enfin le degré du réalisme des comportements et des marchés. Les auteurs reviennent ensuite sur les limites des modèles intégrés et dissipent certains malentendus, notamment sur la notion des dommages.

La dernière partie de l'article est consacrée à l'utilisation des modèles intégrés en finance, avec une analyse détaillée du récent exercice de *stress tests* climatique de l'ACPR (l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution). Nous concluons sur les enjeux de gouvernance liés et les modalités d'utilisation des modèles intégrés par les acteurs financiers.

Scénarios et modèles économie-climat : des outils indispensables pour préparer l'avenir... à manipuler avec prudence

Romain Grandjean

Chef de projet Initiative IRIS

En juin 2017, la *Task Force on Climate-related Financial Disclosures* (TCFD)¹ a publié 11 recommandations adressées aux entreprises financières et non-financières, afin de favoriser la publication d'informations sur leur exposition aux risques climatiques. L'une d'entre elles appelle les entreprises à *“décrire la résilience de [leur] stratégie, en tenant compte de différents scénarios liés au climat, y compris un scénario de 2 °C ou moins”*².

Depuis lors, les débats à propos des scénarios, qui décrivent la transition vers une économie bas carbone et résiliente sont devenus très présents parmi les entreprises, les acteurs financiers, voire les régulateurs. Ils posent deux questions essentielles réservées jusqu'alors aux seuls initiés :

- Celle des outils qui permettent de décrire les transformations à venir, ou plus exactement de représenter les interactions aussi nombreuses que complexes entre notre système socioéconomique et l'environnement ;
- Celle des méthodes d'analyse du futur sur lesquelles les acteurs financiers et non-financiers vont s'appuyer pour se préparer aux transformations à venir.

1. Les “scénarios”, un outil puissant pour appréhender les bouleversements à venir

Les réflexions initiées par la TCFD n’ont pas lieu par hasard. Elles interviennent dans un contexte bien particulier.

Dans les années à venir, il ne fait, en effet, aucun doute que la transition vers une économie bas carbone et résiliente entraînera des transformations profondes du système économique, que celles-ci soient organisées ou subies. La dépendance de l’économie mondiale aux énergies fossiles, alors même que celles-ci sont la source de 80 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), la nécessité de réduire ces mêmes émissions de l’ordre de 6 % par an si nous voulons maintenir le réchauffement global au-dessous de 2 °C ou encore les tensions sur les approvisionnements³, sont autant de facteurs d’instabilité et d’incertitude. Tout porte donc à croire que ces transformations pourront intervenir de manière chaotique, à travers des ruptures profondes d’ordres technologique, politique, économique et social. Pour les entreprises de tous les secteurs, cela se traduit par un bouleversement de leur environnement d’affaire auquel elles doivent se préparer.

Or, face à cette nouvelle donne stratégique, la réalisation d’une analyse par scénarios⁴ se révèle un outil puissant pour appréhender les transformations à venir et construire une stratégie résiliente. Une littérature abondante existe déjà sur cette méthode qui, en synthèse, consiste à projeter une organisation dans plusieurs futurs possibles, mais différents, décrits par des scénarios. Se faisant, les décideurs peuvent alors anticiper plusieurs évolutions concernant les enjeux qui les intéressent et élaborer une stratégie d’adaptation quelle que soit l’issue. Elle constitue en cela une approche rationnelle et objective pour maîtriser l’incertitude de l’avenir et, au-delà, créer la confiance en interne comme en externe de l’organisation. Naturellement dans ce processus, la diversité, la cohérence globale et la pertinence (adaptation aux enjeux étudiés et aux caractéristiques de l’utilisateur) des scénarios analysés sont essentiels.

La méthode d’analyse par scénarios n’est pas nouvelle et a été appliquée par plusieurs entreprises dès les années 1970. C’est notamment le cas de Shell qui fait partie des pionniers en la matière. L’histoire retiendra que ses travaux d’analyse par scénarios ont permis à cette entreprise d’anticiper la Crise d’octobre 1973 et d’avoir été mieux préparée que ces concurrents⁵.

Aujourd’hui, au-delà de la TCFD, de nombreux acteurs financiers et non financiers⁶ appellent ainsi à généraliser l’approche scénarisée pour appréhender l’avenir et se préparer aux transformations liées à la décarbonation de l’économie ou au changement climatique. C’est aussi le cas des régulateurs, qui alertent sur le caractère potentiellement chaotique de la transition⁷. Cependant, compte tenu de la particularité de ces enjeux (notamment leur dimension systémique et de long terme), le passage de la théorie à la pratique ne va pas sans poser certaines difficultés⁸, qui participent à circonscrire l’analyse aux quelques scénarios de place les plus connus.

Les entreprises non-financières sont, par nature, favorables à la réalisation d’une analyse par scénarios. Mais, au-delà d’un besoin de méthode pour l’intégrer à leur processus interne de réflexion stratégique, la conception des scénarios sous-jacents, à la fois quantifiés, cohérents, contrastés et adaptés à leurs besoins, paraît hors de leur portée. À ce jour, très peu d’entre elles y consacrent des ressources, ni ne disposent des compétences pour le faire seules au bon niveau.

C'est également le cas des acteurs financiers, pour lesquels une autre problématique s'ajoute : le besoin fort de comparer facilement les entreprises (et les stratégies qu'elles affichent) entre elles. La prééminence du principe de comparabilité des informations publiées dans les travaux de la TCFD⁹ n'est pas un hasard. Cependant, appliqué à la méthodologie d'analyse par scénarios, ce critère pousse, par construction, le recours à des scénarios quantifiés largement partagés par les différents utilisateurs (entreprises financières et non-financières). Par ailleurs, l'usage de tels scénarios comporte également l'avantage d'une simplification (supposée) du processus d'analyse et finalement d'une réduction des coûts qu'il engendre¹⁰. Cet argument est particulièrement séduisant pour les investisseurs alors que se développe massivement la gestion passive.

La conjonction de ces deux phénomènes conduit ainsi l'ensemble de ces acteurs d'une part à "externaliser" la conception de scénarios, et d'autre part à se tourner par mimétisme vers les mêmes scénarios disponibles "sur étagère", qui offrent le niveau de détail et de quantification recherché et tirent leur légitimité de l'institution qui les publie. C'est par exemple le cas des scénarios de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Cette situation présente, aujourd'hui, au moins trois inconvénients. D'abord, l'usage d'un panel réduit et homogène de scénarios conduit à limiter la variété des futurs étudiés et, dès lors, la pertinence des analyses associées. Cela favorise également l'adoption d'une vision normative et préemptée du futur, alors même que le caractère potentiellement chaotique (au sens mathématique du terme) de la transformation du système économique requiert au contraire de l'intelligence prospective. Enfin, et surtout, les quelques scénarios utilisés reposent sur une approche de modélisation quantitative qui, à ce jour, ne permet pas de saisir la nature complexe et non linéaire des transformations à venir.

Ce dernier aspect est essentiel : au-delà des scénarios que les entreprises et les investisseurs pourraient utiliser, les outils de modélisation quantitatifs occupent désormais une place centrale dans la construction des décisions politiques ou économiques.

2. Modèles utilisés aujourd'hui : pourquoi ça ne fonctionne pas ?

La plupart des scénarios utilisés, aujourd'hui, pour évaluer les enjeux de transition ou d'adaptation reposent sur des modèles quantitatifs d'évaluation intégrés (MEI ou IAM en anglais). Plus ou moins sophistiqués et agrégés selon les besoins, ceux-ci visent à représenter, à partir d'un système d'équations mathématiques et d'un processus de résolution, les interactions entre le système économique et l'environnement "physique" dans lequel il s'insère. De tels modèles ont émergé avec le besoin croissant de dimensionnement des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique telles que la fiscalité du carbone ou la planification des investissements dans le système de production d'énergie.

Les MEI les plus utilisés aujourd'hui par les acteurs économiques publics ou privés peuvent être regroupés en deux catégories : les modèles "technico-économiques" et les modèles "coût-bénéfice".

Les premiers (d'une très grande variété, voir l'article de Jean-Charles Hourcade *et al.* dans la suite de cette publication) comportent un niveau de désagrégation sectorielle et géographique très important et s'efforcent de représenter le plus finement les liens entre les

activités économiques (via l'usage de l'énergie) et les émissions de GES. Leur structure est modulaire (couplage de plusieurs sous-modèles entre eux) et d'autant plus complexe que le modèle se veut précis. Ils sont essentiellement utilisés pour déterminer la trajectoire la moins coûteuse permettant d'atteindre un objectif de réduction des émissions de CO₂ préalablement fixé. Le processus de résolution consiste à équilibrer une demande exogène d'énergie (construite à partir du PIB, de la population et de l'évolution de certains usages notamment des modes de transports) avec une production optimisée, selon la contrainte d'émission de CO₂ via une amélioration de l'efficacité énergétique (dans les processus de production ou de consommation) et une recomposition endogène du mix de production d'énergie. Les impacts "physiques" du changement climatique ne sont pas représentés (ou alors marginalement dans certains secteurs comme l'agriculture), la raison principale étant qu'ils sont surtout utilisés pour représenter les chemins permettant de "rester sous les deux degrés".

Compte tenu de leur forte désagrégation géographique et sectorielle, la quasi-exclusivité des scénarios utilisés par les entreprises, comme ceux étudiés par le Groupe 3 du GIEC¹¹, repose sur les modèles de cette catégorie.

Les modèles "coût-bénéfice" représentent, dans un même cadre, les impacts et l'atténuation du changement climatique, en essayant de déterminer un optimum entre coûts des dommages et de l'atténuation. Le modèle DICE, développé par William Nordhaus, est le plus connu. À la différence des modèles "technico-économiques", ces modèles incluent une représentation de l'économie très agrégée. Ils reposent d'une part sur une fonction de bien-être social – le plus souvent basée sur une maximisation intertemporelle de l'utilité inspirée du modèle de Ramsey¹² –, et d'autre part sur une représentation des interactions entre les émissions de GES, les hausses de température et les dommages économiques associés. Les "dommages" climatiques sont représentés par une fonction de rétroaction, qui lie la variable "externalité" (ici l'augmentation de la température) à une variable décrivant l'impact économique associé (la croissance du PIB par exemple). La détermination de telles fonctions n'est pas sans poser de nombreux défis¹³. Bien que leurs limites soient bien connues de la communauté académique, la notoriété de W. Nordhaus est telle que leurs résultats sont encore cités par des institutions prestigieuses¹⁴. Or, les résultats du modèle DICE suggèrent qu'un réchauffement global de 6 °C en 2100 ne coûterait que 8 à 10 points de PIB mondial (qui croîtrait d'un facteur 8 d'ici là), alors même que les scientifiques nous indiquent qu'un tel réchauffement engendrerait un effondrement des économies.

Quoi qu'il en soit, les modèles qui tombent dans les catégories évoquées ci-dessus visent à représenter (avec des objectifs différents) les interactions complexes entre des éléments "sociaux" complexes (les individus), mais dont le comportement, décrit par des équations mathématiques, reste à valider. L'approche selon laquelle ces interactions sont décrites, dans la mesure où celle-ci caractérise la manière dont le système socio-économique exploite les ressources de l'environnement et crée des externalités, est ainsi déterminante.

Or, à ce jour, un grand nombre de modèles demeurent fondés, au moins en partie, sur une représentation néoclassique de l'économie¹⁵ postulant que l'économie est à l'équilibre ou y retourne spontanément à la suite d'un choc. Cette représentation de l'économie induit une certaine configuration des modèles marquée, notamment par l'existence d'agents économiques représentatifs, la rationalité et la parfaite information des agents économiques (optimisation intertemporelle de leur utilité et leur profit), le retour à l'équilibre des marchés, à long terme, vers un optimum.

Alors même que la transition vers une économie bas-carbone est un processus inédit, complexe et non-linéaire, susceptible d'induire des transformations profondes du système socio-économique et d'engendrer de nouvelles dynamiques de fonctionnement (usages, valeurs, institutions, structures, etc.), une littérature scientifique, désormais abondante¹⁶, témoigne des limites d'une telle approche. Parmi elles, l'ajustement vers l'équilibre par une parfaite flexibilité des prix, l'absence de prise en compte des contraintes de ressources naturelles et donc de rebouclage "physique", la dépendance des résultats des modèles à la valeur du taux d'actualisation retenu et la neutralité de la monnaie font partie des plus significatives¹⁷.

Parmi les autres enjeux associés à l'exercice de modélisation, la qualité des données utilisées pour calibrer les modèles pose également question.

Alors que les modèles représentant des systèmes "physiques" (climatiques ou météorologiques par exemple) bénéficient pour leur mise au point d'un ensemble de mesures relativement sophistiquées, les modèles économiques sont, quant à eux, calibrés sur des données statistiques "construites socialement", et dès lors dépendantes des performances d'institutions (parfois très faibles dans certains pays), ainsi que des méthodes de construction de ces données.

Par ailleurs, la complexité croissante des modèles conduit à une forte dépendance des résultats au calibrage de paramètres, alors que ce processus est souvent réalisé de manière empirique en dehors de tout cadre théorique.

Cette brève recension souligne comment l'usage des modèles utilisés dans le monde économique aujourd'hui peut conduire à la production de scénarios décrivant une évolution de l'économie au mieux partielle, et au pire physiquement impossible (notamment parce qu'aucun modèle ne contrôlent s'il bute ou non sur des limites physiques autres que les émissions de CO₂).

Que dire ainsi des scénarios produits par de grandes organisations internationales, qui décrivent un découplage rapide et radical entre le PIB et la consommation d'énergie, alors que cela n'a jamais été observé dans l'histoire¹⁸? Certes, le passé ne détermine pas l'avenir, mais de telles ruptures devraient être solidement justifiées, notamment par des politiques économiques elles aussi en rupture, ce qui n'apparaît pas clairement dans ces exercices.

Ces exemples montrent les précautions que le décideur doit prendre avec les résultats produits par ces outils pour fonder sa décision.

3. Pistes de réflexion : comment trouver la voie ?

La tendance qui caractérise aujourd'hui l'utilisation des scénarios et des modèles témoigne d'une tentation du monde économique à la "prédiction quantitative" de l'avenir, alors même que pour toutes les raisons évoquées précédemment, cela n'est ni possible, ni souhaitable.

On peut, cependant, esquisser des pistes de réponse pour permettre une utilisation plus pertinente et avisée de ces outils et méthodes.

Face à l'incertitude de l'avenir, on ne peut déjà qu'appeler les acteurs économiques publics et privés à réaliser des analyses scénarisées du futur, fondées sur des scénarios aussi diversifiés et cohérents que possible. Cela passe par une véritable appropriation de l'outil "scénarios" et des modèles sur lesquels ils reposent nécessairement¹⁹, afin de relativiser et contextualiser les résultats décrits. Dit autrement, les résultats d'un modèle seul, sans contexte, ne peuvent donc - et ne doivent pas - fournir un "argument d'autorité" sur lequel une décision serait fondée.

Il est ensuite nécessaire d'ouvrir davantage l'exercice de modélisation encore trop opaque malgré son importance. Cela concerne notamment pour l'ensemble des modèles :

- La publication en accès libre d'une documentation technique complète et explicite, qui inclurait notamment la liste exhaustive de l'ensemble des hypothèses d'entrée (variables exogènes et indicateurs structurels, tel que le taux d'actualisation) ;
- La réalisation de tests rétroactifs de validité (*back testing*) et leur partage explicite avec la critique (la confrontation des données de sortie des modèles aux données observables est le premier critère de validité) ;
- La limitation au maximum du recours à des variables cachées non observables (comme les fonctions d'utilité) et la réalisation de tests de sensibilité à la calibration des paramètres du modèle.

Compte tenu des limites bien identifiées des modèles et des scénarios les plus utilisés, il est, enfin, nécessaire d'investir des ressources dans la conception de scénarios fondés sur des approches de modélisation alternatives. Même s'il est souhaitable de capitaliser sur les outils existants et de mieux les mettre au service de ce renouvellement de la scénarisation que nous appelons de nos vœux, il est souhaitable de favoriser le développement et l'usage de nouveaux modèles mieux adaptés, dès leur conception à l'incertitude forte à laquelle nos sociétés se trouvent confrontées. Ces nouvelles approches de modélisation doivent garantir la prise en compte des sous-jacents physiques de l'économie et des contraintes posées par les limites planétaires, tout en assurant une cohérence globale en matière de stocks et de flux physiques (climat, ressources, biodiversité). Les modèles de dynamiques de systèmes²⁰ présentent de ce point de vue des caractéristiques intéressantes.

Toutefois, même renouvelé et amélioré, l'exercice de modélisation, comportera ses limites : s'il est possible de représenter des ruptures ou des changements de caps, il n'est vraisemblablement pas possible, par exemple, de représenter le chaos.

Quoi qu'il en soit et même s'il ne s'agit pas de leur cœur de métier, il est clairement dans l'intérêt des entreprises d'encourager et de soutenir cet effort de recherche. C'est de leur pérennité et de leur prospérité dont il est question.

Les modèles intégrés économie-climat : quels usages pour quelles décisions ?

Frédéric Gherzi, Jean-Charles Hourcade, Julien Lefèvre

*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, UMR 8568, CNRS,
Ponts Paristech, Agro Paristech, EHESS, CIRAD, Université Paris-Saclay.*

Peter Tankov, *CREST-ENSAE, Institut Polytechnique de Paris*

Stéphane Voisin, *Institut Louis Bachelier*

Introduction

La communication et les débats publics sur le changement climatique sont toujours principalement alimentés par les modèles climatiques répertoriés par le Groupe I du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), alors que la construction de modèles capables de cerner les conditions technologiques et économiques des trajectoires de contrôle des émissions de gaz à effet de serre (GES) date des années 1990. Ces modèles furent analysés dès 1995 par le Groupe III du GIEC (GIEC, 1995) puis, sous le vocable de *Integrated Assessment Models* (IAM), et mobilisèrent une communauté scientifique implantée dans des dizaines de pays, y compris des pays en développement.

À l'origine utilisés pour éclairer des questions d'économie publique (tempo de l'action, prix du carbone, impacts des politiques climatiques sur la croissance, l'emploi et la distribution des revenus), les IAM font l'objet, depuis quelques années, de demandes croissantes de la part d'acteurs économiques et financiers à la recherche de perspectives pour éclairer leurs choix technologiques (véhicule électrique, hydrogène, éoliennes, bio-carburants) ou la composition de leurs portefeuilles financiers. Témoin de cet intérêt, la récente étude du Shift Project pour l'Association Française des Entreprises Privées sur les scénarios énergie climat, révèle la difficulté d'appréhender les IAM de manière pertinente pour des observateurs privés de guide de lecture²¹.

Les IAM sont une jungle peuplée de "tribus" et nous vous proposerons d'abord un détour sur leur histoire pour éviter que l'explosion des demandes d'expertise par des acteurs économiques pressés d'intégrer les objectifs de l'Accord de Paris ne conduise à des malentendus. Ces derniers ont des conséquences sur la "carte mentale" qui structure la délibération publique et les prises de décision. Nous discuterons ensuite des conditions méthodologiques d'usage des IAM pour les différentes questions que se posent les milieux financiers, et des conditions de leur "bonne gouvernance".

I. Ce que sont et ne sont pas les modèles intégrés

1.1. Un rappel historique pour comprendre l'état de l'art actuel

Les IAM héritent de l'histoire de la modélisation énergétique depuis l'après-guerre. Par rapport à d'autres secteurs, l'énergie a trois caractéristiques qui expliquent que ce soit un domaine où "*la science économique s'est incarnée*" (Marcel Boiteux) : nécessité de maîtrise du long terme vus les temps de déploiement et les durées de vie des équipements, capacité d'agrégation de différentes énergies finales en une métrique simple (tonne-équivalent pétrole ou joule), rôle des prix dans la coordination des systèmes techniques à chaque instant et dans le financement de leur expansion.

La mobilisation de principes théoriques bien établis au service du calcul économique (Arrow, Debreu, Kantorovitch, Lange) a été accélérée par l'émergence, après le programme Apollo (1961) et la diffusion des IBM 360-40, de capacités de calcul fondées sur la programmation linéaire pour optimiser un système technique répondant à une demande donnée, et sur l'économétrie pour projeter cette demande. Il y eut alors une "offre de services" qui rencontra une accélération de la demande de prospective, avant même le choc pétrolier de 1973, déclenchée par la provocation intellectuelle du Club de Rome, le *Projet Indépendance* de Nixon, puis les controverses autour du nucléaire²². Dans ces modèles, la demande d'énergie finale est corrélée avec les revenus des ménages et la valeur ajoutée produite par les secteurs économiques. Le passage entre demande finale et besoins d'énergie primaire se fait alors en intégrant les pertes des réseaux de distribution et les pertes thermodynamiques²³.

Après le choc pétrolier de 1973, celui de 1979 accéléra la prise de conscience que l'incertitude d'un retour "à la normale" déstabilisait le couple prévision/optimisation. Prévoir la demande finale devint moins aisée, en raison de la fin d'une croissance régulière et d'une élasticité énergie-PIB ne ressemblant plus à un paramètre d'une "loi" quasi physique, mais se révélant soumise aux effets prix et aux politiques d'efficacité énergétique. Ceci conduisit à la construction de modèles non économétriques de prospective de la demande pour représenter les changements qui gouvernent la liaison énergie-PIB (Médée en France). L'optimisation de l'offre se trouva déstabilisée par les incertitudes sur la demande finale et les prix du pétrole, ainsi que par la révélation des liens entre énergie et macroéconomie, via l'impact des prix de l'énergie sur les coûts de production, le pouvoir d'achat et l'impératif de compétitivité imposé par la "facture pétrolière", impact qui amoindrissait l'efficacité des relances keynésiennes.

Les années quatre-vingt furent marquées par des essais d'introduction de l'énergie dans les modèles macroéconomiques de prévision à court ou moyen terme. Mais cet effort tourna court et une sorte de division du travail s'établit. La macroéconomie resta concentrée sur les débats entre modèles keynésiens et néo-classiques autour de la révolution des anticipations rationnelles et des marchés efficients (Fama, 1970 ; Lucas, 1972), débats qui mettaient en jeu la conception des politiques publiques, la compréhension des cycles économiques et des sources de la croissance. Le dialogue avec les spécialistes de l'énergie resta inachevé.

Le dialogue reprit lors de l'émergence de l'affaire climatique à la fin des années 1980. Le monde de l'énergie venait d'abandonner l'ambition prédictive pour reconnaître la nécessité d'une démarche prospective (cf. Conférence Mondiale de l'Énergie de 1989) et aucune

autre communauté scientifique n'était à ce point outillée pour traiter d'interactions à long terme entre changement technique, ressources, "contraintes carbone" et économie. Les exercices de prospective de l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*) intègrent pourtant la dimension Climat dès la fin des années soixante-dix. Des modèles de long terme étaient disponibles pour le transport, mais ils portaient sur des échelles "locales". Quant aux modèles de prospective du secteur agricole, ils visaient surtout à explorer la façon dont les besoins alimentaires pourraient être assurés par l'augmentation des surfaces cultivées et les gains de productivité à l'hectare (Paillard *et al.*, 2010). Malgré quelques plaidoyers en faveur d'un dialogue avec les modèles d'économie des transport et d'économie spatiale (Hourcade, 1993), le champ des scénarios économie-climat allait être colonisé par les modélisateurs de l'énergie, qui allaient progressivement s'emparer de dossiers nouveaux. En revanche, cette communauté, vue l'importance des questions d'impact des politiques climatiques sur la croissance et l'emploi, dut accélérer le dialogue entamé avec la modélisation macroéconomique à l'occasion des chocs pétroliers.

Le premier "point de contact" fut William Nordhaus aujourd'hui prix Nobel, seul économiste "mainstream" reconnu (auteur d'un manuel d'économie avec Samuelson) qui se soit intéressé dès la fin des années 1980 au dossier climat²⁴. Nordhaus entretint des relations suivies avec l'IIASA et la "communauté épistémique" des modèles énergétiques, alors que son modèle DICE, pionnier des IAM ne comporte pas de représentation explicite de l'énergie. C'est un modèle de "commande optimale" qui calcule la meilleure stratégie d'abattement des émissions sur le siècle, à travers un arbitrage coût/bénéfice mettant en regard les coûts de l'action exprimés, en termes de perte de PIB et ses bénéfices, ainsi que les dommages évités. DICE incorpore un "moteur" de croissance avec un seul bien composite, une fonction de coût d'abattement des émissions de carbone bornée par une "backstop technology" et une fonction de dommage, elle-même, très agrégée.

Le rôle de DICE fut donc surtout "paradigmatique" car il ne pouvait y avoir de réelles synergies entre lui et la communauté de la prospective énergétique. Celle-ci allait en retenir qu'il était légitime d'accrocher ses exercices à des modèles de croissance néo-classiques, qui avaient le mérite d'une macroéconomie de long terme qui ne les entraînerait pas dans un débat compliqué sur le "post-keynésianisme". Les climatologues, eux, virent dans DICE l'œuvre d'un économiste travaillant à l'horizon du siècle en utilisant des formes réduites de leurs propres modèles. Parmi les économistes, le succès de Nordhaus vint de la mise en accès libre d'un modèle de type "Ramsey" (1928) figurant en bonne place au chapitre "théorie de la croissance" des manuels d'économie. Ceci permit à beaucoup d'utiliser DICE, modulo quelques adaptations, dans leurs interventions en "économie du climat".

Le deuxième point de contact fut Dale Jorgenson (Jorgenson, 1993), un élève de Leontief formé aux matrices interindustrielles. Jorgenson ambitionnait de révolutionner la compréhension des sources de la croissance à long terme à partir de fonctions de production sectorielles KLEM (K = capital, L = travail, E = énergie, M = autres intrants), avec une extension à l'énergie de la fonction (K, L) du modèle de référence de Solow. Les travaux de Jorgenson furent mobilisés par les modèles d'équilibre général calculable (MEGC), qui mêlaient, de façon d'ailleurs discutable, une tradition de travaux à la Banque Mondiale (Chesnery, Robinson, Taylor, De Melo) aux progrès dans le calcul des prix d'équilibre via l'algorithme de Scarf²⁵. Grâce à l'explosion des capacités des micro-ordinateurs, les fonctions KLEM purent être utilisées dans des modèles multisectoriels calibrés sur des matrices interindustrielles. Pour animer les coefficients techniques sous-jacents aux matrices, il suffit de choisir une forme fonctionnelle au sein d'un "menu" en fait assez réduit (Cobb-Douglas,

Constant Elasticity of Substitution, Translog)²⁶. Les économistes sollicités pour répondre sous contrainte de temps aux demandes des administrations, des organismes internationaux et de la DG XVII des communautés européennes, purent le faire à moindre coût sans passer par un dialogue approfondi avec les ingénieurs et les “économistes spécialisés”.

Certes, ceci rencontra le scepticisme des spécialistes de l'énergie puisque les fonctions utilisées pouvaient, en cas de prix du carbone très élevé, simuler des flexibilités techniques inexistantes²⁷. Il en découla un débat récurrent entre modèles dits “*bottom-up*”, qui produisent une image d'ensemble détaillée des systèmes énergétiques au sens de “l'ingénieur” et modèles “*top-down*” traitant des substituabilités entre énergie et autres intrants “par prétérition”, à partir de flux en valeur ajoutée (Grubb *et al.*, 1993). Une génération de modèles multisectoriels d'équilibre général fut cependant lancée en abandonnant toute ambition économétrique, tant il était difficile de trouver des spécifications réalistes sur longue période. On se contenta de calibrer pragmatiquement les élasticités de substitution. Les modèles pionniers furent GREEN à l'OCDE (à l'origine du modèle EPPA du MIT) et le *Second Generation Model* (SGM) au Batelle Institute (Jae Edmonds). On notera que l'ancrage de ces modèles sur des sentiers de croissance en équilibre se fit sans dialogue avec les modèles de court terme. Le seul modèle intégré d'inspiration keynésienne fut E3ME (Terry Barker à Cambridge).

L'accélération du mouvement vers les IAM se fit lors du deuxième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 1996) quand fut décidé, au sein de l'équipe en charge des chapitres 8 et 9 sur les coûts des politiques climatiques vus par les modèles *bottom-up* et *top-down*, de créer un dixième chapitre non prévu au départ. Ce chapitre entérina l'émergence d'une communauté de modélisation intégrée, visant à représenter les interfaces entre systèmes économiques, systèmes techniques et système climatique, qui fonctionna sur le modèle de l'*Energy Modeling Forum* avec l'IIASA comme point focal en Europe.

1.2. Une taxonomie pour se repérer dans la jungle des IAM

Vingt-cinq ans plus tard, les IAM se sont multipliés : une trentaine étaient répertoriés dans le cinquième rapport du GIEC en 2014, compte non tenu des modèles très compacts type DICE. Ils diffèrent dans leurs représentations des interactions entre économie et systèmes techniques, différences héritées de traditions de modélisation, qui persistent malgré les efforts d'hybridation menés à partir des années 2000 (Hourcade *et al.*, 2006). Ces efforts ont complexifié le paysage et les typologies usuelles, reproduites en annexe, et ne permettent pas d'en rendre compte aisément. Le cube ci-après essaye de le faire en distribuant les modèles existants selon trois axes T, M, C :

- **T, le degré de précision technologique**, va de l'absence de représentation explicite de la technologie (plan (O,M,C), avec fonctions de production macroéconomiques, courbes de coûts d'abattement agrégées, à une représentation “process-based” des systèmes techniques et de leurs contraintes (e.g. technologies de production électriques, contraintes de courbe de charge et de réseau, etc.), en passant par un niveau intermédiaire explicitant simplement les technologies génériques structurantes (e.g. technologies électriques fossiles vs nucléaire vs ENR) ;
- **M, le niveau de complexité des rétroactions macroéconomiques**, avec dans le plan (T, O, C) la modélisation en équilibre partiel, qui ignore la rétroaction des systèmes techniques et énergétiques sur l'économie et la croissance. En se déplaçant sur cet axe M, on trouve des modèles de représentation agrégée de l'économie avec des rétroactions

systèmes techniques/croissance, puis des modèles multisectoriels représentant les interdépendances entre matrice interindustrielle, structure de demande finale, investissement, commerce international et croissance.

- **C, le degré de réalisme des comportements et des marchés** qui va, en partant du plan (T, M, 0) de la représentation d'un planificateur, qui optimise le système énergétique et la croissance en parfaite connaissance du futur, à la représentation de trajectoires économiques en déséquilibre, en passant par une description récursive dans laquelle les agents révisent leurs choix progressivement en fonction de nouvelles informations sur les prix relatifs et les coûts et performances des techniques. La progression dans le réalisme de la représentation des anticipations des acteurs va de pair avec la description de marchés imparfaits, de situations de chômage structurel ou de sous-investissement.

Cette schématisation permet de décrire les évolutions des paradigmes historiques vers des modèles hybrides. Il faut d'abord rappeler, ici, que le meilleur modèle n'est pas celui qui obtiendrait le maximum des notes sur chacun des axes (en violet en haut et à droite de la figure). Ce modèle serait comme une carte à échelle 1 qui, disait Joan Robinson, est très précise, mais ne sert à rien. La question est celle du degré de pertinence d'un modèle pour répondre à une question spécifique.

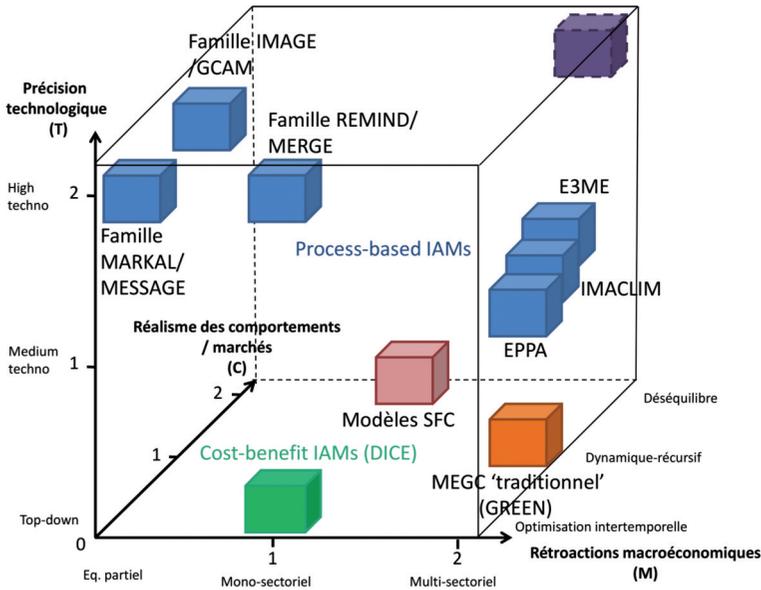
On situe les modèles historiques "bottom-up" du système énergétique et leurs dérivés actuels dans le **plan (T,0,C)**. Ces modèles ont en commun d'avoir une grande précision technologique ($T=2$) et d'être en équilibre partiel ($M=0$), donc de travailler à PIB donné et des variations de la demande venant des seules élasticités-prix. On peut localiser en (2,0,0) les modèles d'optimisation intertemporelle (Famille MARKAL-MESSAGE), qui minimisent le coût total des systèmes techniques sur longue période. En allant dans le sens du réalisme dans la description des comportements, on trouve en (2,0,1) les modèles "bottom-up" de simulation récursive (Famille IMAGE-GCAM). D'ambition descriptive, ils considèrent que les acteurs minimisent les coûts, mais en information imparfaite/myope et réajustent leurs choix au fur et à mesure du temps. Ils peuvent intégrer des imperfections sur les marchés de l'énergie, mais les sentiers de croissance sur lesquels ils sont "accrochés" sont exogènes, tirés de modèles macroéconomiques simples dessinant des trajectoires équilibrées.

Dans le **plan (0,M,C)**, on situe d'abord, en (0,1,0), les modèles très stylisés (DICE (Nordhaus) pour l'analyse coût-bénéfice ou Response (CIRED) pour l'analyse coût-efficacité) qui ont une fonction surtout heuristique pour guider la discussion "normative" sur le tempo des sentiers de réduction des émissions. Ils sont de peu d'intérêt pour la finance carbone étant donné leur très faible granularité.

En restant sur les modèles sans technologies explicites, mais en progressant en réalisme économique, on trouve en (0,2,1) les modèles macroéconomiques "top-down" initiaux dont l'archétype est le modèle d'équilibre général calculable (MEGC) traditionnel (e.g. GREEN de l'OCDE), qui intègre une représentation multisectorielle ($M=2$) et souvent dynamique récursive ($C=1$) de l'économie.

Depuis peu, on trouve en (0,1,2) les modèles stock-flux cohérents (SFC) (e.g. GEMMES de l'AFD) avec une modélisation macro compacte ($M=1$) et une représentation très agrégée des systèmes énergétiques ($T=0$), mais des comportements plus réalistes en raison de la dynamique des marchés financiers qui permet de simuler des déséquilibres.

Figure 1 : Taxonomie des modèles Énergie/Climat selon trois axes de caractéristiques



On trouve ensuite, en quittant les bords du cube, les efforts d'hybridation entrepris pour mieux saisir les rétroactions entre systèmes techniques et systèmes économiques. Une première approche en (2,1,0) consiste à coupler un modèle d'optimisation du système énergétique avec un modèle de croissance optimale (Famille REMIND-MERGE), qui représente une économie à un seul "bien composite" et un facteur énergie dont l'évolution est décrite par un module énergétique qui peut aller à des niveaux fins de granularité, mais dont la structure de coût n'a pas d'implication sur la production du bien unique. Cette pratique permet de capter les rétroactions énergie-croissance de long terme, mais pas les impacts sectoriels des politiques climatiques et repose, tant pour l'énergie que la macroéconomie, sur des hypothèses d'anticipation parfaite.

Une deuxième approche consiste à introduire des éléments de réalisme technologique dans les modèles macro multi-sectoriels. Elle permet plus de réalisme économique et comportemental que l'approche précédente, mais au prix d'une moindre granularité technologique (région $(T > 1, M = 2, C > 1)$). Par exemple, les modèles EPPA ou PACE explicitent les technologies via leurs structures de coût au sein de fonctions de production standards en y substituant pour les secteurs énergétiques (en particulier le secteur électrique) des intensités résultant de l'agrégation de paniers de technologies discrètes recomposés à partir de données d'ingénieur.

La solution adoptée par le modèle IMACLIM est celle d'un couplage systématique aux représentations *bottom-up*,²⁸ via des équilibres à la fois en valeur et en flux physiques, après mise en cohérence des bilans énergétiques et des données des comptabilités nationales, puis la représentation explicite de certains postes de demande en quantités physiques (voyageurs kilomètres, tonnes kilomètres, surfaces occupées, productions d'industries lourdes ou de denrées alimentaires (Le Treut, 2017)). Les choix sont guidés

par un arbitrage, en fonction de la question posée, entre rigueur théorique, qualité des données et contrôle des résultats. IMACLIM apparaît dans le cube en ($T > 1$, M2, $C > 1$) parce qu'il articule également une macroéconomie du long terme avec une macroéconomie du court et moyen terme, de type plutôt keynésien. Apparaît aussi, dans la même classe, le modèle E3ME avec modules techniques explicites et une macroéconomie multisectorielle de court terme pilotée par la demande, avec rigidité des prix. Ces deux modèles offrent une prise en compte des déséquilibres de court terme, avec une moindre sophistication du passage court terme-long terme que dans les modèles SFC type GEMMES, mais une meilleure description des mécanismes intersectoriels et de leurs sous-jacents technologiques.

Il est important pour ce qui suit de ne pas oublier que les différences techniques représentées dans cette taxonomie sont dues à des arbitrages fait par les modélisateurs, en fonction de préférences théoriques et méthodologiques (plus ou moins grande confiance dans la capacité d'équilibrage des marchés ou de représenter des marchés en déséquilibres, vision du changement technique comme un processus exogène ou lié à des processus endogènes d'apprentissage), mais aussi à la nature des questions auxquelles ils doivent répondre. Des modèles d'optimisation sectorielle ont une visée essentiellement normative, des modèles de sentier d'équilibre permettent de décrire des visions de long terme plausibles, mais contiennent moins d'information sur les conditions de déclenchement d'une transition à partir d'une économie en déséquilibre. Des modèles très agrégés sont très utiles comme outil heuristique, alors que des modèles multisectoriels sont nécessaires pour saisir les conséquences à court et moyen terme de décisions publiques.

1.3. Les IAM à un point de bifurcation

La trace des tribus initiales dans l'état de l'art des IAM résulte d'une dépendance au sentier bien compréhensible. Il y a d'un côté l'envie de poursuivre un questionnement autour de problématiques balisées et de perfectionner les outils, au risque de se laisser emporter par une dynamique d'approfondissement au prix d'une perte de pertinence. Il y a de l'autre une contrainte économique. Tout outil de modélisation un peu complexe et lourd en données représente du capital de compétences accumulées et d'astuces techniques, et réinvestir, sinon sur un paradigme nouveau, du moins sur des transformations de structure majeures, représente un pari risqué.

Ces prises de risque ont été ralenties par la façon dont s'exprime la "demande sociale" via des contrats d'expertise ou de recherche. Pour répondre dans un délai limité à des questions marquées par les cycles médiatiques et politiques, il est toujours plus efficace de mobiliser des modèles énergétiques accrochés à des scénarios de croissance à profil "régulier". Cette tendance a été renforcée lorsque la demande exprimée par les gouvernements, les organisations internationales, l'Union Européenne et les ONG les plus influentes a prescrit les 2 °C (puis les 1,5 °C) comme **contrainte normative sur le siècle à respecter dans tous les exercices. Ceci a eu plusieurs conséquences sur l'évolution des modèles.**

- **La différence entre modèles d'optimisation et modèles de simulation tend à s'estomper.** En "forçant" un objectif de température, les résultats ne peuvent être très différents entre un planificateur bienveillant qui affiche un objectif que les agents internalisent spontanément en anticipations parfaites par discipline ou conviction, ou un autre qui réajuste en permanence les "signaux" auxquels des agents "plus myopes"

répondent pour leur faire atteindre l'objectif fixé. C'est pourquoi le résumé pour décideurs du quatrième rapport du GIEC (2007) signalait : *“Most models use a global least cost approach to mitigation portfolios and with universal emissions trading, assuming transparent markets, no transaction cost, and thus perfect implementation of mitigation measures throughout the 21st century.”*, ce à quoi on pourrait ajouter *“with benevolence for international transfers to equalize the marginal welfare losses”*.

- **On s'intéresse moins à l'évaluation des dommages dans les modèles**, puisqu'on n'a plus à s'interroger sur une analyse coût-bénéfice de l'action à l'échelle globale. Il y a, certes, des travaux sur les dommages à l'échelle d'une région ou d'un dossier particulier (déplacement des cultures, montée des mers, approvisionnement en eau) pour alerter sur les besoins d'adaptation, mais peu d'efforts sont faits pour situer les travaux dans un cadre où les interdépendances écologiques, économiques et sociales sont représentées en cohérence. Les contraintes, qui peuvent exister à l'échelle locale (eau pour le refroidissement des centrales, tensions sur la biomasse, “hot spots”), ne paraissent pas décisives à l'échelle globale pour des scénarios 1,5 °C et 2 °C, alors que ce ne serait pas le cas avec des scénarios à 4 °C. Les modèles sont donc davantage attendus sur les réponses technologiques et leur caractère intégré s'arrête aux liens allant des émissions, au cycle du carbone et aux hausses des températures.
- **On porte moins d'attention au court terme** puisque la “demande sociale” porte sur la fin du siècle et les points de passage à 2050 en **admettant implicitement que l'enclenchement ne pose pas de problème majeur**. Un bon indicateur de cet état de fait est, dans le 5^e rapport du GIEC, la faiblesse du nombre de colonnes consacrées aux questions du court terme comme les impacts sur l'emploi ou le commerce extérieur (3) et l'ampleur du chapitre sur les scénarios de long terme (68), alors que dans les précédents rapports du GIEC, le court/moyen terme tenait une place prépondérante. Ceci a pour conséquence de ralentir les essais d'encadrement des IAM par une macroéconomie plus riche pour décrire les impacts sur la croissance à court terme, les choix d'investissement en univers incertain et les questions de financement dans un contexte de forte pression sur les budgets publics.
- **Les progrès méthodologiques sont surtout faits sur le piégeage du carbone** comme vraie variable d'ajustement assurant l'objectif de neutralité carbone. Ils ont permis une amélioration de la prise en compte des options à émissions négatives et de la biomasse dans le cycle du carbone.

Les IAM sont, aujourd'hui, à un tournant en partie parce que, les scénarios récents ayant “fait comme si” le problème de l'enclenchement était résolu, ils ont été interprétés, non comme des exercices heuristiques, mais comme scénarios faisables. Or, devant un hiatus croissant entre les objectifs volontaristes affichés de baisse des émissions et la réalité de l'action, on voit émerger des questions légitimes, qui ont été “sous-travaillées” depuis quelques années (financement, décisions d'investissement au-delà du secteur énergétique, inégalités, interactions entre énergie, dynamiques urbaines, occupation des sols et dynamiques industrielles, etc.). Ce diagnostic a d'ailleurs conduit le 6^e rapport du GIEC à prévoir un nouveau chapitre dédié à la phase d'enclenchement de la transition.

II. Des limites de l'état de l'art des IAM aux erreurs de cadrage

Devant le hiatus entre ce que fournissent les modèles intégrés et les attentes des milieux économiques, la tentation est grande de se passer d'eux pour retenir les travaux d'institutions internationales bien établies comme l'Agence internationale de l'énergie, des approches plus simples d'accès comme les études de McKinsey, ou encore pour utiliser les IAM à la marge de modèles économiques plus familiers comme l'a fait la Banque de France dans son récent exercice de *stress tests* (voir section 3.2. ci-après). Un des risques est alors de négliger les leçons de décennies d'expériences et de mobiliser des savoirs parcellaires (ingénieurs, écologues, économistes) sans veiller à les mettre en cohérence. Il peut en résulter des erreurs de cadrage que nous décrivons succinctement ci-après.

2.1. Quiproquos sur les IAM, malentendus sur la notion de dommage

Les quiproquos sur la capacité des IAM à intégrer les dommages sont dus à des malentendus sur la notion même de dommage climatique et, en partie, à l'effet notoriété de Nordhaus. Son modèle DICE laisse entendre qu'on peut monétariser des dommages, qu'il représente de façon très stylisée, sans décrire les enchaînements allant du réchauffement aux impacts physiques et aux dommages économiques et sociaux. C'est pourquoi ses résultats n'ont été retenus dans aucun des résumés pour décideurs ou rapports techniques du GIEC. Il en est de même pour le modèle FUND de Richard Tol, qui donne des évaluations monétaires des dommages climatiques pour conclure qu'ils sont très faibles sur le siècle. En revanche, alors même qu'il ne jouait pas de rôle dans les rapports du GIEC, Nordhaus cristallisa des attaques convergentes sur les IAM de la part de courants critiques de l'approche néo-classique ou de personnalités comme Pyndick (2013), qui les décrit comme *"close to useless as tools for policy analysis [...] they create a perception of knowledge and precision that is illusory, and can fool policy-makers into thinking that the forecasts the models generate have some kind of scientific legitimacy"*.

Or, les IAM à fort contenu empirique, très tôt mobilisés dans des approches coût-efficacité pour étudier les conséquences de politiques visant un objectif climatique déterminé et exprimé en niveaux de concentration (parties par million, ppm), d'augmentation des températures moyennes (2 °C, 1,5 °C) ou d'émissions nettes dans le temps (neutralité carbone en 2050), se sont bien gardés de traduire les dommages en termes monétaires. La raison en est que, plus on descend en échelle spatiale, plus les fourchettes d'incertitude sont grandes, notamment pour la pluviométrie, alors que ce sont les climats locaux qui sont pertinents pour l'analyse d'impacts. Une deuxième raison est qu'il n'y pas de lien simple entre impacts physiques et impacts économiques. Katrina n'aurait pas été une catastrophe si le gouverneur de la Louisiane n'avait pas décalé dans le temps les travaux prévus de maintenance et de renforcement des digues et canalisations. L'ampleur des dommages peut différer en ordre de grandeur entre une société à forte capacité de réaction aux alertes et d'adaptation et une société fragile économiquement et politiquement.

C'est ce qui explique que le Groupe II du GIEC s'est bien gardé, jusqu'ici, de donner une évaluation monétaire des dommages et que la communauté internationale s'est engagée

sur des objectifs en température comme mesure de précaution (Ambrosi et al., 2003). Il convient de le rappeler, vu la généralisation dans les milieux financiers, suite à l'influent discours de Mark Carney sur la "tragedy of the horizons", du concept de "risques physiques" comme englobant les dommages alors que tout dommage ne se traduit pas en risque financier. Si une vallée est de plus en plus affectée par des orages récurrents ou des maisons de front de mer sont menacées par la montée des eaux, les deux phénomènes sont suffisamment lents pour que les assureurs s'en désengagent. Or, les "guidelines" de la TCFD ou du rapport Litterman (CTFC, 2020) défendent l'idée de mesurer les risques physiques comme s'il était possible d'en tirer directement une idée de risques financiers liés au changement climatique.

En fait, l'utilité première des IAM est de cerner les risques de transition (risques des investissements bas carbone, "stranded assets") plus proches et tangibles que ceux venant des dommages climatiques pour les acteurs économiques, et de détecter, modulo quelques indicateurs, les degrés d'exposition des actifs aux risques physiques. On peut alors passer à une analyse des risques capable de nourrir l'analyse financière en n'oubliant pas, comme facteur de risque, les incertitudes inhérentes à la réponse des politiques face aux réactions de l'opinion publique à tel ou tel événement climatique. C'est d'ailleurs par le biais des cycles politico-médiatiques que les dommages climatiques risquent d'avoir le plus d'impact financier à court terme.

2.2. Les risques de l'énergie-centrisme

Vu leur genèse, les IAM sont riches en information sur le secteur de l'énergie avec un assez grand niveau de désagrégation, surtout pour l'offre électrique, les contributions de chaque option technique et leurs besoins d'investissement. Côté demande, la représentation de l'efficacité énergétique dépend du niveau de désagrégation des secteurs utilisateurs.

En revanche, les IAM sont pour la plupart très limités dans leur représentation des secteurs non énergétiques. Or, les seuls secteurs transports et habitat, si décisifs pour la transition bas-carbone, représentent trois fois les investissements dans le secteur énergétique, et, à la somme des investissements sur ces trois secteurs il faudrait rajouter 20 % de financements pour changer les procédés industriels²⁹. Ce fait est méconnu parce que les tableaux présentés dans les rapports comportent très souvent des colonnes "transport", "habitat" ou "industrie", alors que les chiffres affichés ne portent que sur les investissements en efficacité énergétique. Les modèles multisectoriels hybrides captent les impacts des interdépendances sectorielles sur la formation des prix, la compétitivité et le niveau de production, ce qui est déjà important, mais pas les dynamiques économiques spécifiques de ces secteurs, ce qui peut conduire à des erreurs de diagnostic³⁰.

Ainsi, les transports sont soumis aux dynamiques de mobilité et d'occupation du territoire, elles-mêmes déterminées par les prix du foncier et de l'immobilier et par des choix publics d'infrastructures urbaines et d'aménagement du territoire, au moins autant que par les prix des carburants (Lampin et al., 2013). L'agriculture et l'agroforesterie, cruciales pour la compétition des usages du sol entre production alimentaire, bioénergies et séquestration du carbone, sont sensibles aux prix du foncier et aux règles de propriété et de transmission des héritages plus qu'au prix des intrants énergétiques. C'est pourquoi les volumes de bioénergie mobilisés pour produire des scénarios 1,5 °C sont souvent jugés irréalistes par les spécialistes de l'économie agricole et forestière. En sus, certains secteurs industriels non liés à la production de l'énergie primaire constituent un "point aveugle", où se joue la

transformation des chaînes de valeur sous contrainte carbone (changements de procédés dans le ciment ou la sidérurgie, rôle de l'impression 3D, de l'intelligence artificielle). Ceci ne signifie pas qu'il y ait absence de données sur ces secteurs, mais elles restent disparates et rarement consolidées.

2.3. Représentation des choix techniques, le défi de l'incertitude

Les IAM ont le mérite, par rapport aux évaluations faisant du potentiel d'abattement d'une technique une caractéristique intrinsèque de cette technique, d'étudier ses coûts et performances en fonction de son insertion dans des systèmes technico-économiques cohérents. Une efficacité énergétique accrue ou une pénétration plus forte de véhicules électriques n'éviteront pas le même niveau d'émissions, selon le contenu carbone du mix énergétique amont et n'auront pas le même coût selon le système de prix prévalant.

Le problème d'interprétation des résultats des IAM vient de ce qu'ils projettent les "parts de marché" des techniques en retenant, comme coût de chaque option, la somme actualisée des paiements annuels qui couvrent leur coût opérationnel, le remboursement de la dette (principal et intérêts) et l'autofinancement pour renouveler les équipements. Cela revient à représenter une situation, où les techniques sont comme des fruits sur l'égal d'un marché, avec leur coût annuel moyen sur l'ensemble de leur durée de vie affiché sur l'étiquette. En cas de pénurie de pommes, le prix des pommes augmente et les clients se reportent sur les poires. Si le coût actualisé d'une technique sans carbone est supérieur de 10 € à celui d'une technique émettrice, elle sera adoptée si une taxe carbone augmente le prix de la technique émettrice de 11 €. C'est un formalisme très simple mais, dans la réalité, les techniques ne sont pas sur un égal. Elles s'insèrent dans des projets dont les porteurs sont sensibles aux risques liés à la mise de fonds dans les phases de préparation des projets et de construction des équipements, dans un contexte incertain sur les coûts et performances des techniques. Or, les options bas-carbone sont souvent plus intensives en capital et tout dérapage des coûts et du temps de réalisation des équipements expose à plus de risque de perte de crédibilité aux yeux des actionnaires ou des banques en cas de demande de prêts supplémentaires.

Les informations données par les modèles intégrés sont donc irremplaçables, mais elles viennent de scénarios sans incertitude et il faut effectuer tout un travail d'interprétation pour qu'elles puissent fournir un éclairage pertinent des décisions de court-terme.

2.4. Problèmes de cadrage macroéconomique, les tensions court terme/long terme

Il faut d'abord dénoncer l'idée que les IAM ne peuvent représenter des pertes de croissance en cas de baisse drastique des émissions. C'est un faux procès, y compris dans le paradigme néoclassique stricto-sensu, comme le montre le modèle très simple de Hogan et Manne (Encadré 1). Il n'y a donc pas d'obstacle de principe à la description de scénarios de décroissance. Il est vrai en revanche que, vu qu'il sera politiquement impossible d'enclencher une transition si elle se traduit par une baisse de la croissance et une augmentation de la pauvreté³¹, un effort important a été consacré aux moyens de produire un "double dividende" environnemental (moins d'émissions) et économique (plus d'activité).

Encadré 1 : Interactions énergie-économie : le modèle d'Hogan et Manne (1977)

Les premiers modèles appliqués étendant la fonction de production de Solow à l'intrant "énergie" sont ceux de Hudson et Jorgenson (1974) et Berndt et Wood (1975). Hogan et Manne, dès 1977, établissent que cette extension conduit à postuler que les coûts de maîtrise des consommations d'énergie sont dictés par la part de l'énergie dans les coûts de production. Ils schématisent la production totale Y comme une fonction à élasticité de substitution constante (CES) combinant l'énergie E à un agrégat de l'ensemble des autres intrants R :

$$Y = (aR^\rho + bE^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (1)$$

Avec ρ un paramètre exogène lié à l'élasticité de substitution σ , et a et b des paramètres calibrés sur données des Tableau Entrées-Sorties de la comptabilité nationale (TES). Le calibrage de a et b repose sur l'interprétation des données de TES comme résultant soit de la minimisation des coûts d'un volume de production donné, sous contrainte de prix des intrants p_R et p_E , soit de la maximisation de la production pour un coût total donné. Les conditions de premier ordre, de l'un comme l'autre programme d'optimisation, permettent d'écrire b en fonction des valeurs de calibrage :

$$b = \left(\frac{Y}{E}\right)^\rho \frac{p_E E}{p_R R + p_E E} \quad (2)$$

L'équation (1) donne la dérivée partielle de Y en fonction de E :

$$\frac{\partial Y}{\partial E} = b \left(\frac{Y}{E}\right)^{1-\rho} \quad (3)$$

En injectant (2) dans (3) et en réarrangeant, on obtient

$$\frac{\partial Y}{\partial E} \frac{E}{Y} = \frac{p_E E}{p_R R + p_E E}, \quad (4)$$

Ce qui veut dire que l'élasticité de Y par rapport à E , c'est-à-dire le coût marginal d'une baisse de l'énergie consommée, est égal à la part de E dans les coûts de production.

Certes, les quelques points de pourcentage que représente cette part inspirent à Hogan et Manne la métaphore du "ragoût de lapin et d'éléphant" : les dépenses d'énergie sont trop faibles pour modifier le parfum du ragoût, c'est-à-dire pour que l'énergie pèse significativement sur la croissance économique. Mais ce n'est plus vrai en cas de choc important, non "marginal". Dans le cadre d'analyse des IAM à fonctions de production macroéconomiques, l'activité économique est donc nécessairement réduite par toute politique de maîtrise des demandes d'énergie.

Il faut ici distinguer le long et le court-moyen terme. Sur le long terme, alléger la contrainte que l'objectif des 2 °C fait peser sur l'économie passe par de l'innovation et des changements structurels (modes de consommation, gains de productivité dans les divers secteurs d'activités). Ceux-ci ne sont pas indépendants de paramètres comme la volatilité des prix

des énergies fossiles, qui ralentit les effets d'apprentissage, les effets d'éviction ou d'entraînement des investissements bas carbone sur la productivité générale et l'impact des prix des énergies sur la consommation. Mais ces effets se déploient de façon lente et sont de second ordre pour les décideurs financiers.

Sur le court terme, en revanche, les paramètres macro-économiques peuvent avoir un effet de premier ordre. Alors qu'il ne peut y avoir que des pertes de PIB si les facteurs de production sont employés de façon optimale (en consacrer une partie à la baisse des émissions se fait au détriment d'autres activités), tel n'est pas le cas si l'économie est en situation sous-optimale et si les politiques climatiques permettent de réduire des distorsions qui la briment. Ainsi, en intégrant les imperfections du marché du travail et les distorsions du système fiscal, on montre comment un double-dividende emploi peut découler du recyclage du produit d'une taxe carbone en baisse de fiscalités distorsives. Il en est de même pour la "relance économique". De plus, depuis la crise des *subprimes* et plus encore dans la période post-COVID-19, la discussion économique s'interroge sur le rôle de l'écart entre "propension à épargner" et "propension à investir" (Summers, 2015) dans l'instabilité des cycles financiers (Borio, 2018), le déficit d'investissement (IMF, 2014) et la fragilité de la croissance. La plupart des IAM ne représentent pas de déséquilibre économique, ce qui affaiblit leur capacité à analyser les formes que doit prendre l'enclenchement de la transition pour résorber et non aggraver les "lignes de faille" (R. Rajan) de l'économie moderne.

Le dialogue inachevé de la communauté des IAM avec les modèles macroéconomiques de court terme doit reprendre. Si on impose une contrainte carbone à une économie en déséquilibre marquée par des inerties techniques et institutionnelles (Waisman, 2012), on obtient des pertes de PIB plus fortes que dans les modèles avec ajustement instantané des prix, du poids des facteurs dans l'appareil productif et de la consommation qui ramènent l'économie à l'équilibre. En revanche, si on combine des réformes fiscales fondées sur une taxe carbone à une réorientation de l'épargne vers les infrastructures bas-carbone par la réduction du coefficient-risque des investissements qui leur sont consacrés, on peut obtenir des effets de relance économique.

Les politiques climatiques peuvent donc avoir un impact dépressif sur l'économie ou constituer un levier de relance, selon les politiques économiques dans lesquelles elles sont insérées et la ***simplicité des résultats de modèles sans bouclage macroéconomique est donc trompeuse***. Aux incertitudes sur le niveau général d'activité (qui impacte davantage les options nouvelles dans un espace technologique occupé par des technologies matures) se rajoute le jeu des contraintes de financement et celui des prix relatifs des énergies. Ceux-ci dépendent de la façon dont les pays producteurs d'hydrocarbures (OPEP, Russie) seront en capacité d'adapter leurs stratégies pour maximiser leur rente à long terme sous condition d'équilibres budgétaires immédiats et de considérations géopolitiques.

Les modèles multisectoriels hybrides mondiaux intègrent certaines de ces rétroactions à divers degrés de sophistication, mais il faut les utiliser "en variantes" pour vérifier la sensibilité de leurs "prédictions" sur les options techniques aux interdépendances de toutes natures.

III. Du bon usage des scénarios des IAM pour le secteur financier

L'alerte de Mark Carney sur la "*Tragedy of the Horizons*" a marqué la prise de conscience de l'importance des risques climatiques pour la stabilité du système financier, des enjeux de financement de la transition écologique et de la pression pour "désinvestir" des activités intensives en émissions. Après le lancement en 2016 de la *Taskforce on Climate Finance Disclosure*, par le groupe finance du G20 dans le cadre du Conseil de Stabilité Financière (FSB), le *One Planet Summit* de 2017 a créé le *Network for Greening the Financial System* (NGFS), réseau de banques centrales et d'institutions de réglementation financière. Les États-Unis ne sont pas absents de cette dynamique avec le rapport de Bob Litterman pour la *Commodity Futures Trading Commission* (CFTC, 2020). L'enjeu est de savoir comment exploiter au mieux les IAM actuels dans un tel contexte compte tenu des limites que nous venons de voir.

3.1. Quels besoins d'information pour quels usages ? Évaluation des impacts, alignement des portefeuilles et stress-tests

Le secteur financier a besoin de répondre à trois problèmes : l'évaluation de l'impact environnemental des portefeuilles, leur alignement sur l'Accord de Paris et l'évaluation des risques que l'urgence climatique fait peser sur leur rendement.

La mesure statique de l'impact environnemental des entreprises est faite à partir de l'empreinte carbone, la part verte (ou la part brune), ou encore d'indicateurs de performance environnementale plus spécifiques, tels que la consommation d'eau ou de ressources naturelles. Pour des décisions financières qui cherchent à limiter les risques, cet indicateur ne suffit pas puisqu'il pousse à exclure les entreprises très émettrices de CO₂ dans le passé, mais dont les activités sont nécessaires à la transition, et que l'enjeu est de pénaliser celles qui sont sur une mauvaise trajectoire et de favoriser celles qui font l'effort de la modifier.

L'évaluation de l'alignement d'un portefeuille sur l'accord de Paris revient à mesurer la compatibilité du portefeuille avec une trajectoire globale d'émissions qui mène à "bien moins que 2 °C". Elle suppose de définir des indicateurs d'évaluation de l'écart entre la performance climatique des portefeuilles et celle d'un scénario compatible avec par exemple un objectif de neutralité carbone à une date donnée.

L'évaluation du risque financier climatique des institutions financières se décompose en risque de transition et risque physique. Le **risque de transition** fait référence à l'impact de la transition bas carbone sur une activité économique ou la valeur d'un actif. Le **risque physique** fait référence aux impacts directs de l'environnement naturel, du climat et du changement climatique, sur les actifs physiques et les chaînes d'approvisionnement nécessaires à leur bon fonctionnement.

Devant la difficulté d'accès aux IAM, la plupart des acteurs financiers ont fait des choix pragmatiques. Les analyses d'alignement de portefeuille (ILB, 2020, étude réalisée en collaboration avec I4CE) s'appuient souvent sur des scénarios tirés des *Energy Transition Pathways* (ETP) ou du *World Energy Outlook* (WEO) de l'Agence internationale de l'énergie,

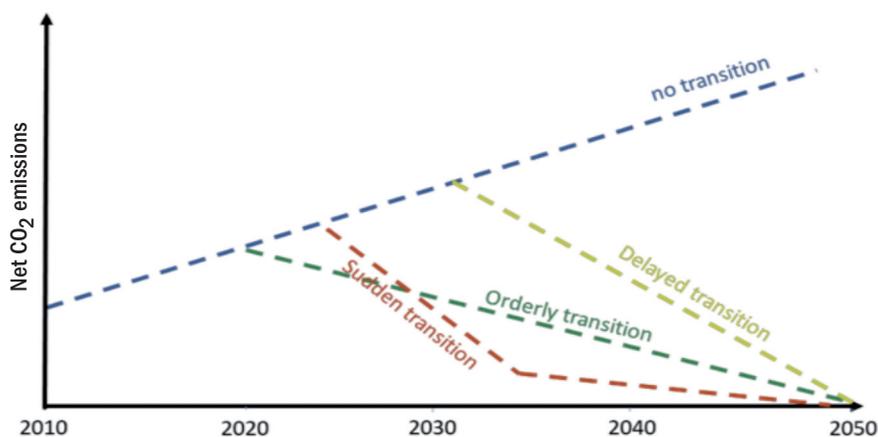
qui présentent un bon niveau de couverture sectorielle et géographique. Ces scénarios sont produits à l'aide d'une variante du modèle TIMES, qui révèle, à PIB constant, une trajectoire optimale de "mix énergétique" sous contrainte carbone. La plupart des évaluations du risque de transition sont basées sur des *stress tests*, conduits à partir de variables telles que le prix du CO₂ soit prescrit de façon arbitraire comme le font Vermeulen *et al.* (2019) avec un scénario d'augmentation de 100 dollars du prix du CO₂, ou tiré de modèles intégrés comme dans le cas des scénarios NGFS³².

Pour mieux comprendre la nature du dialogue à établir avec les IAM, nous analysons ci-dessous l'exercice de *stress tests* lancé durant le deuxième semestre 2020 par la Banque de France et l'ACPR (Autorité de contrôle prudentiel et de résolution).

3.2. Leçons de l'architecture de modélisation ACPR / Banque de France

Inédit, cet exercice vise à mesurer les risques climatiques auxquels sont exposés les établissements financiers français (banques et assurances) à horizon 2050, et à identifier les difficultés méthodologiques de l'exercice. La participation à cet exercice étant volontaire, il n'aura aucune implication sur le capital réglementaire. Il est fondé sur trois scénarios du NGFS (Figure 2) : un scénario de base de "transition ordonnée", une "transition désordonnée" et une "transition retardée".

Figure 2 : Emissions de CO₂ dans les scénarios de l'exercice de *stress tests* ACPR



Source : Allen *et al.* (2020)

3.2.1. Une architecture qui mobilise plusieurs outils de modélisation

- En amont, deux IAM à l'origine des scénarios retenus par le NGFS fournissent les trajectoires de PIB et de prix du carbone pour synthétiser le "choc" des politiques climatiques.

- En son cœur, le modèle NiGEM projette une douzaine de variables (PIB, taux d'inflation, chômage etc.) pour plusieurs dizaines d'économies individuelles et régions ; et un modèle multisectoriel statique décrit, désagrégées en 55 secteurs d'activité, les économies de la France, de la somme du reste de l'UE et du Royaume-Uni, des États-Unis et du "Reste du monde".
- En aval, un bloc financier regroupe le modèle de notation de la Banque de France (probabilités de défaut à des échelles plus fines que 55 secteurs), un modèle d'estimation des conséquences des prix du carbone sur les valeurs de marché, et un modèle d'écarts de taux d'intérêt.

Nous ne discuterons pas ici le bloc financier et nous nous concentrerons sur la façon dont la combinaison des modèles économiques et des IAM fournit des informations.

NiGEM est un modèle macro-économétrique néo-keynésien avec possibilité de sous-emploi. Il se situe en (M2, C3, 0) dans le "cube" présenté précédemment : très agrégé, des acteurs avec anticipations imparfaites et ajustement permanent tendant au plein emploi à long terme. Le PIB résulte de combinaison de travail, capital et énergie. La dotation en travail et les gains de productivité, exogènes, sont ajustés, dans deux des trois scénarios, pour reproduire la projection de PIB des scénarios NGFS. La dotation en capital résulte de l'accumulation de l'investissement et tout investissement induit un effet de relance de l'économie. Le facteur "énergie" regroupe les trois énergies fossiles et un agrégat "énergie renouvelable" (Allen *et al.*, 2020). La documentation du modèle ne donne pas d'information sur la façon dont, au sein de cet agrégat, sont gérées les substitutions entre les énergies fossiles, puis entre ces énergies et les énergies renouvelables ou le nucléaire.

L'arbitrage entre les facteurs dans la fonction de production se fait d'abord entre le capital et le travail selon une fonction CES, puis entre l'agrégat capital-travail (la valeur ajoutée) et l'énergie selon une fonction Cobb-Douglas. Cette fonction a une élasticité de substitution égale à 1 qui implique que les dépenses d'énergie ont un ratio constant au PIB. À PIB constant, 20 % de hausse de prix de l'énergie conduit à 20 % de baisse de la consommation d'énergie. Cette hypothèse, commode pour les calculs "de coin de table", est rejetée par la littérature, qui conclut plutôt à des élasticités de substitution inférieures à 1. Le prix du capital (taux d'intérêt) s'adapte en fonction de l'inflation et de l'écart entre production réelle et production "notionnelle". De même, les salaires évoluent en fonction du taux de chômage et des indices de prix, mais sans apurement instantané de l'offre de travail par baisse des salaires, d'où un "chômage d'équilibre".

Le modèle multisectoriel repose sur une matrice entrées-sorties globale, qui représente les productions et les échanges bilatéraux de 55 secteurs (dont deux énergies transformées, voir Encadré 2) dans 4 ensembles économiques comme résultant de la combinaison de travail domestique et de biens et services produits importés. Le capital n'est pas représenté (les profits sont simplement une part de la valeur ajoutée). Des fonctions CES règlent les arbitrages entre biens énergétiques (avec les mêmes taux de substitution qu'ils soient domestiques ou importés), entre intrants non-énergétiques (égalité de traitement entre biens domestiques et importés), et enfin entre valeur ajoutée domestique, agrégat d'intrants énergétiques et agrégat d'intrants non-énergétiques.

Encadré 2 : Comptabilité nationale, comptabilité énergétique et hybridation des données

La désagrégation sectorielle proposée par la base de données WIOD, qui alimente le modèle multisectoriel de l'exercice Banque de France/ACPR, repose sur des nomenclatures internationales de comptabilité nationale mal adaptées aux travaux de prospective énergétique : l'extraction de pétrole, de gaz et de charbon est agrégée à l'ensemble des autres activités minières ; la transformation du pétrole et la cokéfaction sont agrégées en un unique secteur ; la production et la distribution d'électricité et la distribution de gaz sont aussi agrégées en un unique secteur, qui inclut en outre la distribution d'eau. Les consommations et le commerce international d'énergie sont donc modélisés par le biais de ces trois "produits" agrégeant des activités très hétérogènes.

Pour ces raisons, la prospective multisectorielle énergie/économie travaille sur des bases de données "hybrides", avec une désagrégation plus fine des comptes nationaux et une mise en cohérence avec les données de dépenses (flux monétaires) et de consommations (flux physiques) d'énergie. L'une des bases les plus utilisées est la base GTAP³³ qui distingue 6 biens énergétiques : extractions de pétrole, gaz et charbon, raffinage et cokéfaction, production et distribution d'électricité, distribution de gaz naturel. Des exercices nationaux présentent des granularités plus fines étendues aux biens intensifs en énergie tels le ciment et l'acier (Le Treut et Gherzi, 2018). Sans hybridation des bases de données, on court le risque de scénarios irréalistes du point de vue de l'ingénieur (voir Encadré 3).

La consommation finale est modélisée par un vecteur spécifique à chacun des ensembles économiques et qui agrège la consommation des ménages et des administrations, les immobilisations et le solde commercial net. L'équilibre budgétaire suppose l'égalité des consommations agrégées et des valeurs ajoutées pour chacun des ensembles économiques. La ventilation des consommations finales agrégées entre les productions des quatre origines régionales se fait via des élasticités de substitution constantes sans distinction par origine des produits. Ce modèle est résolu identiquement à chaque date de projection, les seules modifications apportées étant le niveau de la taxe carbone et la productivité totale des facteurs. Les marchés du travail de chaque ensemble économique s'équilibrent par libre ajustement des salaires, ce qui est différent de l'option retenue pour NiGEM.

Les deux IAM mobilisés en amont du dispositif pour fournir à NiGEM et au modèle multisectoriel le prix du carbone et le PIB sont de factures très différentes. GCAM, du *Pacific Northwest National Laboratory* (États-Unis), est un modèle de simulation avec anticipations imparfaites et en équilibre partiel, i.e. hypothèses exogènes de PIB et sans rétroaction des contraintes carbone sur le PIB. REMIND, du *Potsdam Institut für Klimaforschung* (Allemagne), est un modèle d'équilibre général dont les PIB, bien que fortement déterminés par des hypothèses exogènes de gains de productivité, sont calculés de façon endogène par optimisation intertemporelle avec anticipations parfaites.

3.2.2. Questions de cohérence entre NiGEM - modèle multisectoriel – IAM

La cohérence entre les modèles mobilisés se joue à trois niveaux : les variables macro, les prix du carbone et la réaction des économies à ce prix.

Au premier niveau, la cohérence ne se fait que sur le PIB agrégé. NiGEM et le modèle multisectoriel ajustent leurs gains de productivité pour reproduire les trajectoires de PIB des IAM sous-jacents aux scénarios NGFS, trajectoires elles-mêmes ancrées sur les scénarios SSP (*shared socio-economic pathways*) du GIEC. C'est un niveau de cohérence assez faible puisque ***bien d'autres variables économiques sont mises en mouvement par un prix du carbone et il conviendrait de les harmoniser.*** Or les modèles ne parlent pas du même monde. NiGEM est un modèle keynésien avec chômage d'équilibre, le modèle multisectoriel est un modèle statique de plein emploi, REMIND est un modèle d'équilibre général d'optimisation intertemporelle et GCAM est un modèle avec PIB constant. ***Les quatre modèles diffèrent aussi dans leur représentation de l'énergie et de ses liens avec les autres secteurs.*** Enfin, le modèle statique ne considère aucune contrainte sur le commerce extérieur puisque les quatre ensembles économiques peuvent satisfaire leurs consommations finales en s'adressant indifféremment aux productions de toutes origines, domestique ou pas, également substituables³⁴.

Au deuxième niveau, les trajectoires de prix du carbone dépendent du modèle utilisé et l'exercice bute sur un problème de cohérence entre le "narratif" des scénarios et le modèle utilisé. Par exemple, le scénario "transition désordonnée" est confié au modèle REMIND qui mime l'action d'un planificateur mondial clairvoyant. Ce modèle tend à produire une trajectoire de prix plate au départ, qui croît de façon exponentielle pour atteindre des niveaux très élevés à l'horizon de projection. Nul besoin de prix élevés à court terme si, dès aujourd'hui, les investisseurs prennent en compte les prix de 2050 et au-delà. Un tel modèle sous-estime donc les chocs réellement subis en cas d'agents moins "clairvoyants". En outre, la manière dont les prix du carbone influent sur la ventilation de l'activité entre secteurs dans le modèle multisectoriel pose question. Ce modèle agrège les fiscalités pré-existantes en une "taxe sur la production" assise sur la valeur ajoutée, alors que les interactions de la fiscalité carbone avec celles sur le travail, les profits, les consommations de biens et services (TVA) sont décisives pour comprendre l'importance du mode de recyclage des produits d'un prix du carbone.

Au troisième niveau, la question est celle de l'hétérogénéité du traitement des arbitrages au sein de l'énergie et entre énergie et autres biens. Dans le modèle NiGEM et le modèle multisectoriel statique, les fonctions de substitution utilisées (CES, Cobb-Douglas) ne capitalisent pas les efforts des modèles "hybrides" pour rapprocher les représentations d'ingénieurs et d'économistes (Encadré 3). Le modèle multisectoriel statique propose une architecture d'arbitrages inhabituelle. Du côté de la production, seuls deux intrants énergétiques sont distingués (électricité et gaz d'une part, produits pétroliers d'autre part), et ne recouvrent que les consommations d'énergie finale, tandis que les énergies fossiles primaires demeurent agrégées aux industries extractives. De plus, les intrants domestiques, mis sur le même plan que les intrants importés, se substituent aux autres facteurs avec la même élasticité. Les limites d'un tel cadre sont flagrantes. On ne peut espérer que les arbitrages à élasticités constantes et sans intégration du capital fixe au sein d'un secteur agrégé électricité/gaz reflètent bien les enjeux pour le mix électrique dans un scénario de forte décarbonation, où on s'intéresse particulièrement au gaz. De même, l'arbitrage traite de la même façon l'ensemble des consommations, y compris les deux énergies transformées, quel que soit leur lieu de production.

3.3. Implications : une cartographie biaisée des risques

Les efforts des IAM pour intégrer des données hétérogènes dans un cadre cohérent ont été largement contournés par l'exercice Banque de France/ACPR (Encadré 3). La question est alors de savoir si les limitations que nous avons notées entraînent des imprécisions finalement de peu d'importance ou si elles peuvent conduire à des erreurs significatives de diagnostic.

Encadré 3 : Modélisation hybride énergie/économie

Dans des modèles réglant les substituabilités de facteurs par des fonctions de production agrégées (voir Encadré 1), tout changement des prix de l'énergie, à n'importe quel point dans le temps, déplace les combinaisons d'intrants le long d'une isoquante (production constante). Acceptables pour des évolutions marginales, ces spécifications sont inadaptées aux inflexions majeures de trajectoire requises par des objectifs climatiques ambitieux, en particulier à des horizons de court et moyen terme où les inerties des systèmes techniques sous-tendant l'offre et la demande d'énergie (entendus au sens le plus large, jusqu'aux formes urbaines) jouent à plein.

Cette critique, anticipée dès la fin des années 1990 (Böhringer, 1998), a pour première conséquence la nécessité d'opérer dans un cadre de changement technique induit, où on représente la "dépendance au sentier" avec des possibilités de substitution des facteurs de production ou de biens de consommations dans le budget des ménages (isoquantes de niveaux de production ou de bien-être). Une seconde conséquence est la nécessité d'intégrer dans un modèle économique les expertises d'ingénieurs concernant l'évolution des techniques d'offre d'énergie, et de conversion de cette énergie en services (chaleur, lumière, mouvement, information et communication). C'est ce qui a conduit à l'essor des modèles "hybrides" (Hourcade *et al.*, 2006).

On peut lister les points en faveur de la deuxième hypothèse : i) même élasticité de substitution entre l'agrégat "produits de la cokéfaction et des industries de raffinage" et l'agrégat "électricité/gaz de réseau", quelle que soit leur origine ; ii) difficulté de maîtriser les conséquences de la substitution du gaz au charbon, de la pénétration des ENR, du nucléaire de 4^e génération ou du développement des réseaux intelligents ; iii) absence de prise en compte du lien entre politiques publiques et propagation intersectorielle des hausses de coûts de production induites par la taxe ; iv) trajectoires de prix difficiles à relier à un scénario politique plausible et trop basses dans le cas de la trajectoire REMIND ; v) absence de contrôle du comportement des secteurs intensifs en énergie exposés à la compétition internationale.

Une dernière limite est plus structurelle. C'est **l'absence de prise en compte des effets d'entraînement d'investissements lourds sur l'activité de certains secteurs**, sinon de l'ensemble de l'économie (Encadré 4). Ainsi des investissements dans l'offre énergétique, les transports ou l'efficacité énergétique augmenteront pendant vingt ans la demande adressée aux matériaux de construction et aux métaux³⁵. Ces secteurs vont voir augmenter leurs marchés et leurs marges, alors qu'ils vont être évalués perdants du fait de leur forte intensité carbone, par l'exercice Banque de France/ACPR où seuls les prix relatifs déterminent l'allocation de la demande finale. L'erreur de diagnostic est importante puisqu'elle conduira à priver de financement des secteurs de base de la transition écologique.

Encadré 4 : Modélisation des investissements de transition et de leurs coûts en capital

La demande d'investissement induite par les transitions énergétiques émane des producteurs d'énergie (éoliennes, panneaux solaires, barrages, installations nucléaires, réseaux de transport et de distribution), des consommateurs d'énergie (procédés de production, machines-outils, véhicules, électroménager, chauffage), mais aussi du bâtiment et des infrastructures de transports. Le Tableau Entrées-Sorties (TES) qui organise les données de flux économiques représente cette demande du côté des coûts de production des secteurs (amortissements de capital dans la valeur ajoutée), et du côté de la demande des biens d'équipement, via un vecteur de Formation Brute de Capital Fixe (FBCF) agrégeant les ventes de l'ensemble des équipements à l'exception des petits équipements et véhicules particuliers, qui sont comptabilisés dans la consommation courante.

La représentation explicite de l'amortissement du capital est essentielle à une modélisation pertinente des possibilités de substitution entre capital et énergies fossiles dans la production (voir Encadré 3) et de leurs conséquences sur les coûts. Celle de la FBCF est essentielle à la prise en compte des effets d'entraînement qu'induit tout changement technique. Ces effets d'entraînement, sensibles aux effets de changement structurel (variation des poids des secteurs dans la demande finale), sont captés d'autant plus finement que le vecteur de FBCF est désagrégé en matrice capturant l'hétérogénéité des équipements des différents secteurs. Dans les modèles keynésiens, où la demande d'investissement spécifique à la transition ne limite pas le capital disponible aux activités de production (absence "d'effet d'éviction"), les effets de relance par l'investissement se combinent au changement structurel induit.

3.4. Scénarios, analyse des risques et stratégies d'alignement des portefeuilles

L'exercice ACPR/BdF montre qu'il n'y a donc pas, aujourd'hui, d'outil clef en main répondant aux attentes du secteur financier et l'enjeu est de savoir comment utiliser au mieux l'état de l'art existant et lancer un processus d'apprentissage collectif.

Il faut repartir de la raison d'être des scénarios. Tout serait simple s'il suffisait d'étiqueter, pour avoir une idée de l'impact carbone d'un portefeuille, les contenus-carbone des diverses techniques puis de les agréger. Mais le bilan carbone et le coût économique des techniques dépendent de leurs interactions, qui obéissent à des contraintes physiques, économiques et organisationnelles. C'est le rôle des modèles de les représenter via des scénarios mettant en cohérence des informations disponibles et des conjectures sur les potentiels d'innovation et les dynamiques économiques futures. Ainsi, deux scénarios reflétant des visions contrastées du potentiel des énergies renouvelables donnent une idée de l'ampleur des incertitudes, à condition bien sûr que les modèles garantissent une image cohérente du système énergétique - par exemple, en excluant un scénario "énergies renouvelables" avec un prix du pétrole bas et des taux d'intérêts élevés. Pour ne pas se perdre dans l'information disponible, **la première étape** d'un bon usage des scénarios est de bien distinguer :

- **Des scénarios à vocation heuristique** qui explorent la cohérence technico-économique de trajectoires contrastées du point de vue technique (scénario tout solaire), politique

(coopération totale entre pays) ou géopolitique (stratégies des producteurs d'hydrocarbures) ; légitimes comme outils analytiques, ils n'ont aucune vertu prédictive mais peuvent baliser des scénarios extrêmes.

- **Des scénarios sous contrainte normative** où un “planificateur bienveillant” guide les choix des agents vers un objectif prédéterminé (neutralité carbone en 2050). Ils sont l'ancrage naturel des analyses d'alignement sur un objectif mobilisateur.
- **Des scénarios de futurs plausibles** construits à partir d'hypothèses tenues comme réalistes, avec des contraintes d'acceptabilité des recommandations du “planificateur” et une autonomie stratégique de certains grands acteurs (États-Unis, Chine, OPEP).

La deuxième étape est de clarifier les informations utiles, qui ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agit d'analyses de convergence ou de *stress tests*, et d'identifier celles que les scénarios détiennent, mais qui ne sont pas communiquées dans les publications parce qu'elles sont de peu d'intérêt pour les thèmes abordés (un article sur la bioénergie ne donnera pas force détails sur l'électricité solaire). Il faut organiser en outre une **descente en échelle de granularité** dans la description des secteurs et des filières. Ainsi, un scénario donnant la sensibilité aux prix du pétrole et à la croissance du PIB des demandes d'une “énergie renouvelable générique” peut alimenter des tests de sensibilité sur les marchés de l'éolien, le solaire ou la biomasse à partir de règles simples de désagrégation “en arbre” de la technique générique. De même, on pourrait passer du niveau de production d'un secteur “industries lourdes” à une analyse plus fine de secteurs comme le ciment, la sidérurgie ou la chimie de base.

La troisième étape est l'utilisation des scénarios pour “révéler” les degrés d'incertitude qui est l'information centrale pour les financiers. Tout scénario est “déterministe” et seul un ensemble de scénarios permet de baliser l'incertitude et d'en expliciter les sources. Pour l'analyse d'alignement des portefeuilles, une revue des méthodes utilisées par les fournisseurs de données est présentée dans *The Alignment Cookbook – A Technical Review of Methodologies Assessing a Portfolio's Alignment with Low-carbon Trajectories or Temperature Goal* (ILB, 2020, étude réalisée en collaboration avec I4CE). L'incertitude à prendre en charge dans ces analyses vient de ce que, même si tous les scénarios 2 °C convergent sur l'exclusion de l'usage de charbon non compensé par du piégeage de carbone et une forte réduction du pétrole, ils peuvent varier significativement quant au tempo de ces évolutions, et à la place de chacune des énergies renouvelables, du nucléaire et du piégeage de carbone. Deux ou quatre scénarios bien maîtrisés peuvent alors suffire à définir des “corridors” pour chaque type de technique.³⁶

Pour des *stress tests*, il est en revanche nécessaire de prendre un ensemble plus large de scénarios pour avoir une distribution de probabilité des parts de marché des options techniques et de la profitabilité des secteurs économiques. Ceci peut se faire en puisant dans les bases de données des scénarios, ou en mobilisant un ou deux modèles bien maîtrisés et en leur demandant de simuler une large combinaison d'hypothèses plausibles. Parmi ces scénarios, on pourrait d'ailleurs intégrer des chocs impliquant une transition abrupte d'un scénario à un autre (Ronconi, 2019). Un calcul de risque intégrant les actifs échoués et la description du réajustement des anticipations des agents est alors possible (cf. le bilan dynamique dans l'exercice Banque de France/ACPR). Il doit être précédé par un jugement informé sur la plausibilité des diverses combinaisons d'hypothèses derrière les scénarios et une compréhension de l'origine des incertitudes (Macroéconomie ? Prix du pétrole ? Politiques climatiques ? Technologie ?) et de leur évolution dans le temps.

Conclusion : Gouvernance de l'utilisation des IAM en finance

Les acteurs de la finance peuvent répondre à leurs besoins en **utilisant des scénarios existants**. Ce choix paraît le plus simple pour fournir des valeurs utilisables dans les calculs de risque ou d'alignement des portefeuilles. Mais les scénarios disponibles ne sont pas des prêts à porter qu'on enfile moyennant des retouches marginales. On ne peut les utiliser sans lever une série de difficultés sur le choix même de l'échantillon de scénarios retenu, l'accès aux données non publiées et le bon niveau de granularité sectorielle, spatiale et temporelle. Vu la complexité des modèles, on ne peut dépasser l'aspect "boîte noire" des scénarios sans un dialogue approfondi avec les modélisateurs, donc un investissement humain et financier des deux parties.

Le développement d'une capacité de modélisation propre à l'acteur économique a l'avantage de lui permettre de contrôler l'écriture des scénarios, les tests de sensibilité et la maîtrise des données de base. La difficulté est que cela nécessite une accumulation de compétences en macroéconomie, en économies sectorielles (énergie, transport, bâtiment, matériaux, agriculture et foresterie), en sciences de l'ingénieur, en sciences de l'univers dont la plupart des établissements financiers ne disposent pas à ce jour. Nous avons vu les limites de l'état de l'art. Chaque opérateur peut certes espérer avoir les moyens financiers et humains de les dépasser en montant "sur les épaules de géants" ayant accumulé des années d'expérience³⁷. Mais le risque est que la production d'une pluralité de modèles et scénarios par les acteurs économiques sans les scènes de confrontation que fournit la sphère académique, débouche sur des controverses peu contrôlables lorsqu'elles sont conduites dans un contexte de *"name and shame"*.

Le développement d'un partenariat recherche – monde économique. Cette option implique que les acteurs économiques et financiers investissent dans la compréhension des outils mobilisés et l'usage interne de versions stabilisées des modèles, par un dialogue organisé avec les équipes constructrices d'IAM et des spécialistes du traitement de l'incertitude. Elle permettrait "l'ouverture du capot" des outils et le co-pilotage de l'écriture des scénarios avec garantie de transparence vis-à-vis des régulateurs et de l'opinion publique. Elle permettrait aussi aux équipes de recherche de travailler en toute liberté pour améliorer leurs architectures de modélisation et enrichir leurs données de base, un co-pilotage qui conduira à la capitalisation progressive des expériences.

Ce dialogue pourrait être organisé dans le cadre d'un consortium avec pour objet (1) la production d'une bibliothèque de "résultats de scénarios" intégrant, dans un format commun, les données de base et les résultats y compris ceux de scénarios sectoriels "hors modèles intégrés" et de modèles nationaux et (2) l'accès à des versions stabilisées des modèles. Les acteurs économiques pourraient soit disposer de cette forme de "bien public" moyennant un protocole précis de "bon usage" des données, soit passer des accords avec les équipes pour utiliser en interne les versions stabilisées des modèles. Un tel consortium apporterait des garanties de crédibilité scientifique, qui permettraient aux acteurs économiques de participer à une accumulation des savoirs et de disposer d'outils de dialogue avec les régulateurs et les pouvoirs publics, y compris pour améliorer la pertinence des demandes qui leur sont faites sur des sujets dont la complexité et les pièges sont souvent sous-estimés.

NOTES

- ¹ Ce groupe de travail a été mis en place par le Conseil de stabilité financière en 2016.
- ² Recommandation c du pilier stratégie, rapport final de la TCFD (2017).
- ³ Voir par exemple “*L’Union européenne risque de subir des contraintes fortes sur les approvisionnements pétroliers d’ici à 2030 – Analyse prospective prudentielle*”, The Shift Project (2020).
- ⁴ On entend par scénario, un ensemble formé par la description d’une situation future et de l’évolution cohérente des événements qui permettent d’y parvenir à partir d’une situation d’origine. Un scénario est, généralement, constitué d’un narratif (le récit du scénario) et potentiellement de données quantitatives. Ces données peuvent être déterminées d’une manière exogène en cohérence avec le narratif (ce sont alors des hypothèses) ou endogènes à partir d’un modèle quantitatif (ce sont alors des résultats).
- ⁵ Voir “Advantages and disadvantages of scenario approaches for strategic foresight” Mietzner et al., 2005.
- ⁶ Voir “Scénarios énergie-climat – évaluation et perspectives”, Afep et The Shift Project (2019).
- ⁷ Voir le premier rapport d’activité du NGFS “A call for action Climate change as a source of financial risk”, NGFS (Avril 2019).
- ⁸ Plusieurs études ont montré que la recommandation de la TCFD sur les scénarios est sans doute celle qui est la moins bien appliquée.
- ⁹ Voir Annexe 3 du rapport final de la TCFD (2017).
- ¹⁰ Voir le dernier rapport d’évaluation de la TCFD (mai 2019) “*Such an approach [the use of standard scenarios] may reduce concerns about releasing confidential business information, reduce scenario analysis costs, and improve transparency and comparability of disclosures*”.
- ¹¹ L’analyse des trajectoires compatibles avec un réchauffement de 1,5 °C repose exclusivement sur des MEI technico-économiques. Voir “Rapport 1.5 °C, Supplementary Material 2.SM.1.2” GIEC (2018).
- ¹² Une fonction de bien-être social vise à traduire les préférences des consommateurs. Dans le modèle de Ramsey, le taux d’épargne est endogène et un consommateur choisit la part du revenu qu’il consomme et la part du revenu qu’il “lègue” à ses descendants.
- ¹³ D’une manière générale, la détermination d’une fonction de dommages se heurte à plusieurs difficultés :
- Le manque d’information empirique sur le coût des impacts du changement climatique et le fait qu’il soit difficile d’extrapoler les coûts futurs (quelle loi utiliser ?).

- Les dommages affectent des stocks et des biens publics non marchands qu'on ne peut monétariser (le dommage lié à la déforestation excède de beaucoup la perte d'activité de la sylviculture).
- La représentation des conséquences sociales et économiques d'un scénario "catastrophique" non impossible, même si ce n'est pas le scénario "le plus probable".

¹⁴ Voir notamment "Greening the financial system the new frontier" (2019), Financial stability review, Banque de France et "The economic consequences of climate change" (2016) Organisation for Economic Co-operation and Development.

¹⁵ Les modèles "coût-bénéfice" demeurent largement utilisés pour l'évaluation des politiques climatiques (Wing, 2007, 2011 ; Scriciu, 2007 ; Ackerman, 2014). Par ailleurs, parmi les modèles utilisés par le GT3 du GIEC, un grand nombre repose sur une approche de modélisation GCE ou DSGE (GIEC, 2014). En ce qui concerne les modèles "technico-économiques", d'une grande variété, l'impact du paradigme "néoclassique" est parfois moins fort, mais n'est pas nul (usage de taux d'actualisation ou détermination d'une "valeur du carbone", par exemple).

¹⁶ Voir "Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review", Hafner *et al.* (2020).

¹⁷ Voir notamment "Comparaison des modèles météorologiques, climatiques et économiques : quelles capacités, quelles limites, quels usages ?" Alain Grandjean et Gaël Giraud (2017) et "Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review", Hafner *et al.* (2020).

¹⁸ Voir notamment "Scénarios énergie-climat : évaluation et mode d'emploi", The Shift Project et Afep (2019).

¹⁹ La complexité de la problématique oblige à utiliser un formalisme mathématique minimal pour assurer la cohérence logique de l'exercice. Cette cohérence n'est, cependant, pas une preuve de véracité, ni même de plausibilité.

²⁰ Cette approche est, d'ores et déjà, utilisée dans l'industrie pour modéliser le comportement de systèmes industriels complexes et non linéaires (incluant des boucles de rétroaction) et permet notamment de s'assurer de la conservation de la matière et de l'énergie. Le Modèle World3 (créé pour une étude au Club de Rome et publié dans "The Limits to Growth") est, par exemple, un modèle en dynamique de système.

²¹ Cette étude démontre en particulier la difficulté d'accéder à la réalité des travaux et des débats internes. Sur 126 citations, elle ne fait référence qu'à 8 publications représentatives de la production académique résultant de la mise en œuvre d'IAM, et ne renvoie pas aux synthèses du GIEC.

²² Ce fut l'époque du grand programme IIASA (Häfele) et du modèle MESSAGE, du modèle EFOM en France (D. Finon) et du modèle MARKAL à l'OCDE qui donneront le modèle TIMES aujourd'hui déployé dans plus de 50 pays.

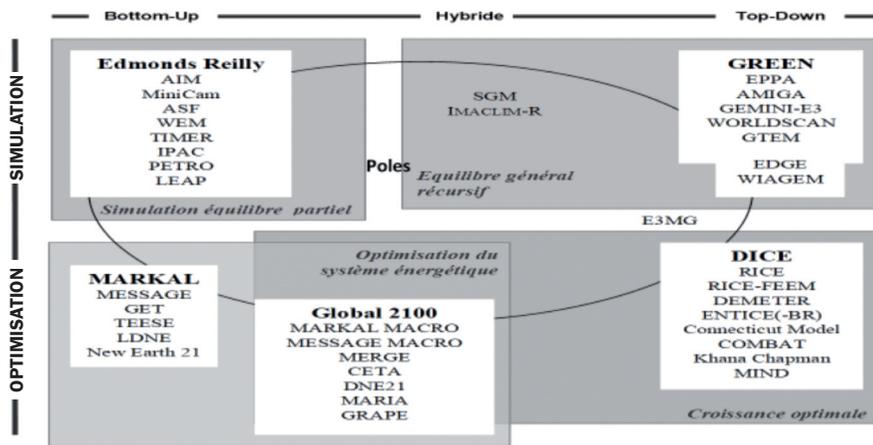
- ²³ Ces modèles tiennent bien compte des lois de la thermodynamique et donc échappent au procès que les lois de cette dernière seraient ignorées des modèles économiques. Cette ignorance s'explique, dans le cas des modèles macroéconomiques de court/moyen terme, par le type de questions auxquelles ils se proposent de répondre. Dans les modèles de long terme (Acemoglu *et al.*, 2012), elle peut conduire à des conclusions contestables en ne maîtrisant pas le réalisme des élasticités de substitution entre facteurs (Pottier *et al.*, 2013).
- ²⁴ La thèse de Pauline Huet (Huet, 2015) montre, par le jeu des citations croisées, que les revues de référence en économie publièrent très peu de travaux sur les questions climat (et même sur les questions d'énergie) et que ces travaux furent publiés dans des revues d'économie spécialisées (*The Energy Journal, Energy Policy, Energy Economics, Environmental Modeling and Assessment*) et dans des revues interdisciplinaires (*Nature, Science, Global Environmental Change, Climate Policy, etc.*). Nordhaus reste un exemple unique d'auteur à être cité de façon autre qu'anecdotique dans les deux champs de la littérature. Son effet notoriété vis-à-vis des économistes généralistes faisant des incursions sur le climat explique qu'il ait constitué un "strawman" pour les critiques de la façon dont les économistes néoclassiques traitent du climat (évaluation des dommages, actualisation). Cependant, ces controverses ont détourné l'attention du fait que les coûts d'abattement des émissions que le modèle DICE de Nordhaus calcule ne changent presque pas selon qu'on agisse en 2020 ou en 2040 pour atteindre un objectif en 2060. Ce point technique est important puisqu'il montre concrètement l'inadaptation de DICE pour débattre du tempo de l'action (Gilotte, 2004).
- ²⁵ La notion d'équilibre prête à confusion. Fondamentalement, dans les premiers travaux de l'économiste Norvégien Johansen (1930-1982) il s'agit d'un équilibre comptable des flux au sein d'une économie, outil qui permet de cerner les interdépendances entre agents et secteurs économiques. Une économie "en déficit" est en équilibre comptablement via la dette qu'elle contracte. Dans les modèles standards d'équilibre général calculable, l'équilibre est entendu dans un sens plus fort, au sens où les marchés des biens sont équilibrés et les facteurs de production pleinement employés, l'économie suit ainsi un sentier de croissance dit "optimal". Beaucoup de modèles d'évaluation intégrés retiennent cette notion, mais d'autres s'en tiennent au sens originel du terme et simulent des économies avec chômage, sous-investissement et inerties dans l'équilibrage du marché des biens. Ce sont des modèles d'équilibre sub-optimal.
- ²⁶ Certes, à la fin du débat de deux décennies entre le Cambridge anglais et le Cambridge américain sur la fonction de production néoclassique, Solow et Samuelson reconnurent que cette dernière, "astuce" utile pour représenter des flexibilités dans l'économie à long terme, ne pouvait représenter les choix techniques sauf à la marge d'un sentier optimal. Cette recommandation a été ignorée et il a fallu plusieurs années pour qu'on commence à se tourner vers des spécifications "hybrides" afin de mieux représenter les substitua-bilités techniques (cf. *infra*).
- ²⁷ Cette non prise en compte des lois de la thermodynamique s'explique, dans le cas des modèles macroéconomiques de court/moyen terme, par le type de questions auxquelles ils se proposent de répondre. Dans les modèles de long terme (Acemoglu *et al.*, 2012), elle peut conduire à des conclusions contestables lorsque le réalisme des élasticités de substitution entre facteurs n'est pas maîtrisé (Pottier *et al.*, 2013).

- ²⁸ Par *hard linking* (résolution d'un code informatique unique) dans la version mondiale multirégionale du modèle (Sassi *et al.*, 2010) ; par *soft linking* (résolution itérative avec échange de variables clés jusqu'à convergence) dans les versions nationales du modèle (Gherzi, 2015), appliquées à un nombre croissant d'économies au sein d'un réseau international labellisé par le CNRS.
- ²⁹ On peut approximer ces montants à partir de la base de données EU KLEMS (euklems.net) qui donne les achats des secteurs de bien d'équipement aux autres secteurs. Il faut pour cela faire quelques hypothèses, certes grossières mais qui permettent de se faire une idée des ordres de grandeurs en jeu. Ces données ne sont pas intégrées dans les modèles actuels. Le chiffre cité, ici, est tiré de Aglietta *et al.* (2015).
- ³⁰ Ceci renvoie à des problèmes importants d'interprétation des résultats par un lecteur qui n'a pas le temps de "soulever le capot" pour voir ce que les modèles font vraiment. Un papier récent de *Nature* (Forster *et al.*, 2020) présente un scénario à 1,5° C pour la période post-COVID avec force détails sur la dynamique des GES ou sur les gains d'émission dans les divers secteurs, dont les transports, en suggérant qu'un tel scénario est possible par le transfert d'1,2 % du PIB vers les investissements bas-carbone. Mais le modèle utilisé n'intègre ni les transports ni l'industrie, ni pour leurs sentiers techniques, ni pour leur rôle dans le changement structurel de la croissance.
- ³¹ Il convient de toujours se rappeler de cette phrase de la Convention Climat (Rio 1992) : *"social and economic development and poverty eradication are the first and overriding priorities of developing country Parties."*
- ³² https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/820184_ngfs_scenarios_final_version_v6.pdf
- ³³ <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>
- ³⁴ Les modèles multisectoriels adoptent généralement une élasticité de substitution, dite d'Armington, entre variétés domestiques et importées d'un même bien. Cette élasticité est, en général, beaucoup plus élevée que celle prévalant, dans l'économie domestique, entre l'intrant composite agrégeant les deux sources d'approvisionnement et les autres facteurs de production.
- ³⁵ <http://www.epe-asso.org/etude-fonddri-epe-iddri-scenarios-de-transition-vers-un-monde-econome-en-carbone-en-2050-quels-enjeux-pour-lindustrie-resultats-resume-et-rapport-complet-2008-2009/>
- ³⁶ Le GIEC a, depuis quelque temps, recommandé de ne pas choisir un nombre impair de scénarios pour éviter que le scénario médian soit systématiquement interprété comme le plus probable.
- ³⁷ L'expression vient du "*nani gigantum humeris incidentes*" attribué à Bernard de Chartres (XII^e siècle) qui dit que nous sommes tous des nains qui peuvent voir plus loin que les géants si nous montons sur leurs épaules. Elle a été reprise par Pascal, Montaigne, Newton *et...* la mission Apollo 17 et Google Scholar.

Annexe : Classifications des modèles d'évaluation intégrée

Nous reproduisons ici deux typologies différentes de celle utilisée dans le corps de notre texte. La première décrit la situation des modèles au début des années 2000. Cette situation s'organisait autour de deux axes : le premier est l'axe, *bottom-up* (richesse des informations technologiques) contre *top-down* (richesse du cadrage macroéconomique) le deuxième est l'axe anticipation "myope" versus "parfaite". Le mouvement d'hybridation dont un des moments de lancement est un numéro spécial de *The Energy Journal* (Hourcade et al., 2006) a consisté à se rapprocher du "centre" du rectangle.

Figure 3 : Aux origines des "tribus" de modélisation



Source : Crassous, 2008

La deuxième typologie est tirée de la synthèse qui vient d'être publiée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Elle tient compte du mouvement d'hybridation, mais ne permet pas de saisir à quel point ce mouvement résulte d'une tension entre progrès sur la "macroéconomie", en particulier la représentation des interactions multisectorielles, et progrès sur les deux autres dimensions, réalisme technologique et sur la réalité des comportements. C'est pourquoi nous avons opté dans ce texte pour une description "en cube", à trois dimensions.

Figure 4 : Typologie des IAM

	Equilibrium		Non-equilibrium
	General equilibrium (full economy)	Partial equilibrium (partial economy)	
Perfect foresight (optimisation)	REMINI, WITCH, BET, MERGE, MESSAGE-MACRO, MARKAL-MACRO	MESSAGE, TIMER/MARKAL, TIAM, DNE21+	E3ME, Oxford Global Macroeconomic and Energy Model
Myopic (simulation)	IMACLIM, GEM-E3, ENV-Linkages, Phoenix, SGM, G-CUBED, MIT EPPA	IEA WEM, IMAGE, GCAM, POLES	

Source : UNEP Finance Initiative, 2021

Climate-economic models and scenarios: a reading guide for sustainable finance

Abstract

Given the urgency of the climate change situation, there is no doubt that the transition to a low-carbon economy will lead to profound changes in the economic system and the functioning of society in the years and decades to come. However, it is difficult to predict what these changes will look like and what risks and opportunities they will create for economic agents. Faced with such uncertainty, integrated economic-climate models are seeking to describe possible transition scenarios, and to provide public decision-makers with the tools to optimise their actions and economic agents with the information to understand the possible futures they need to prepare for.

Until recently, the use of scenarios has been restricted to a small community of insiders, but international bodies such as the TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures) and the NGFS (Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System) are now demanding that companies and financial institutions also use them. This issue of the *Opinions et Débats* series therefore proposes to provide an interpretation grid and contextual information for users of integrated models and the scenarios produced on the basis of these models.

The present issue comprises two articles. The first lays the foundations of the debate by recalling the importance of scenarios for the business world and the main criticisms of integrated models. The second article starts with a historical review and then presents the current state of the art of integrated models, categorising the various models according to their technological precision, their complexity of macroeconomic feedback, and their degree of realism in terms of behaviour and markets. The authors then discuss the limitations of integrated models and clear up certain misunderstandings, particularly with regard to the notion of damage.

The last part of the article looks at the use of integrated models in finance, with a detailed analysis of the recent climate stress test exercise by ACPR (Autorité de contrôle prudentiel et de résolution). We conclude with a discussion of the governance issues involved and the ways in which integrated models are used by financial actors.

The study reflects the personal views of its authors and does not necessarily express the position of the Institut Louis Bachelier and the Louis Bachelier Finance and Sustainable Growth Laboratory of Excellence.

Economy-climate models and scenarios: essential tools for preparing the future... to be handled with caution

Romain Grandjean

Project manager - Initiative IRIS

In June 2017, the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD)¹ published eleven recommendations for financial and non-financial businesses to encourage disclosure of their climate risk exposure. One of these calls on organisations to “describe the resilience of [their] strategy, taking into consideration different climate-related scenarios, including a 2°C or lower scenario”.²

Since that time, extensive debates have taken place among businesses, financial players and even regulators with regard to these scenarios, which describe the transition to a resilient low-carbon economy. In particular, two key issues that were previously confined to insiders have come to the fore. These concern:

- The tools that make it possible to describe future transformations, or more precisely to represent the many complex interactions between our socio-economic system and the environment.
- The methods of analysis of the future on which financial and non-financial players will rely to prepare for the transformations to come.

1. “Scenarios”: a powerful tool for understanding future upheavals

The debates initiated by the TCFD have not emerged accidentally. They are taking place in a very specific context.

In the years to come, there is no doubt that the transition to a resilient low-carbon economy will lead to profound changes in the economic system, regardless of whether these are organised or unplanned. The dependence of the world economy on fossil fuels (which account for 80% of greenhouse gas emissions), the need to reduce these emissions by around 6% a year if we are to keep global warming below 2°C, and tensions regarding supplies³ are all factors contributing to instability and uncertainty. There is therefore every reason to believe that these changes may occur in a chaotic manner, involving profound technological, political, economic and social disruption. For enterprises in all sectors, this will entail an upheaval of their business environment, which they will need to prepare for.

Faced with this new strategic situation, scenario analysis⁴ is a powerful tool for understanding future transformations and building a resilient strategy. There is already an abundant literature on this method, which basically involves projecting an organisation into several possible but different futures described by scenarios. In this way, decision-makers can then anticipate various outcomes in relation to the issues they are interested in and can develop an adaptation strategy for any of these outcomes. This rational and objective approach to managing future uncertainty will in addition create confidence in the organisation both internally and externally. It is of course essential in this process that the scenarios analysed are characterised by diversity, overall coherence, and relevance (to the issues addressed and the characteristics of the user).

The scenario analysis method is by no means new and indeed has been applied by various companies since the 1970s. Shell in particular was one of the pioneers in this field. Through its development of scenario analysis the company was able to anticipate the oil crisis of October 1973 and be better prepared than its competitors.⁵

Independently of the TCFD's recommendations, many financial and non-financial players⁶ are now calling for the scenario-based approach to be widely used in order to understand the future and prepare for the transformations linked to the decarbonisation of the economy and climate change. This also applies to regulators, who are warning about the potentially chaotic nature of the transition.⁷ However, given the specific nature of these issues (in particular their systemic and long-term dimension), the shift from theory to practice is fraught with difficulties,⁸ which tend to limit the analysis to the few scenarios best known in the industry.

Non-financial businesses are broadly in favour of scenario analysis. However, apart from the need for a method to integrate such analysis into their internal strategic thinking process, the design of the underlying scenarios, which need to be quantitative, coherent, varied and adapted to their needs, seems beyond their reach. To date, very few such companies are devoting resources to it, not least because they lack the skills to do it themselves at the right level.

This is also the case for financial players, who are facing a further issue, namely the need to easily compare enterprises (and the strategies they display) with each other. The prominence of the principle of comparability of published information in the work of the TCFD is no accident.⁹ However, when applied to the scenario analysis methodology, this criterion leads, by construction, to the use of quantitative scenarios that are widely shared by the various users (financial and non-financial businesses). Moreover, the use of such scenarios also has the advantage of (supposedly) simplifying the analysis process and ultimately reducing the costs involved.¹⁰ This argument is particularly attractive to investors at a time when passive management is rapidly growing.

The combination of the two phenomena is thus leading these various actors either to outsource scenario design or to turn to ready-made scenarios, which offer the desired level of detail and quantification and derive their legitimacy from the institution that publishes them. Such is the case, for example, with the scenarios of the International Energy Agency (IEA).

This current situation has at least three disadvantages. Firstly, the use of a reduced and homogeneous panel of scenarios leads to a limitation in the variety of futures studied and, consequently, the relevance of the associated analyses. It also favours the adoption of a normative and preconceived vision of the future, whereas the potentially chaotic (in the mathematical sense of the term) nature of the transformation of the economic system instead calls for forward-looking intelligence. Finally, and most importantly, the few scenarios used are based on a quantitative modelling approach which as yet does not allow the complex and non-linear nature of future transformations to be grasped.

This last drawback is crucial: beyond the scenarios that companies and investors might use, quantitative modelling tools now occupy a central place in political and economic decision-making.

2. Why the models used today may not work?

Most of the scenarios used today to assess transition or adaptation issues are based on quantitative integrated assessment models (IAMs). Of varying degrees of sophistication and aggregation according to the needs of specific applications, these aim to represent, from a system of mathematical equations and a solution process, the interactions between the economic system and the 'physical' environment in which it is embedded. Such models have emerged with the growing need to calibrate climate change mitigation and adaptation policies such as carbon taxation or investment planning in the energy production system.

The IAMs most commonly used today by public or private economic actors can be classified into two categories: 'techno-economic' models and 'cost-benefit' models.

The models in the first category, which vary considerably (see the article by Jean-Charles Hourcade et al. later in this publication), include a very high level of sectoral and geographical disaggregation and attempt to represent as accurately as possible the relationships between economic activities (via energy use) and GHG emissions. Their structure is modular (linking several sub-models together), and the more complex the model, the more accurate it aims to be. They are primarily used to determine the least costly pathway to achieve a pre-determined CO₂ emissions reduction target. The solution

process consists of balancing an exogenous energy demand (based on GDP, population and the evolution of certain uses, particularly modes of transport) with an optimised production level, depending on the CO₂ emissions constraint, through improved energy efficiency (in the production or consumption processes) and an endogenous projection of the energy production mix. The ‘physical’ impacts of climate change are not represented (or only marginally in some sectors such as agriculture), largely because these models are mostly used to represent the pathways for remaining below a 2°C limit.

Due to their high level of geographical and sectoral disaggregation, almost all the scenarios used by businesses, such as those studied by IPCC Group 3,¹¹ are based on the models in this category.

In the same framework, cost-benefit models represent the impacts and mitigation of climate change, and endeavour to determine an optimum between the costs of damage and of mitigation. The DICE model, developed by William Nordhaus, is the best known. Unlike the ‘techno-economic’ models, cost-benefit models include a highly aggregated representation of the economy. They are based, on the one hand, on a social welfare function – most often derived from an intertemporal maximisation of utility inspired by the Ramsey model¹² – and, on the other, on a representation of the interactions between GHG emissions, temperature rises and the associated economic damage. Climate ‘damage’ is represented by a feedback function, which links the ‘externality’ variable (here the temperature increase) to a variable describing the associated economic impact (GDP growth, for example). The determination of such functions poses many challenges.¹³ Although their limitations are well known to the academic community, William Nordhaus is so renowned that his results are still cited by prestigious institutions.¹⁴ The results of the DICE model suggest that global warming of 6°C by 2100 would cost only 8 to 10 points of world GDP (which would have grown by a factor of eight by then), even though scientists tell us that such an increase would lead to the collapse of the world’s economies.

Whichever category they fall within, both these types of models aim to represent (with different objectives) the complex interactions between complex ‘social’ elements (individuals), but whose behaviour, described by mathematical equations, has yet to be validated. The approach according to which these interactions are described, insofar as it characterises the way in which the socio-economic system exploits the resources of the environment and creates externalities, is thus decisive.

At present, however, a large number of models are still based, at least in part, on a neoclassical representation of the economy¹⁵ which postulates that it is in equilibrium or will return to equilibrium spontaneously following a crisis. This representation of the economy implies a certain structure of models characterised, in particular, by the existence of representative economic agents, the rationality and perfect information of economic agents (intertemporal optimisation of their utility and profit), and the long-term return to an optimal market equilibrium.

Given that the transition to a low-carbon economy is an unprecedented, complex and non-linear process likely to induce profound transformations of the socio-economic system and to generate new operating dynamics (uses, values, institutions, structures, etc.), a now abundant scientific literature¹⁶ emphasizes the limitations of the above approach. The most significant of these limitations include the presumed adjustment towards equilibrium through

perfect price flexibility, the failure to take into account natural resource constraints and therefore 'physical' feedback, the dependence of model results on the value of the discount rate used and on the neutrality of money.¹⁷

Among other issues associated with the modelling procedure, the quality of the data used to calibrate the models also raises questions.

While models representing 'physical' systems (e.g. climatic or meteorological) rely on a set of relatively sophisticated measurements for their development, economic models are calibrated on 'socially constructed' statistical data, and therefore depend on the performance of institutions (sometimes very weak in certain countries), as well as on the methods for constructing this data.

Furthermore, the increasing complexity of the models makes the results highly dependent on the calibration of parameters, a process that is often carried out in an empirical manner without any theoretical framework.

This brief overview highlights how the use of models currently used in the economic world may lead to the production of scenarios describing an evolution of the economy that is at best partial, and at worst physically impossible (particularly because none of the models enforces physical limits other than CO₂ emissions).

So what does all this imply for the scenarios produced by major international organisations, which describe a rapid and radical decoupling between GDP and energy consumption, when such a process has never before been observed?¹⁸ Admittedly, the past does not determine the future, but such transformations need be soundly justified, particularly by economic policies that also break with the past – and this is something that does not appear clearly in these exercises.

These examples show that decision-makers need to treat with caution the results produced by these tools as a basis for decision-making.

3. Points to consider: finding the way forward

The current trend in the use of scenarios and models reflects the temptation in the economic world to 'quantitatively predict' the future, even though for all the reasons mentioned above this is neither possible nor desirable.

We can, however, sketch out some possible answers to achieve a more relevant and informed use of these tools and methods.

Faced with the uncertainty of the future, we can only call on public and private economic actors to carry out analyses of the future based on scenarios that are as diversified and coherent as possible. This requires a genuine appropriation of the 'scenarios' tool and the models on which they are necessarily based,¹⁹ in order to relativize and contextualise the results described. In other words, the results of a single model, devoid of any context, cannot – and should not – provide an 'authoritative argument' on which to base decisions.

It is then essential to make the modelling exercise more transparent, since despite its importance it is still too opaque. In particular, the following points apply to all models:

- Open access publication of complete and explicit technical documentation, including an exhaustive list of all input assumptions (exogenous variables and structural indicators, such as the discount rate);
- Implementation of back testing and its explicit sharing with reviewers (comparison of the output of the models with observable data is the primary criterion of validity);
- Minimising the use of unobservable hidden variables (such as utility functions) and conducting sensitivity tests on the calibration of model parameters.

Given the well-known limitations of the most commonly used models and scenarios, it is important to invest resources in the design of scenarios based on alternative modelling approaches. Even though it is desirable to capitalise on the existing tools and to put them to better use in the renewed scenario building that we are calling for, we should also encourage the development and use of new models that are better adapted, from their design stage onwards, to the high level of uncertainty our society is facing. These new modelling approaches must ensure that the physical underpinnings of the economy and the constraints imposed by planetary limits are taken into account, while providing overall consistency in terms of physical stocks and flows (climate, resources, biodiversity). From this standpoint, system dynamics models present attractive characteristics.²⁰

However, even when renewed and improved, the modelling exercise will have its limitations: while it is possible to represent discontinuities or changes of course, it is probably not possible, for example, to represent chaos.

In any case, even if it does not concern their core business, it is clearly in the interest of companies to encourage and support this research effort. For it is their future and their prosperity that is at stake.

Integrated economy-climate models and their uses for decision-making

Frédéric Gherzi, Jean-Charles Hourcade, Julien Lefèvre

*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, UMR 8568, CNRS,
Ponts Paristech, Agro Paristech, EHESS, CIRAD, Université Paris-Saclay.*

Peter Tankov, CREST-ENSAE, Institut Polytechnique de Paris

Stéphane Voisin, Institut Louis Bachelier

Introduction

Communication and public debate on climate change are still mainly reliant on the climate models listed by Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), even though models capable of identifying the technological and economic conditions for greenhouse gas (GHG) emissions control were being built as early as 1990. These models were analysed in 1995 by Group III of the IPCC (IPCC, 1995) and then, termed Integrated Assessment Models (IAMs), used and developed by a scientific community based in dozens of countries, including developing ones.

Originally used to shed light on issues of public economy (timing of action, carbon prices, impacts of climate policies on growth, employment and income distribution), IAMs have been increasingly put to use in recent years by economic and financial players looking for forecasts to inform their technological choices (electric vehicles, hydrogen, wind turbines, biofuels) or the composition of their financial portfolios. The Shift Project's recent study for the Association Française des Entreprises Privées on energy and climate scenarios testifies to this interest and reveals the difficulty of understanding IAMs in a relevant way for observers lacking a "reading guide".²¹

IAMs are a jungle populated by 'tribes'. So first of all we will give an account of their historical development in order to avoid any misunderstandings stemming from the plethora of requests for expertise by economic actors keen to integrate the objectives of the Paris Agreement. For such misunderstandings have consequences for the 'mental map' that structures public discourse and decision-making. We will then discuss the methodological conditions for the use of IAMs to answer the various questions posed by the financial community, and the conditions for their 'good governance'.

I. What integrated models are and are not

1.1. A historical review to understand the current state of the art

IAMs embody the history of energy modelling throughout the post-war period. Compared to other sectors, energy has three characteristics that explain why it is a field where “economic science has become incarnate” (Marcel Boiteux): the need to operate within a long-term perspective given deployment times and lifetimes of equipment; the ability to aggregate different final energies into a simple metric (tonne of oil equivalent or joule); and the role of prices in coordinating technical systems at each moment and in financing their expansion.

The use of well-established theoretical principles in economic calculations (Arrow, Debreu, Kantorovitch, Lange) was speeded up by the rapid expansion, after the Apollo programme (1961) and the spread of the IBM 360-40, of computing capacities based on linear programming to optimise technical systems facing a given demand, and on econometrics to forecast this demand. Even before the 1973 oil crisis, this created a ‘supply of services’ coupled with an accelerating demand for forecasting, triggered by the intellectual challenge of the Club of Rome report, Nixon’s Project Independence, and the controversy around nuclear energy.²² In these models, final energy demand is correlated with household income and the value added produced by different economic sectors. The transition between final demand and primary energy needs is then accomplished by integrating distribution network losses and thermodynamic losses.²³

Following the 1973 oil crisis, the 1979 oil crisis further raised awareness that the uncertainty of a return to ‘normal’ was destabilising forecasting and optimisation. Forecasting final demand became less easy, due to the end of regular growth and an energy-GDP elasticity that no longer resembled a parameter of a quasi-physical ‘law’, but proved to be subject to price effects and energy efficiency policies. This led to the construction of non-econometric demand forecasting models to represent the changes governing the energy-GDP link (Médée in France). Supply-side optimisation was destabilised by uncertainties about final demand and oil prices, as well as by the identification of the links between energy and the macroeconomy, via the impact of energy prices on production costs, purchasing power and the need for competitiveness imposed by the ‘oil bill’, an impact which reduced the effectiveness of Keynesian stimuli.

The 1980s were marked by attempts to introduce energy into macroeconomic forecasting models for the short and medium term. However, this effort came to nothing and a kind of division of labour was established. Macroeconomics remained focused on the debates between Keynesian and neo-classical models around the rational expectations revolution and efficient markets (Fama, 1970; Lucas, 1972), debates that involved the design of public policies and the understanding of business cycles and sources of growth. The dialogue with energy specialists remained inconclusive.

The dialogue resumed with the emergence of the climate issue in the late 1980s. The energy world had just abandoned its predictive ambitions and recognised the need for a prospective approach (cf. 1989 World Energy Conference) and no other scientific community was so well equipped to deal with long-term interactions between technical change, resources, ‘carbon constraints’ and the economy. In fact IIASA’s (International

Institute for Applied Systems Analysis) foresight exercises had integrated the climate dimension since the late 1970s. Long-term models were available for transport, but they focused on 'local' scales. In the agricultural sector, foresight models were mainly aimed at exploring how food needs could be met by increasing cultivated areas and productivity gains per hectare (Paillard et al., 2010). Despite some pleas for a dialogue with transport and spatial economics models (Hourcade, 1993), the field of climate-economy scenarios became dominated by energy modellers, who gradually began addressing new issues. On the other hand, this community, given the importance of the impact of climate policies on growth and employment, had to intensify the dialogue that had begun with macroeconomic modelling during the oil crises.

The first 'point of contact' was William Nordhaus, now a Nobel laureate, the only recognised mainstream economist (and the author of an economics textbook with Samuelson) to take an interest in the climate issue at that time (from the late 1980s.)²⁴ Nordhaus maintained close relations with IIASA and the 'epistemic community' of energy models, even though his DICE model, the precursor of IAMs, does not include an explicit representation of energy. DICE is an 'optimal control' model that calculates the best emissions abatement strategy over the course of the present century, through a cost-benefit trade-off between the costs of action expressed in terms of lost GDP and its benefits, as well as damage avoided. DICE incorporates an 'engine' of growth with a single composite good, a cost function of carbon abatement bounded by a 'backstop technology' and a damage function, itself highly aggregated.

DICE's role was therefore mainly 'paradigmatic', as there could be no real synergies between it and the energy prospective modelling community. The latter felt that it was legitimate to base their exercises on neo-classical growth models that had the merit of a long-term macroeconomics that would not involve them in a complicated debate about 'post-Keynesianism'. Climate scientists, on the other hand, saw DICE as the work of an economist working within the time frame of the century and using reduced forms of their own models. Nordhaus's success among economists came from making freely available a 'Ramsey' type model (1928) that was prominent in the 'growth theory' section of economics textbooks. This has allowed many economists to use DICE, with some modifications, in their 'climate economics' presentations.

The second point of contact was Dale Jorgenson (Jorgenson, 1993), a student of Leontief trained in inter-industry matrices. Jorgenson's ambition was to revolutionise the understanding of the sources of long-term growth based on sectoral KLEM production functions (K = capital, L = labour, E = energy, M = other inputs), with the addition of energy to the (K, L) function of Solow's reference model. Jorgenson's work was used in computable general equilibrium models (CGEM), which combined, somewhat controversially, the traditional work carried out at the World Bank (Chesnery, Robinson, Taylor, De Melo) with advances in the calculation of equilibrium prices using the Scarf algorithm.²⁵ Thanks to the enormous increase in microcomputer capacities, KLEM functions could be used in multisectoral models calibrated on inter-industry matrices. To activate the technical coefficients underlying the matrices, all that is required is to choose a functional form from a fairly small 'menu' (Cobb-Douglas, Constant Elasticity of Substitution, Translog).²⁶ The economists called upon to respond in a timely manner to the demands of governments, international organisations and DG XVII of the European Communities were able to do so at a lower cost without going through an in-depth dialogue with engineers and 'specialised economists'.

Admittedly, this was met with scepticism by energy specialists, since the functions used could, in the event of a very high carbon price, simulate non-existent technical flexibilities.²⁷ As a result, a long-standing conflict arose between so-called ‘bottom-up’ models, which produce a detailed engineering picture of energy systems, and ‘top-down’ models which deal with substitutabilities between energy and other inputs ‘by implication’, based on value-added flows (Grubb et al., 1993). However, a generation of multi-sectoral general equilibrium models was launched, abandoning any econometric ambition, as it was difficult to find realistic specifications over a long period. The only thing that was done was to pragmatically calibrate the elasticities of substitution. The pioneering models were GREEN at the OECD (the origin of the MIT EPPA model) and the Second Generation Model (SGM) at the Batelle Institute (Jae Edmonds). It should be noted that the anchoring of these models on equilibrium growth paths was done in the absence of dialogue with short-term models. The only integrated model of Keynesian inspiration was E3ME (Terry Barker at Cambridge).

The shift towards IAMs became more pronounced in the Second Assessment Report of the IPCC (IPCC, 1996) when the team responsible for Chapters 8 and 9 on the costs of climate policies as seen by bottom-up and top-down models decided to create a tenth chapter that had not been initially planned. This chapter confirmed the emergence of an integrated modelling community aimed at representing the interfaces between economic systems, technical systems and the climate system, which was based on the Energy Modeling Forum with IIASA as the focal point in Europe.

1.2. A taxonomy for navigating the IAM jungle

Twenty-five years later, IAMs have proliferated: around thirty were listed in the fifth IPCC report in 2014, not including very compact models such as DICE. They differ in their representations of the interactions between the economy and technical systems, these differences having been inherited from modelling traditions which persist despite the hybridisation efforts made from the 2000s onwards (Hourcade et al., 2006). These efforts have made the landscape and the usual typologies, reproduced in the Annex, more complex and do not allow them to be easily expressed. The cube that follows attempts to do so by distributing the existing models along the three axes T, M, C.

- **T, the degree of technological precision**, ranges from no explicit representation of technology ((O,M,C) plane, with macroeconomic production functions, aggregated abatement cost curves), via an intermediary level that simply explains the generic structuring technologies (e.g. fossil fuels vs. nuclear energy vs. renewables), to a process-based representation of the technical systems and their constraints (e.g. electricity production technologies, load curve and network constraints, etc.).
- **M, the level of complexity of macroeconomic feedbacks**, with, in the (T, O, C) plane, the partial equilibrium model, which ignores the feedback from technical and energy systems on the economy and growth. Moving along the M axis, we find models of aggregate representation of the economy with technical systems/growth feedbacks, then multisectoral models representing the interdependencies between the inter-industrial matrix, final demand structure, investment, international trade and growth.
- **C, the degree of realism of behaviours and markets**, which ranges from the (T, M, O) plane of the representation of a planner, who optimises the energy system and growth

with perfect knowledge of the future, via a recursive description in which agents progressively revise their choices on the basis of new information on relative prices and the costs and performance of techniques, to the representation of economic trajectories in disequilibrium. The progressive realism of the representation of actors' expectations goes hand in hand with the description of imperfect markets and situations of structural unemployment or under-investment.

This schematisation makes it possible to describe the evolution of historical paradigms towards hybrid models. It should first be remembered that the best model is not the one that obtains the maximum score on each of the axes (in purple at the top right of the figure). Such a model would be like a 1:1 map which, as Joan Robinson said, is very accurate but useless. The question is how relevant a model is for answering a specific question.

The historical bottom-up models of the energy system and their current derivatives are located in the **(T,0,C) plane**. What these models have in common is that they have a high degree of technological precision ($T=2$) and are in partial equilibrium ($M=0$), and therefore work with a given GDP and variations in demand coming from price elasticities alone. We can place in $(2,0,0)$ the intertemporal optimisation models (MARKAL-MESSAGE family), which minimise the total cost of technical systems over the long term. Moving toward realism in the description of behaviour, $(2,0,1)$ contains the 'bottom-up' recursive simulation models (IMAGE-GCAM family). Being of descriptive nature, these models consider that the actors minimise costs, but with imperfect/myopic information and readjust their choices as time goes by. They can incorporate imperfections of the energy markets, but the growth paths on which they are 'hooked' are exogenous and derived from simple macroeconomic models tracing balanced trajectories.

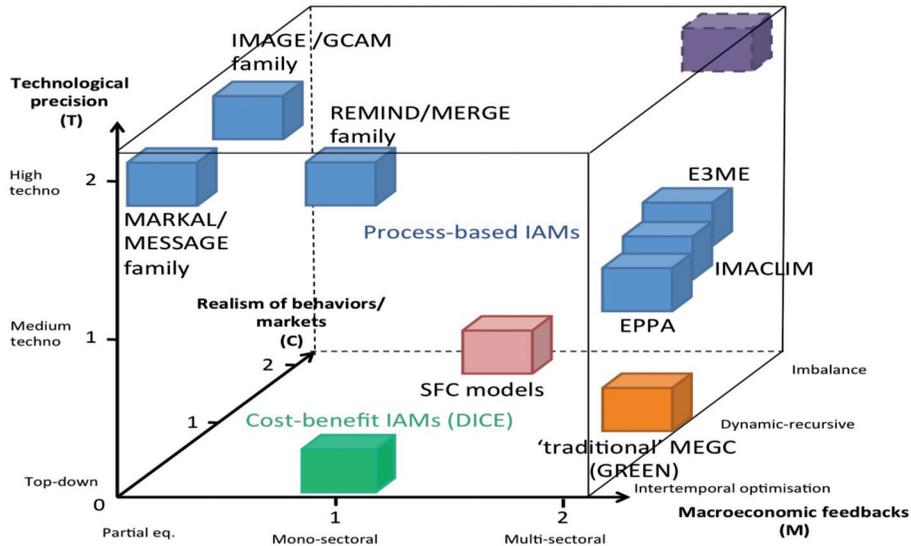
In the **(0,M,C) plane**, we first place, in $(0,1,0)$, the highly stylised models (DICE (Nordhaus) for cost-benefit analysis and Response (CIRED) for cost-effectiveness analysis), which have a mainly heuristic function in guiding 'normative' discussion on the timing of emissions reduction paths. They are of little value for carbon finance given their very low granularity.

Staying with models without explicit technologies, but adding economic realism, $(0,2,1)$ contains the initial 'top-down' macroeconomic models, the archetype of which is the traditional computable general equilibrium model (CGE model) (e.g. the OECD's GREEN), which incorporates a multisectoral ($M=2$) and often recursive dynamic ($C=1$) representation of the economy.

In $(0,1,2)$ we find the recently developed stock-flow consistent models (SFC) (e.g. AFD's GEMMES) with a compact macro model ($M=1$) and a highly aggregated representation of energy systems ($T=0$), but with more realistic behaviour because of the dynamics of the financial markets, which allows imbalances to be simulated.

Then, leaving the edges of the cube, we find the hybridisation efforts undertaken to better capture the feedbacks between technical and economic systems. A first approach in $(2,1,0)$ involves coupling an energy system optimisation model with an optimal growth model (REMIND-MERGE family), which represents an economy with a single 'composite good' and an energy factor whose evolution is described by an energy module that can reach fine levels of granularity, but whose cost structure has no bearing on the production of the single good. This practice allows long-term energy-growth feedbacks to be captured, but not the sectoral impacts of climate policies, and relies, for both energy and macroeconomics, on assumptions of perfect anticipation.

Figure 1: Taxonomy of energy/climate models in terms of three axes of characteristics



The second approach involves introducing elements of technological realism into the multi-sector macro models. This provides more economic and behavioural realism than the previous approach, but at the cost of lower technological granularity (region $(T > 1, M = 2, C > 1)$). For example, the EPPA and PACE models explain the technologies via their cost structures within standard production functions by substituting, for the energy sectors (in particular the electricity sector), input intensities resulting from the aggregation of discrete technology baskets constructed from engineering data.

The solution adopted by the IMACLIM model is that of a systematic linkage to bottom-up representations,²⁸ via equilibria in both value and physical flows, after making energy balances consistent with national accounting data, together with the explicit representation of certain demand items in physical quantities (passenger-kilometres, tonne-kilometres, surface areas occupied, production of heavy industries or foodstuffs (Le Treut, 2017)). The choices are guided by a trade-off, depending on the question posed, between theoretical rigour, data quality and control over the results. IMACLIM appears in the cube in $(T > 1, M = 2, C > 1)$ because it too links a long-term macroeconomy to a short- and medium-term macroeconomy, of a rather Keynesian type. Also appearing in the same group is the E3ME model with explicit technical modules and a multisectoral short-term macroeconomy driven by demand, with price rigidity. These two models take into account short-term imbalances, with less sophistication in the short-term to long-term transition than in the GEMMES-type SFC models, but offer a better description of intersectoral mechanisms and their technological underpinnings.

It is important for what follows to bear in mind that the technical differences represented in this taxonomy are due to trade-offs made by the modellers, depending on theoretical and methodological preferences (greater or lesser confidence in the capacity to balance markets or to represent markets in disequilibrium, and viewing technical change either as an exogenous process or linked to endogenous learning processes), but also to the nature of the questions

they need to address. Sectoral optimisation models are essentially normative, while equilibrium pathway models can describe plausible long-term forecasts, but contain less information on the conditions for triggering a transition from an economy in disequilibrium. Highly aggregated models are very useful as a heuristic tool, whereas multi-sector models are needed to capture the short- and medium-term consequences of government decisions.

1.3. IAMs at a bifurcation point

The fact that the early adopters of IAMs have left their mark in the current state of the art stems from an understandable path dependency. Firstly, there is the desire to pursue questions around established issues and to perfect the tools, at the risk of being carried away by the process of refining the model and thus losing relevance. Secondly, there is an economic constraint. Any rather complex data-intensive modelling tool represents a capital of accumulated skills and techniques, and reinvesting, if not in a new paradigm, at least in major structural transformations, entails risks.

Such risk-taking has been tempered by the way in which ‘social demand’ is expressed through expertise or research contracts. Responding within a limited timeframe to questions characterised by media and political cycles, it is always more effective to mobilise energy models that are tied to ‘regular’ growth scenarios. This tendency was reinforced when, in response to demands from governments, international organisations, the European Union and the most influential NGOs, the targeted limit for warming over the century **to be adhered to in all exercises was set at 2°C (and then 1.5°C). This had several consequences for the evolution of models.**

- ***The difference between optimisation models and simulation models tends to become blurred.*** By ‘enforcing’ a temperature target, the outcomes will be little different between a benevolent planner who posts a target that agents spontaneously internalise into perfect expectations by discipline or conviction, and one who constantly readjusts the ‘signals’ to which ‘more short-sighted’ agents respond in order to make them reach the target. For this reason, the Summary for Policymakers of the IPCC Fourth Assessment Report (2007) stated: “Most models use a global **least cost approach** to mitigation portfolios and with universal emissions trading, **assuming transparent markets, no transaction cost**, and thus **perfect implementation** of mitigation measures throughout the 21st century”, to which we could add “with benevolence for international transfers to equalize the marginal welfare losses”.
- ***The models focus less on damage assessment,*** as there is no longer a need to consider cost-benefit analysis of action on a global scale. Work on damage is of course still conducted at the scale of a particular region or topic (crop relocation, rising sea levels, water supply) to highlight the need for adaptation, but little effort is made to situate the work in a framework where ecological, economic and social interdependencies are represented in a coherent manner. Constraints that may exist at the local scale (water for cooling power plants, pressures on biomass, ‘hot spots’) do not appear to be decisive at the global scale for 1.5°C and 2°C scenarios, whereas this would not be the case with 4°C scenarios. The models are therefore expected to focus more on technological responses, and their integrated character ends at the links between emissions, the carbon cycle and temperature increases.
- ***Less attention is paid to the short term*** as ‘social demand’ focuses on the end of the century and transition points to 2050, with ***the implicit assumption that starting the***

transition presents no major problems. A good indicator of this is the limited coverage in the fifth IPCC report of short-term issues such as impacts on employment or foreign trade (3) and the greater length of the chapter on long-term scenarios (68), whereas in previous IPCC reports there was an emphasis on the short/medium term. This shift has hampered attempts to frame IAMs within a more comprehensive macroeconomy in order to describe the impacts on short-term growth, investment choices in an uncertain world and financing issues in a context of strong pressure on public budgets.

- *Methodological progress has been made mainly on carbon sequestration* as a real adjustment variable for attaining the objective of carbon neutrality. This has led to greater consideration of negative emissions options and biomass in the carbon cycle.

IAMs are now at a turning point, partly because recent scenarios have been interpreted not as heuristic exercises but as feasible scenarios, as if the problem of implementation had been resolved. However, given the growing gap between the stated intended objectives of reducing emissions and the reality of action, we are seeing the emergence of legitimate questions that have been 'under-addressed' in recent years (such as financing, investment decisions apart from the energy sector, inequality of various kinds, and the interactions between energy, urban dynamics, land use and industrial dynamics). This diagnosis has led the sixth IPCC report to include a new chapter on the transition phase.

II. From the limitations of the state of the art of IAMs to framing errors

Faced with the gap between what the integrated models provide and the expectations of economic actors, it is tempting to dispense with them and instead adopt the work of well-established international institutions such as the International Energy Agency or more easily accessible approaches such as the McKinsey studies, or to use IAMs on the periphery of more familiar economic models, as the Banque de France did in its recent stress test exercise (see section III.2 below). One of the risks is then neglecting the lessons of decades of experience and drawing on fragmented knowledge (from engineering, ecology, economics) without ensuring that it is consistent. This can result in framing errors, which we describe briefly below.

2.1. Misunderstandings about IAMs and the concept of damage

Confusion about the ability of the IAMs to incorporate damage is due to misunderstandings about the concept of climate damage itself and, in part, to the renown of Nordhaus. His DICE model suggests that it is possible to monetise damage, which he represents in a very stylised way, without describing the chain of effects from warming to physical impacts to economic and social damage. This is why its results have not been included in any of the

IPCC's policy summaries or technical reports. The same is true of Richard Tol's FUND model, which provides monetary estimates of climate damage and concludes that these will be minimal over the course of the century. On the other hand, even though he did not play a role in the IPCC reports, Nordhaus crystallised converging attacks on IAMs from currents critical of the neoclassical approach or from figures such as Pyndick (2013), who describes them as "close to useless as tools for policy analysis [...] they create a perception of knowledge and precision that is illusory, and can fool policy-makers into thinking that the forecasts the models generate have some kind of scientific legitimacy."

However, IAMs with a strong empirical content, which were used very early on in cost-effectiveness approaches for studying the consequences of policies aimed at a specific climate objective expressed in terms of concentration levels (parts per million, ppm), average temperature increases (2°C, 1.5°C) or net emissions over time (carbon neutrality by 2050), deliberately avoided expressing damage in monetary terms. One reason for this is that the smaller the spatial scale, the larger the ranges of uncertainty, especially for rainfall, whereas it is local climates that are relevant for impact analysis. Another reason is that there is no simple link between physical impacts and economic impacts. Hurricane Katrina would not have been a disaster if the governor of Louisiana had not delayed the planned maintenance and reinforcement of levees and storm drains. The extent of the damage can differ by orders of magnitude between a society fully able to react to warnings and to adapt and one that is economically and politically fragile.

This explains why IPCC Group II has so far refrained from giving a monetary assessment of damage and why the international community has committed to temperature targets as a precautionary measure (Ambrosi *et al.*, 2003). This point should be kept in mind, given the widespread adoption in financial circles, following Mark Carney's influential 'tragedy of the horizons' speech, of the concept of 'physical risks' as encompassing damage, although not all damage translates into financial risk. If a valley is increasingly affected by recurrent storms or waterfront homes are threatened by rising sea levels, these phenomena occur slowly enough for insurers to disengage. However, the TCFD guidelines and the Litterman report (CTFC, 2020) advocate measuring physical risks as if it were possible to derive an indication of financial risks directly from climate change.

In fact, the primary use of IAMs is to identify transition risks (low-carbon investment risks, 'stranded assets') that are more immediate and more tangible than those arising from climate damage for economic actors, and to detect, using various indicators, the degree of exposure of assets to physical risks. It is then possible to analyse the risks relevant for financial analysis, without forgetting, as a risk factor, the uncertainties inherent in the political and regulatory response to public opinion regarding a given climate event. Indeed, it is through the media-political cycles that climate damage is likely to have the greatest short-term financial impact.

2.2. The risks of energy-centrism

Due to their origin, ***IAMs are rich in information on the energy sector***, with a fairly high level of disaggregation, especially for electricity supply and the contributions of each technical option and their investment needs. On the demand side, the representation of energy efficiency depends on the level of disaggregation of the user sectors.

In contrast, IAMs are for the most part very limited in their representation of non-energy sectors. However, the transport and housing sectors alone, which are so decisive for the low-carbon transition, account for three times the investment in the energy sector. And to

the sum of investment in these three sectors, another 20% should be added for financing the adaptation of industrial processes.²⁹ This last fact is not widely known, because although the tables presented in the reports very often include columns for “transport”, “housing” and “industry”, the figures displayed only concern investments in energy efficiency. Hybrid multi-sector models capture the impacts of sectoral interdependencies on price formation, competitiveness and production levels – which is certainly important – but not the specific economic dynamics of these sectors. As a result, misdiagnoses may occur.³⁰

Thus transport is subject to the dynamics of mobility and land use, which are themselves determined by land and property prices and by government policy regarding urban infrastructure and land use planning, at least as much as by fuel prices (Lampin *et al.*, 2013). Agriculture and agroforestry, which are crucial for the allocation of land uses between food production, bioenergy and carbon sequestration, are more sensitive to land prices and rules of ownership and inheritance than to the price of energy inputs. It is for this reason that the amount of bioenergy used in 1.5°C scenarios is often considered unrealistic by specialists in agricultural and forestry economics. In addition, certain industrial sectors not related to the production of primary energy are a ‘blind spot’, in which the transformation of value chains under carbon constraints operates (process changes in the cement or steel industries, the role of 3D printing, artificial intelligence). This does not mean that there is no data on these sectors, but it is fragmented and rarely consolidated.

2.3. Representation of technical choices and the challenge of uncertainty

In comparison with evaluations that make the abatement potential of a technique an intrinsic characteristic of that technique, IAMs have the advantage of studying its costs and performance as a function of its insertion in coherent technico-economic systems. Increased energy efficiency or a higher proportion of electric vehicles will, depending on the carbon content of the upstream energy mix, not necessarily reduce the level of emissions, and their cost will vary according to the prevailing price system.

The problem with interpreting IAM results is that they forecast the ‘market shares’ of the various technologies by taking the discounted sum of annual payments, covering their operational cost, debt repayment (principal and interest) and self-financing to renew the equipment, as the cost of each option. This is comparable to representing a situation where the technologies are like fruit on a market stall, with their average annual cost over their lifetime displayed on the label. If there is a shortage of apples, their price increases and customers switch to pears. If the discounted cost of a carbon-free technology is €10 higher than that of a carbon-emitting technology, it will be adopted if a carbon tax increases the price of the carbon-emitting technology by €11. This is a very simple formulation, but in reality it is not so easy to switch from one technology to another. Technologies are embedded in projects whose owners are sensitive to the risks associated with investing in the project preparation and equipment construction phases, in a context of uncertainty about the costs and performance of the technologies. Low-carbon options are often more capital intensive and any slippage in the costs and time taken to build the equipment exposes them to a greater risk of losing credibility in the eyes of shareholders or banks in the event of a request for additional loans.

The information provided by integrated models is therefore crucial, but it comes from scenarios that do not include uncertainty and considerable interpretation work is required before they can provide relevant information for short-term decisions.

2.4. Macroeconomic framing issues, short-term and long-term tensions

First of all, it is important to reject the idea that IAMs cannot represent a loss of growth in the event of a drastic reduction in emissions. This is a fallacy, even in the strict neoclassical paradigm, as shown by the very simple model developed by Hogan and Manne (Box 1). There is therefore no obstacle in principle to describing negative growth scenarios. But because it would be politically impossible to initiate a transition if it results in lower growth and greater poverty,³¹ a great deal of effort has been devoted to finding ways of producing a 'double dividend', both environmental (lower emissions) and economic (more activity).

Box 1: Energy-economy interactions: the Hogan and Manne model (1977)

The first models applied to extend Solow's production function to the 'energy' input were those of Hudson and Jorgenson (1974) and Berndt and Wood (1975). Then in 1977, Hogan and Manne showed that such an extension implies that the costs of controlling energy consumption are determined by the share of energy in production costs. They described total production Y as a function with a constant elasticity of substitution (CES) combining energy E with an aggregate of all other inputs R :

$$Y = (aR^\rho + bE^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (1)$$

With ρ an exogenous parameter linked to the elasticity of substitution σ , and a and b parameters calibrated on data from the Input-Output Table (IOT) of the national accounts. The calibration of a and b is based on the interpretation of the IOT data as resulting either from the minimisation of the costs of a given volume of production, under the constraint of input prices p_R and p_E , or from the maximisation of output for a given total cost. The first-order conditions of either optimisation programme allow b to be written as a function of the calibration values:

$$b = \left(\frac{Y}{E}\right)^\rho \frac{p_E E}{p_R R + p_E E} \quad (2)$$

Equation (1) gives the partial derivative of Y as a function of E :

$$\frac{\partial Y}{\partial E} = b \left(\frac{Y}{E}\right)^{1-\rho} \quad (3)$$

Inserting (2) into (3) and re-arranging, we obtain:

$$\frac{\partial Y}{\partial E} \frac{E}{Y} = \frac{p_E E}{p_R R + p_E E} \quad (4)$$

This means that the elasticity of Y with respect to E , i.e. the marginal cost of a decrease in energy consumed, is equal to the share of E in production costs.

Admittedly, the few percentage points that this share represents prompted Hogan and Manne to use the metaphor of 'rabbit and elephant stew': energy expenditure is too small to change the flavour of the stew, i.e. for energy to have a significant impact on economic growth. But this is no longer true in the case of a large, non-'marginal' shock. In the framework of IAMs with macroeconomic production functions, economic activity is therefore necessarily reduced by any policy to control energy demands.

A distinction must be made here between the long and short term. In the long term, easing the constraint that the 2°C objective places on the economy requires innovation and structural changes (consumption patterns, productivity gains in the various sectors of activity). These are not independent of parameters such as the price volatility of fossil fuels (which slows down the learning effects), the crowding-out or knock-on effects of low-carbon investments on general productivity and the impact of energy prices on consumption. But these effects unfold slowly and are of secondary importance for financial decision-makers.

In the short term, however, macro-economic parameters can have a major effect. While there will necessarily be losses in GDP if the factors of production are optimally employed (devoting a proportion of them to reducing emissions will be to the detriment of other activities), this is not the case if the economy is in a sub-optimal situation and if climate policies are able to reduce the distortions burdening it. Thus, by incorporating the imperfections of the labour market and the distortions of the tax system, we show how a double employment dividend can result from recycling the proceeds of a carbon tax to reduce distorting taxes. The same applies to 'economic recovery'. Moreover, since the subprime crisis and even more so in the post-COVID-19 period, economic discussion has focused on the role of the gap between the 'propensity to save' and the 'propensity to invest' (Summers, 2015) in the instability of financial cycles (Borio, 2018), the investment gap (IMF, 2014) and the weakness of growth. Most IAMs do not take economic imbalances into account, thereby weakening their ability to analyse the forms that the implementation of the transition should take in order to address and not aggravate the 'fault lines' (Raghuram Rajan) of the modern economy.

The unfinished engagement of the IAM community with short-term macroeconomic models needs to be resumed. Imposing a carbon constraint on an imbalanced economy marked by technical and institutional inertia (Waisman, 2012) results in larger losses in GDP than in models with instantaneous adjustment of prices, factor weights in the productive system and consumption, that bring the economy back to equilibrium. On the other hand, if tax reforms based on a carbon tax are combined with a redirection of savings towards low-carbon infrastructure by reducing the risk coefficient of investment in such infrastructure, economic stimulus effects can be obtained.

Climate policies can therefore either have a depressive impact on the economy or be a stimulus lever, depending on the economic policies into which they are inserted. **The simplicity of the results of models with no macroeconomic loop is therefore misleading.** In addition to uncertainties about the general level of activity (which has a greater impact on new options in a technological space occupied by mature technologies), there is also the interplay of financing constraints and the relative price of energy. These depend on the extent to which the hydrocarbon-producing countries (OPEC, Russia) can adapt their strategies to maximise long-term income, subject to immediate budgetary balances and geopolitical considerations.

Global hybrid multi-sector models incorporate some of these feedbacks in varying degrees of sophistication, but they need to be used 'in variations' to test the sensitivity of their 'predictions' of technical options to interdependencies of all kinds.

III. The proper use of IAM scenarios for the financial sector

Mark Carney's "Tragedy of the Horizons" warning signalled an awareness of the importance of climate risks for the stability of the financial system, the challenges of financing the ecological transition and the pressure to 'divest' from emission-intensive activities. Following the launch in 2016 of the Task Force on Climate-Related Financial Disclosures by the G20 Finance Group within the Financial Stability Board (FSB), the One Planet Summit in 2017 created the Network for Greening the Financial System (NGFS), involving central banks and financial regulatory institutions. The United States is also playing a part in this dynamic with the report by Bob Litterman for the Commodity Futures Trading Commission (CFTC, 2020). The challenge is how to make the best use of current IAMs in such a context, given the limitations mentioned above.

3.1. What information is needed for specific uses? Impact assessment, portfolio alignment and stress tests

The financial sector needs to address three issues: assessing the environmental impact of investment portfolios; aligning them with the Paris Agreement; and assessing the risks that climate change poses for their performance.

The static measurement of the environmental impact of businesses is based on their carbon footprint, green share (or brown share), and more specific environmental performance indicators, such as consumption of water or natural resources. For financial decisions that seek to limit risks, this indicator is inadequate, since it leads to the exclusion of companies that have emitted a lot of CO₂ in the past, but whose activities are necessary for the transition. The challenge is therefore to penalise companies that are on a bad trajectory and to support those that make the effort to change it.

Evaluating a portfolio's alignment with the Paris Agreement entails measuring the portfolio's compatibility with a global emissions trajectory limiting the global average temperature rise compared to pre-industrial levels to 'well below 2°C'. It requires defining indicators to assess the gap between the climate performance of portfolios and that of a scenario compatible with, for example, a carbon neutrality objective at a given date.

The assessment of financial climate risk for financial institutions can be broken down into transition risk and physical risk. **Transition risk** refers to the impact of the low-carbon transition on an economic activity or the value of an asset. **Physical risk** refers to the direct impacts of the natural environment, climate and climate change on physical assets and the supply chains necessary for them to function properly.

Given the difficulty of accessing IAMs, most financial actors have made pragmatic choices. Portfolio alignment analyses (ILB, 2020) are often based on scenarios drawn from the International Energy Agency's Energy Transition Pathways (ETP) or World Energy Outlook (WEO), which have a good level of sectoral and geographical coverage. These scenarios are produced using a variant of the TIMES model, which reveals, at constant GDP, an optimal

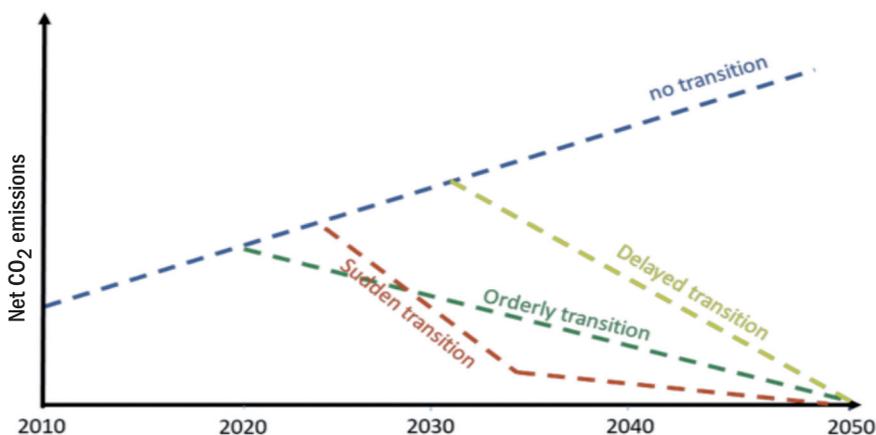
'energy mix' trajectory under carbon constraints. Most transition risk assessments are based on stress tests, conducted using variables such as the price of CO₂, either arbitrarily prescribed as in Vermeulen *et al.* (2019) with a scenario of a \$100 increase in the price of CO₂, or derived from integrated models, as in the case of the NGFS scenarios.³²

To better understand the nature of the dialogue to be established with IAMs, we analyse below the stress test exercise launched in the second half of 2020 by the Banque de France and the ACPR.

3.2. Lessons from the ACPR / Banque de France modelling architecture

The aim of this ground-breaking exercise is to measure the climate risks to which French financial institutions (banks and insurance companies) will be exposed up to 2050, and to identify the methodological difficulties of the exercise. As participation in this exercise is voluntary, it will have no implications for regulatory capital. It is based on three NGFS scenarios (Figure 2): a baseline 'orderly transition', a 'sudden transition' and a 'delayed transition'.

Figure 2: CO₂ emissions in the scenarios of the ACPR stress test exercise.



Source : Allen *et al.* (2020)

3.2.1. An architecture that mobilises several modelling tools

- Upstream, two IAMs behind the NGFS scenarios provide GDP and carbon price trajectories that encapsulate the climate policy 'shock'.
- In the middle, the NiGEM model forecasts a dozen variables (GDP, inflation rate, unemployment etc.) for several dozen individual economies and regions; and a static multi-sector model, disaggregated into 55 activity sectors, describes the economies of France, the remaining EU and the UK combined, the US, and the rest of the world.

- Downstream, a financial block includes the Banque de France rating model (default probabilities at finer scales than 55 sectors), a model for estimating the consequences of carbon prices on market values, and an interest rate spread model.

We will not discuss the financial component here, but will focus on how the combination of economic models and IAMs provides information.

NiGEM is a neo-Keynesian macro-econometric model allowing for underemployment. It is located at (M2, C3, 0) in the cube presented earlier: highly aggregated, actors with imperfect expectations, and on-going adjustment tending to full employment in the long run. GDP results from the combination of labour, capital and energy. Labour endowment and productivity gains, which are exogenous, are adjusted, in two of the three scenarios, to reproduce the GDP projection of the NGFS scenarios. Capital endowment results from the accumulation of investment, and all investment induces a stimulus effect in the economy. The energy factor includes the three fossil fuels and a renewable energy aggregate (Allen *et al.*, 2020). The model's documentation does not provide information on how, within this aggregate, substitutions between fossil fuels and between fossil fuels and renewables or nuclear energy are managed.

The trade-off between factors in the production function is first between capital and labour with a CES function, and then between the aggregate of capital and labour (value added) and energy with a Cobb-Douglas function. This function has an elasticity of substitution equal to 1, implying that energy expenditure has a fixed ratio to GDP. At constant GDP, a 20% increase in energy prices leads to a 20% decrease in energy consumption. This assumption, which is convenient for back-of-the-envelope calculations, is not accepted by the literature, which concludes instead that elasticities of substitution are lower than 1. The price of capital (interest rate) adjusts according to inflation and the gap between real and 'notional' output. Similarly, wages evolve according to the unemployment rate and price indices, but without instantaneous adjustment of the labour supply by lowering wages, hence 'equilibrium unemployment'.

The multi-sector model is based on a global input-output matrix, which represents the output and bilateral trade of 55 sectors (including two transformed energies, see Box 2) in four economic clusters as resulting from the combination of domestic labour and imported goods and services. Capital is not represented (profits are simply a share of value added). CES functions regulate the trade-offs between energy goods (with the same substitution rates whether domestic or imported), between non-energy inputs (equal treatment of domestic and imported goods), and between domestic value added, aggregate energy inputs and aggregate non-energy inputs. The Banque de France/ACPR exercise therefore sidesteps the efforts of IAMs to integrate heterogeneous data into a coherent framework (Box 3).

Box 2: National accounting, energy accounting and data hybridization

The sectoral disaggregation provided by the WIOD database, which feeds the multi-sector model of the Banque de France/ACPR exercise, is based on international national accounting nomenclatures that are ill-suited to energy forecasting work: oil, gas and coal extraction are aggregated with all other mining activities; oil processing and coking are aggregated into a single sector; electricity production and distribution and gas distribution are also aggregated into a single sector, which includes water distribution as well. Consumption and international trade of energy are thus modelled through these three 'products' aggregating very heterogeneous activities.

For these reasons, the multisectoral energy/economy forecasts works on 'hybrid' databases, with a finer disaggregation of the national accounts and consistency with data on energy expenditure (monetary flows) and consumption (physical flows). One of the most widely used databases is the GTAP database,³³ which distinguishes six energy commodities: oil, gas and coal extraction, refining and coking, electricity production and distribution, and natural gas distribution. National exercises have finer granularities extended to energy-intensive goods such as cement and steel (Le Treut and Ghersi, 2018). Without hybridisation of databases, there is a risk of unrealistic scenarios from an engineering standpoint (see Box 3).

Final consumption is modelled by a vector specific to each of the economic groups, which aggregates household and government consumption, fixed assets and the net trade balance. Budgetary equilibrium assumes the equality of aggregate consumption and value added for each of the economic groups. The breakdown of aggregate final consumption between the production of the four regional origins is done via constant substitution elasticities without distinction by product origin. The model is run in the same way at each forecast date, with the only changes being the level of the carbon tax and total factor productivity. Unlike the option chosen for NiGEM, the labour markets of each economic grouping are balanced by free adjustment of wages.

The two IAMs used upstream of the system to provide NiGEM and the multi-sector model with the carbon price and GDP are very different. GCAM, from the Pacific Northwest National Laboratory (USA), is a simulation model with imperfect expectations and partial equilibrium, i.e. exogenous GDP assumptions and without feedback of carbon constraints on GDP. REMIND, from the Potsdam Institut für Klimaforschung (Germany), is a general equilibrium model in which GDPs, although strongly determined by exogenous assumptions of productivity gains, are calculated endogenously by intertemporal optimisation with perfect expectations.

3.2.2. Questions of consistency between NiGEM, the multisector model and IAMs

There are three levels of consistency between the models used: macro variables, carbon prices and the reaction of economies to this price.

At the first level, consistency is achieved only on aggregate GDP. NiGEM and the multi-sector model adjust their productivity gains to reproduce the GDP trajectories of the IAMs underlying the NGFS scenarios, trajectories which are themselves anchored on the IPCC

SSP (shared socio-economic pathways) scenarios. This is a rather low level of consistency **since many other economic variables are set in motion by a carbon price and need to be harmonised**. However, the models do not refer to the same universe. NiGEM is a Keynesian model with equilibrium unemployment, the multisectoral model is a static full-employment model, REMIND is a general equilibrium model of intertemporal optimisation and GCAM is a model with constant GDP. **The four models also differ in their representation of energy and its linkages with other sectors**. Finally, the static model does not consider any constraint on foreign trade since the four economic groups can satisfy their final consumption by using equally substitutable production of any origin, regardless of whether it is domestic or imported.³⁴

At the second level, the carbon price trajectories depend on the model used, and the exercise runs into a problem of consistency between the ‘narrative’ of the scenarios and the model in question. For example, the ‘sudden transition’ scenario is assigned to the REMIND model, which mimics the action of a far-sighted global planner. This model tends to produce a flat price trajectory at the start, which grows exponentially to very high levels over the time frame of the forecast. There is no need for high prices in the short term if investors are already considering prices in 2050 and beyond. Such a model therefore underestimates the shocks actually experienced by less far-sighted agents. In addition, the way in which carbon prices affect the breakdown of activity between sectors in the multi-sector model is questionable. This model aggregates pre-existing taxes into a ‘production tax’ based on value added, whereas the interactions of carbon taxes with taxes on labour, profits, and consumption of goods and services (VAT) are decisive for understanding the importance of the way in which the revenue from a carbon price is reused.

At the third level, the issue is the heterogeneity of the treatment of trade-offs within energy and between energy and other goods. In the NiGEM model and the static multi-sector model, the substitution functions used (CES, Cobb-Douglas) do not capitalise on the efforts of ‘hybrid’ models to bring together the representations of engineers and economists (Box 3). The static multi-sector model offers an unusual trade-off architecture. On the production side, only two energy inputs are distinguished (electricity and gas on the one hand, petroleum products on the other), and cover only final energy consumption, while primary fossil energies are aggregated to extractive industries. Moreover, domestic inputs, placed on the same level as imported inputs, are substituted for other factors with the same elasticity.³⁴ The limitations of such a framework are obvious. Trade-offs with constant elasticities and without integration of fixed capital within an aggregated electricity/gas sector cannot be expected to reflect the issues at stake for the electricity mix in a high decarbonisation scenario where gas is particularly important. Similarly, the trade-offs treat all consumption in the same way, including the two transformed energies, regardless of where they are produced.

3.3. Implications: biased risk mapping

The question is whether the limitations we have noted lead to inaccuracies that are ultimately of little importance or whether they may lead to significant diagnostic errors.

Box 3: Hybrid energy/economy modelling

In models regulating factor substitutabilities by aggregate production functions (see Box 1), any change in energy prices, at any point in time, shifts the input combinations along an isoquant (constant production). While acceptable for minor changes, these specifications are unsuited to the major trajectory inflections required by ambitious climate objectives, in particular over short and medium-term time frames where the inertia of the technological systems underlying energy supply and demand (understood in the broadest sense, up to urban planning) plays an important role.

The first consequence of this criticism, which was anticipated at the end of the 1990s (Böhringer, 1998), is the need to operate within a framework of induced technical change in which the 'path dependence' of the possibility of substituting factors of production or consumption goods in the household budget (isoquants of levels of production or well-being) is represented. The second consequence is the need to integrate into an economic model the expertise of engineers concerning the evolution of energy supply techniques and the conversion of this energy into services (heat, light, mobility, information and communication). This has led to the rise of 'hybrid' models (Hourcade *et al.*, 2006).

There are five points in favour of the second hypothesis: i) same elasticity of substitution between the aggregate 'products of the coking and refining industries' and the aggregate 'electricity/network gas', whatever their origin; ii) difficulty in controlling the consequences of the substitution of gas for coal, the penetration of renewable energies, 4th generation nuclear power and the development of smart grids; iii) no consideration of the link between public policies and intersectoral propagation of tax-induced increases in production costs; iv) price trajectories difficult to link to a plausible policy scenario and too low in the case of the REMIND trajectory; v) lack of control of the behaviour of energy intensive sectors exposed to international competition.

The final limitation is more structural, and concerns ***the failure to take into account the knock-on effects of heavy investment on the activity of certain sectors***, if not the whole economy (Box 4). For example, investments in energy supply, transport or energy efficiency will increase demand for construction materials and metals over a period of twenty years.³⁵ These sectors will see their markets and margins increase, even though deemed to be losers due to their high carbon intensity, in the Banque de France/ACPR exercise where only relative prices determine the allocation of final demand. This is an important diagnostic mistake, since it will mean that the basic sectors of the ecological transition will be deprived of financing.

Box 4: Modelling transition investments and their capital costs

The investment demand induced by energy transitions comes from energy producers (wind turbines, solar panels, dams, nuclear installations, transport and distribution networks), energy consumers (production processes, machine tools, vehicles, household appliances, heating) and the building and transport infrastructures. The Input-Output Table (IOT), which organises economic flow data, represents this demand on the side of the sectors' production costs (capital depreciation in value added), and on the side of the demand for capital goods, via a Gross Fixed Capital Formation (GFCF) vector aggregating the sales of all equipment with the exception of small appliances and private vehicles, which are recorded in current consumption.

The explicit representation of capital depreciation is essential for relevant modelling of the possibilities of substitution between capital and fossil fuels in production (see Box 3) and of their effects on costs. The GFCF model is essential for taking into account the spillover effects of any technical change. These spillover effects, which are sensitive to the outcomes of structural change (variation in the shares of different sectors in final demand), are captured all the more accurately as the GFCF vector is disaggregated into a matrix capturing the heterogeneity of equipment in the various sectors. In Keynesian models, where the investment demand specific to the transition does not limit the capital available for production activities (no 'crowding out'), the effects of the investment stimulus are combined with the structural change induced.

3.4. Scenarios, risk analysis and portfolio alignment strategies

The ACPR/BdF exercise shows that there is currently no single tool that meets the expectations of the financial sector. The challenge is therefore to find out how to make the best use of the existing state of the art and to launch a collective learning process.

The starting point has to be the purpose of the scenarios. It would be simple if all we had to do to get an idea of the carbon impact of a portfolio was to label the carbon content of the various technologies and then aggregate them. But the carbon balance and economic cost of technologies depend on their interactions, which are subject to physical, economic and organisational constraints. The role of models is to represent these interactions through scenarios that bring together available information and conjectures on innovation potential and future economic dynamics. Thus, two scenarios reflecting opposing views of the potential of renewable energy give an idea of the extent of the uncertainties, provided of course that the models give a coherent picture of the energy system – for example, by excluding a 'renewable energy' scenario with a low oil price and high interest rates. So as not to get overwhelmed by the information available, the **first step** in the proper use of scenarios is to clearly distinguish their various types.

- **Heuristic scenarios** that explore the technical and economic coherence of contrasting trajectories from a technical (all-solar scenario), political (total cooperation between countries) or geopolitical (strategies of hydrocarbon producers) standpoint. While legitimate as analytical tools, they have no predictive value, but they can pinpoint extreme scenarios.

- **Scenarios under normative constraint** where a ‘benevolent planner’ guides agents’ choices towards a predetermined objective (carbon neutrality by 2050). They are the natural anchor for analyses of alignment with a mobilising objective.
- **Scenarios of plausible futures** built on assumptions held to be realistic, with constraints on the acceptability of the ‘planner’s’ recommendations and the strategic autonomy of certain major players (USA, China, OPEC).

The second step is to clarify useful information – which is different for convergence analyses and for stress tests – and to identify the information that the scenarios hold, but which is not communicated in publications because it is of little relevance for the topics addressed (an article on bioenergy will not go into detail on solar electricity). A **downscaling methodology** in the description of sectors and industries also needs to be established. For example, a scenario giving the sensitivity to oil prices and GDP growth of the demands of a ‘generic renewable energy’ can inform sensitivity tests on the wind, solar or biomass markets using simple ‘tree’ disaggregation rules of the generic technology. Similarly, one could move from the production level of a ‘heavy industry’ sector to a finer analysis of sectors such as cement, steel or basic chemicals.

The third step is using scenarios to ‘reveal’ the degree of uncertainty, the key information needed by the finance sector. Every scenario is ‘deterministic’ and only a set of scenarios can capture uncertainty and make its sources explicit. For portfolio alignment analysis, a review of the methods used by data providers is presented in *The Alignment Cookbook - A Technical Review of Methodologies Assessing a Portfolio’s Alignment with Low-carbon Trajectories or Temperature Goal* (ILB, 2020, in collaboration with I4CE). The uncertainty addressed in these analyses is that, even if all 2°C scenarios concur on the exclusion of coal use not offset by carbon capture and on a large reduction in oil, they can vary significantly in the timing of these changes, and in the roles played variously by renewables, nuclear energy and carbon capture. Either two or four well-controlled scenarios may then be sufficient to define ‘corridors’ for each type of technology.³⁶

For stress tests, on the other hand, it is necessary to take a broader set of scenarios to get a probability distribution of market shares of technical options and profitability of economic sectors. This can be done by drawing on scenario databases, or by using one or two well-tested models to simulate a broad combination of plausible assumptions. These scenarios could include shocks involving an abrupt transition from one scenario to another (Roncoroni, 2019). A risk calculation taking account of stranded assets and a description of the readjustment of agents’ expectations is then possible (cf. the dynamic balance sheet in the Banque de France/ACPR exercise). Such a calculation needs to be preceded by an informed judgement on the plausibility of the various combinations of assumptions behind the scenarios and an understanding of the source of the uncertainties – macroeconomics? oil prices? climate policies? technology? – and their evolution over time.

Conclusion: governance of the use of IAMs in finance

Financial actors can meet their needs **by using existing scenarios**. This seems to be the simplest choice for providing values that can be used in risk calculations or portfolio alignment. But the available scenarios are not ready-made and usable with only minor modifications. Before they can be deployed a number of issues need to be addressed, such as the choice of the sample of scenarios used, access to unpublished data and the right level of sectoral, spatial and temporal granularity. Given the complexity of the models, the ‘black box’ aspect of the scenarios cannot be overcome without an in-depth dialogue with the modellers, and therefore human and financial investment by both parties.

The development of an economic actor’s own modelling capacity has the advantage of allowing it to control the writing of scenarios, sensitivity tests and the mastery of basic data. The difficulty is that this requires the acquisition of skills in macroeconomics, sectoral economics (energy, transport, construction, materials, agriculture and forestry), engineering sciences and environmental sciences, which most financial institutions do not have at present. We have already seen the limitations of the state of the art. Operators can certainly hope to have the financial and human resources to overcome these limitations by standing on the shoulders of giants who have accumulated years of experience.³⁷ But the risk is that the production of a plurality of models and scenarios by economic players without the adversarial forums provided by the academic sphere will lead to controversies that are difficult to control when they are conducted in a context of ‘name and shame’.

Development of a partnership between research and the economic world. This option implies that economic and financial players invest in understanding the tools used and in the internal use of stabilised versions of the models, through an organised dialogue with the IAM development teams and specialists in the treatment of uncertainty. It would allow the “hood” to be opened and the writing of scenarios to be co-piloted, with a guarantee of transparency with regard to regulators and public opinion. It would also allow research teams to work freely to improve their modelling architectures and enrich their basic data, a cooperative dialogue leading to the gradual capitalisation of experience.

This dialogue could be organised within the framework of a consortium with the aim of (1) producing a library of ‘scenario results’ integrating, in a common format, the basic data and results, including those of sectoral scenarios ‘outside the integrated models’ and of national models, and (2) providing access to stabilised versions of the models. Economic actors could either have access to this form of ‘public good’ subject to a clearly defined protocol for the ‘good use’ of the data, or make agreements with the teams to use the stabilised versions of the models internally. Such a consortium would provide guarantees of scientific credibility, thus enabling economic players to participate in the accumulation of knowledge and to have the tools for dialogue with regulators and government, in particular for improving the relevance of the requests made to them on issues whose complexity and pitfalls are often underestimated.

NOTES

- ¹ This working group was set up by the Financial Stability Board in 2016.
- ² Recommendation c of the strategy pillar, TCFD final report (2017).
- ³ See for example “The European Union is likely to face severe constraints on oil supplies by 2030 - A prudential prospective analysis”, The Shift Project (2020).
- ⁴ A scenario is a set of descriptions of a future situation and the coherent evolution of events that lead to it from an original situation. A scenario usually consists of a narrative (the scenario story) and potentially quantitative data. This data can be determined exogenously in a manner consistent with the narrative (i.e. hypotheses) or endogenously from a quantitative model (i.e. results).
- ⁵ See “Advantages and disadvantages of scenario approaches for strategic foresight”, Mietzner et al, 2005.
- ⁶ See “Energy and climate scenarios - assessment and outlook”, Afep and The Shift Project (2019).
- ⁷ See the first activity report of the NGFS “A call for action: Climate change as a source of financial risk”, NGFS (April 2019).
- ⁸ Several studies have shown that the TCFD recommendation on scenarios is probably the least well applied in practice.
- ⁹ See Annex 3 of the TCFD final report (2017).
- ¹⁰ See the latest TCFD evaluation report (May 2019) “Such an approach [the use of standard scenarios] may reduce concerns about releasing confidential business information, reduce scenario analysis costs, and improve transparency and comparability of disclosures”.
- ¹¹ The analysis of trajectories compatible with 1.5°C warming is based exclusively on techno-economic IAMs. See “1.5°C Report, Supplementary Material 2. SM.1.2” IPCC (2018).
- ¹² A social welfare function aims to reflect the preferences of consumers. In the Ramsey model, the saving rate is endogenous and consumers choose the share of income they consume and the share of income they ‘bequeath’ to their descendants.
- ¹³ In general, the determination of a damage function faces several difficulties:
- The lack of empirical information on the cost of climate change impacts and the fact that it is difficult to extrapolate future costs (which law should be used?)
 - Damage affects non-market stocks and public goods that cannot be monetised (damage from deforestation far exceeds the loss of forestry activity).
 - Representation of the social and economic consequences of a potentially possible ‘catastrophic’ scenario, even if it is not the ‘most likely’ scenario.

- ¹⁴ See in particular “Greening the financial system: the new frontier” (2019), Financial Stability Review, Banque de France and “The economic consequences of climate change” (2016) Organisation for Economic Co-operation and Development.
- ¹⁵ Cost-benefit models are still widely used for climate policy assessment (Wing, 2007, 2011; Scricciu, 2007; Ackerman, 2014). Furthermore, many of the models used by the IPCC WG3 are based on an ECM or DSGE modelling approach (IPCC, 2014). As regards the wide variety of ‘techno-economic’ models, the impact of the ‘neoclassical’ paradigm is sometimes less strong, but not zero (e.g. use of discount rates or determination of a ‘value of carbon’).
- ¹⁶ See “Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review”, Hafner *et al.* (2020).
- ¹⁷ See in particular “Comparaison des modèles météorologiques, climatiques et économiques : quelles capacités, quelles limites, quels usages ?” Alain Grandjean and Gaël Giraud (2017) and “Emergence of New Economics Energy Transition Models: A Review”, Hafner *et al.* (2020).
- ¹⁸ See in particular “Energy and climate scenarios: assessment and instructions for use”, The Shift Project and Afep (2019).
- ¹⁹ The complexity of the problem forces the use of a minimal mathematical formalism to ensure the logical coherence of the exercise. This coherence is, however, not a proof of veracity, or even of plausibility.
- ²⁰ This approach is already being used in industry to model the behaviour of complex, non-linear industrial systems (including feedback loops), and in particular to ensure the conservation of matter and energy. The World3 Model (created for a study at the Club of Rome and published in “The Limits to Growth”) is, for example, a system dynamics model.
- ²¹ This study demonstrates in particular the difficulty of successfully accessing the work carried out and the internal debates. Out of 126 citations, it refers to only eight publications representative of academic work resulting from the implementation of IAMs, and does not mention the IPCC reports.
- ²² This was the period of the great IIASA programme (Häfele) and the MESSAGE model, the EFOM model in France (Dominique Finon) and the MARKAL model at the OECD, which gave rise to the TIMES model now deployed in more than 50 countries.
- ²³ These models fully take into account the laws of thermodynamics and therefore cannot be accused, as many economic models are now, of ignoring them. Disregard of these laws in the case of short/medium term macroeconomic models is explained by the type of questions they aim to answer. In long-term models (Acemoglu *et al.*, 2012), it can lead to questionable conclusions by not controlling for substitution elasticities between factors (Pottier *et al.*, 2013).

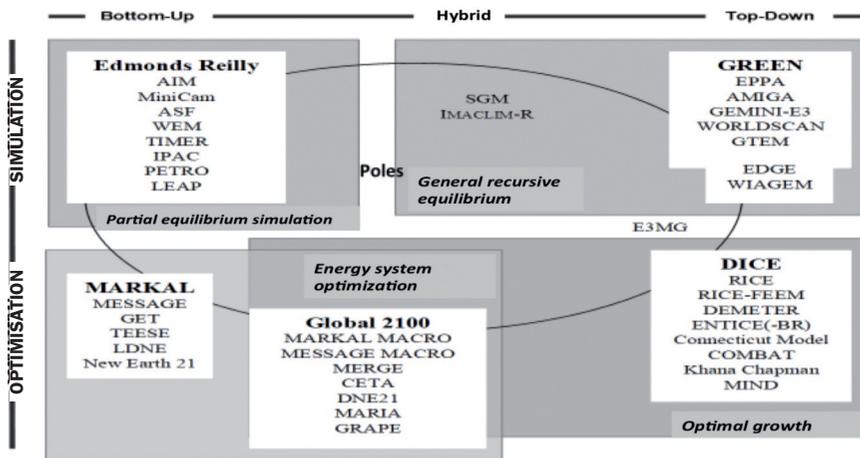
- ²⁴ Pauline Huet's thesis (Huet, 2015) shows, through a process of cross-citations, that the leading journals in economics publish very few studies on climate issues (and even on energy issues) and that such work is published in specialist economics journals (*The Energy Journal*, *Energy Policy*, *Energy Economics*, *Environmental Modeling and Assessment*) and in interdisciplinary journals (*Nature*, *Science*, *Global Environmental Change*, *Climate Policy*, etc.). Nordhaus remains a unique example of an author who is cited non-anecdotally in the literature of both fields. His reputational effect for general economists making forays into climate issues explains why he has been a 'straw man' for critics of the way neoclassical economists deal with climate (damage assessment, discounting). However, these controversies have distracted from the fact that the abatement costs that Nordhaus's DICE model calculates hardly change whether one acts in 2020 or in 2040 to reach a target in 2060. This technical point is important because it shows in concrete terms the inadequacy of DICE for discussing the timing of action (Gilotte, 2004).
- ²⁵ The notion of equilibrium is confusing. At root, in the early work of the Norwegian economist Johansen (1930-1982), it refers to an accounting balance of flows within an economy, a tool that makes it possible to identify the interdependencies between agents and economic sectors. A 'deficit' economy is in accounting equilibrium via the debt it incurs. In standard computable general equilibrium models, equilibrium is understood in a stronger sense, to the effect that goods markets are well balanced and factors of production are fully employed, so that the economy follows a so-called 'optimal' growth path. Many integrated assessment models use this notion of equilibrium, but others stick to the original meaning of the term and simulate economies with unemployment, underinvestment and inertia in the balancing of the goods market. These are sub-optimal equilibrium models.
- ²⁶ Certainly, at the end of the two-decade debate between the English and American Cambridges on the neoclassical production function, Solow and Samuelson recognised that this function – a useful device for representing flexibilities in the economy in the long run – could not represent technical choices except at the margin of an optimal path. This recommendation was ignored and it took several years before 'hybrid' specifications were turned to for better representing technical substitutabilities (see below).
- ²⁷ This failure to take account of the laws of thermodynamics can be explained, in the case of short/medium-term macroeconomic models, by the type of questions they aim to answer. In long-term models (Acemoglu *et al.*, 2012), it can lead to questionable conclusions when the realism of substitution elasticities between factors is not controlled (Pottier *et al.*, 2013).
- ²⁸ By hard linking (resolution of a single computer code) in the global multi-regional version of the model (Sassi *et al.*, 2010) and by soft linking (iterative resolution with exchange of key variables until convergence) in the national versions of the model (Ghersci, 2015), applied to a growing number of economies within an international network certified by the CNRS.
- ²⁹ These amounts can be approximated from the EU KLEMS database (euklems.net), which gives the purchases of the capital goods sectors by other sectors. For this, it is necessary to make certain assumptions, admittedly rough, but which give an idea of the orders of magnitude involved. This data is not included in the current models. The figure quoted here is taken from Aglietta *et al* (2015).

- ³⁰ This raises important issues of interpretation of the results for those who do not have the time to ‘look under the hood’ to see what the models are really doing. A recent paper in *Nature* (Forster *et al.*, 2020) presents a 1.5°C scenario for the post-COVID period with a lot of detail on GHG dynamics and emissions gains in various sectors, including transport, and suggests that such a scenario is possible if 1.2% of GDP is transferred to low-carbon investments. But the model used does not include transport or industry, either for their technical pathways or for their role in the structural change of growth.
- ³¹ The following statement from the Rio Earth Summit (1992) should be kept in mind: “Achievement of social and economic development and the eradication of poverty are the first and overriding priorities of developing country Parties.”
- ³² https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/820184_ngfs_scenarios_final_version_v6.pdf
- ³³ <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>
- ³⁴ Multi-sector models generally adopt an Armington elasticity of substitution between domestic and imported varieties of the same good. This elasticity is generally much higher than that prevailing in the domestic economy between the composite input aggregating the two sources of supply and the other factors of production.
- ³⁵ <http://www.epe-asso.org/etude-fondri-epe-iddri-scenarios-de-transition-vers-un-monde-economie-en-carbone-en-2050-quels-enjeux-pour-lindustrie-resultats-resume-et-rapport-complet-2008-2009/>
- ³⁶ The IPCC has for some time recommended that an odd number of scenarios should not be chosen, in order to avoid the median scenario being always interpreted as the most likely.
- ³⁷ The expression comes from “*nani gigantum humeris incidentes*”, attributed to Bernard of Chartres (12th century) who said that we are all dwarfs who can see further than the giants if we climb on their shoulders. It was taken up by Pascal, Montaigne, Newton, ... the Apollo 17 mission and Google Scholar.

Annex: Classifications of integrated assessment models

Figures 3 and 4 depict two typologies other than the one used in the main text. The first describes the situation of models in the early 2000s, when they were organised around two axes: first, the bottom-up axis (extent of technological information) versus the top-down axis (extent of macroeconomic framing) and, second, the ‘myopic’ axis versus the ‘perfect foresight’ axis. The shift to hybridisation, one of whose defining moments was a special issue of *The Energy Journal* (Hourcade *et al.*, 2006), involved moving towards the ‘centre’ of the rectangle.

Figure 3: The origins of modelling ‘tribes’



Source: Crassous, 2008

The second typology is taken from the summary just published by the United Nations Environment Programme (UNEP). It takes account of the hybridization movement, but it fails to grasp the extent to which this movement results from a tension between progress on the ‘macroeconomy’, in particular the representation of multisectoral interactions, and progress on the other two dimensions, namely technological realism and real behaviour. It is for this reason that we opted for a three-dimensional ‘cube’ description in the text.

Figure 4: Typology of IAMs

	Equilibrium		Non-equilibrium
	General equilibrium (full economy)	Partial equilibrium (partial economy)	
Perfect foresight (optimisation)	REMINI, WITCH, BET, MERGE, MESSAGE-MACRO, MARKAL-MACRO	MESSAGE, TIMER/MARKAL, TIAM, DNE21+	E3ME, Oxford Global Macroeconomic and Energy Model
Myopic (simulation)	IMACLIM, GEM-E3, ENV-Linkages, Phoenix, SGM, G-CUBED, MIT EPPA	IEA WEM, IMAGE, GCAM, POLES	

Source: UNEP Finance Initiative, 2021

REFERENCES

- Acemoglu, D., Aghion, P., Burzstyn, L., Hemous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review* 102, 131-166.
- Aglietta, M., Hourcade J.-C., Jaeger, C., Perrissin Fabert, B. (2015). Financing transition in an adverse context: Climate finance beyond carbon finance. *International environmental agreements: Politics, law and economics* 15 (4), 403-420.
- Allen, T., Dees, S., Boissinot, J., Caicedo Graciano, C. M., Chouard, V., Clerc, L., de Gaye, A., Devulder, A., Diot, S., Lisack, N., Pegoraro, F., Rabaté, M., Svartzman, R., Vernet, L. (2020). *Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: an Application to France*. WP #774, Banque de France, Paris, 68 p. <https://publications.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/wp774.pdf>
- Ambrosi, P., Hourcade, J.-C., Hallegatte, S., Lecocq, F., Dumas, P., Ha-Duong, M. (2003). Optimal control models and elicitation of attitudes towards climate damages. *Environmental Modeling and Assessment*, Special issue on *Modeling the economic response to global climate change* 8 (3), 133-147.
- Berndt, E. R., Wood, D. O. (1975). Technology, prices, and the derived demand for energy. *The review of Economics and Statistics* 57 (3), 259-268.
- Böhringer, C. (1998). The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modelling. *Energy Economics* 20 (3), 233-248.
- Borio, C., Drehmann M., Xia D. (2018). The financial cycle and recession risk, BIS Quarterly Review, December, pp 59–71.
- Crassous, R. (2008). *Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques*. Thèse de doctorat, AgroParistech, Paris.
- CFTC, 2020. *Managing Climate Risk in the U.S. Financial System*, Report of the Climate-Related Subcommittee Market Risk Advisory Committee of the U.S. Commodity Futures Trading Commission, Washington, DC.
- Devulder, A., Lisack, N. (2020). *Carbon Tax in a Production Network: Propagation and Sectoral Incidence*. WP #760, Banque de France, Paris, 50 p. <https://publications.banque-france.fr/sites/default/files/medias/documents/wp760.pdf>
- Fama, E. (1970). "Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work". *Journal of Finance*. 25 (2): 383–417.
- Forster, P. M., Forster, H. I., Evans, M. J., Gidden, M. J., Jones, C. D., Keller, C. A., Lamboll, R. D., Le Quéré, C., Rogelj, J., Rosen, D., Schleussner, C.-F., Richardson, T. B., Smith, C. J., Turnock, S. T. (2020). Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. *Nature Climate Change* 10, 913-919.

Gherssi, F. (2015). Hybrid Bottom-up/Top-down Energy and Economy Outlooks: A Review of IMACLIM-S Experiments, *Frontiers in Environmental Science* **3** (74), 1-18.

GIEC (1996). *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editors J.P. Bruce, H. Lee, E. F. Haites. Cambridge University Press, Cambridge, MA.

Gilotte, L. (2004). *Incertitude, inertie et choix optimal : Modèles de contrôle optimal appliqués au choix de politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Grubb, M., Edmonds, J., ten Brink, P, Morrison, M. (1993). The costs of limiting fossil-fuel CO₂ emissions: a survey and analysis. *Annual Review of Energy and the Environment* **18** (1), 397-478.

Hogan, W.W., Manne, A. S. (1977). Energy-Economy Interactions: The Fable of the Elephant and the Rabbit? In Hitch, C.J., ed., *Modeling Energy-Economy Interactions: Five Approaches*: 247-277. Resources for the Future, Washington D.C., United States.

Hourcade, J.-C., Jaccard, M., Bataille, C., Ghersi F. (2006). Hybrid Modelling: New Answers to Old Challenges. *The Energy Journal*, special issue *Hybrid Modelling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-Up and Top-Down*, 1-12.

Hudson, E. A., Jorgenson, D. W. (1974). US Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000. *The Bell Journal of Economics and Management Science* **5** (2), 461-514.

Huet, P. (2015). *Émergence et structuration de l'économie des changements climatiques (1975-2013) : analyse socio-historique d'un nouveau domaine de recherche*. Thèse de doctorat, EHESS, Paris, Université du Québec, Montréal.

ILB (2020). *The Alignment Cookbook – A Technical Review of Methodologies Assessing a Portfolio's Alignment with Low-carbon Trajectories or Temperature Goal*. Institut Louis Bachelier, Paris.

IMF (2014). *Is it Time for an Infrastructure Push? The Macroeconomic Effects of Public Investment*. World Economic Outlook, October 2014: Legacies, Clouds, Uncertainties. International Monetary Fund, Washington DC.

Jorgenson, W. D., Wilcoxon, P. (1993). Energy the environment, and economic growth. Chapter 27, *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, vol. 3, p. 1267-1349. Elsevier.

Lampin, L. B. A., Nadaud, F., Grazi, F., Hourcade, J.-C. (2013). Long-term fuel demand: Not only a matter of fuel price. *Energy Policy* **62**, 780-787.

Le Treut, G. (2017). *Methodological proposals for hybrid modelling: consequences for climate policy analysis in an open economy (France)*. Thèse de doctorat, École des Ponts ParisTech, Paris, 309 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01707559/document>

Le Treut, G., Gherzi, F. (2018). Hybrid Input-Output tables for France at year 2010. Mendeley Data, v1. <http://dx.doi.org/10.17632/gv6hxcwt3.1>

Lucas, R. E. (1972). Expectations and the Neutrality of Money. *Journal of Economic Theory* 4 (2), 103-124.

National Institute of Economic and Social Research. *NiGEM technical documentation*, National Institute of Economic and Social Research, London. <https://nimodel.niesr.ac.uk/index.php?t=5>

Paillard, S., Tréyer, S., Dorin, B. (eds.) (2010). *Agrimonde : scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Editions Quae, Versailles, 296 p.

Pindyck, R. S. (2013). Climate change policy: What do the models tell us? *National Bureau of Economic Research Working Paper* 19244, 21 p.

UNEP Finance Initiative (2021). Pathways to Paris: A practical guide to climate transition scenarios for financial professionals. UNEPFI, Geneva.
<https://www.unepfi.org/publications/banking-publications/pathways-to-paris/>

Roncoroni, A., Battiston, S., Escobar-Farfán, L. O. L., Martínez-Jaramillo, S. (2021). Climate risk and financial stability in the network of banks and investment funds. *Journal of Financial Stability* 54.

Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J.-C., Gitz, V., Waisman, H., Guivarch, C. (2010). IMACLIM-R: A modelling framework to simulate sustainable development pathways. *International Journal of Global Environmental Issues* 10 (1-2), 5-24.

Summers, L. H. (2015). Demand Side Secular Stagnation. *American Economic Review: Papers & Proceedings* 105 (5), 60-65.

Vermeulen, R., Schets, E., Lohuis, M., Kölbl, B., Jansen, D.-J., Heeringa, W. (2019). The heat is on: A framework for measuring financial stress under disruptive energy transition scenarios. DNB Working Papers 625, Département de la Recherche, Banque Centrale des Pays Bas, Amsterdam.

Waisman, H., Rozenberg, J., Hourcade, J.-C. (2012). Monetary compensations in climate policy through the lens of a general equilibrium assessment: The case of oil-exporting countries. *Energy Policy* 63, 951-961.



Institut Louis Bachelier

Palais Brongniart

28, place de la Bourse

75002 Paris

Tél. : +33 (0)1 73 01 93 40

Fax : +33 (0)1 73 01 93 28

contact@institutlouisbachelier.org



LABEX

Louis Bachelier