



HAL
open science

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

Jean-Charles Hourcade, Peter Tankov, Stéphane Voisin, F. Gherzi, Julien Lefèvre

► **To cite this version:**

Jean-Charles Hourcade, Peter Tankov, Stéphane Voisin, F. Gherzi, Julien Lefèvre. Les modèles intégrés économie-climat : quels usages pour quelles décisions ?. *Opinions & Débats*, 2021, 23, pp.16-42. hal-03506990

HAL Id: hal-03506990

<https://hal.science/hal-03506990v1>

Submitted on 3 Jan 2022

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

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

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

Jean-Charles Hourcade^a, Peter Tankov^b, Stéphane Voisin^c, Frédéric Gherzi^a, Julien Lefèvre^a

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

^b CREST-ENSAE, Institut Polytechnique de Paris

^c Institut Louis Bachelier

Introduction

Même si la communication et les débats publics sur le changement climatique restent surtout alimentés par les modèles climatiques répertoriés par le Groupe I du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), c'est dès 1990 que des modèles furent construits pour cerner les conditions technologiques et économiques des trajectoires de contrôle des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces modèles furent analysés dès 1995 par le Groupe III du GIEC (GIEC, 1995) puis, sous le vocable de *Integrated Assessment Models* (IAM), 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 lecture¹.

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 malentendus ont des conséquences sur la 'carte mentale' qui structure la délibération publique et les prises de décision.

¹ 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.

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

I.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'explosion, 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 nucléaire². 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 thermodynamiques³.

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, et 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.

² 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.

³ Ces modèles tiennent bien compte des lois de la thermodynamique et donc échappent au procès que ces lois 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).

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'explosion 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'Energie 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. C'est dès la fin des années soixante-dix que les exercices de prospective de l'IIASA intégrèrent la dimension climat. 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 climat⁴. 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, les dommages évités. DICE incorpore un 'moteur' de croissance avec un seul bien

⁴ 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 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).

composite, une fonction de coût d'abattement des émissions de carbone bornée par une *'backstop technology'* et une fonction 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), 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 Scarf. Grâce à l'explosion des capacités des micro-ordinateurs, les fonctions KLEM purent être utilisées dans des modèles multisectoriels calibrés sur 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)⁵. 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 inexistantes⁶. 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

⁵ 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 substituabilités techniques (cf. infra).

⁶ 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).

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.

I.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 technique, 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, ne permettent pas d'en rendre aisément compte. Le cube ci-dessous 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 (0,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, 0, 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.

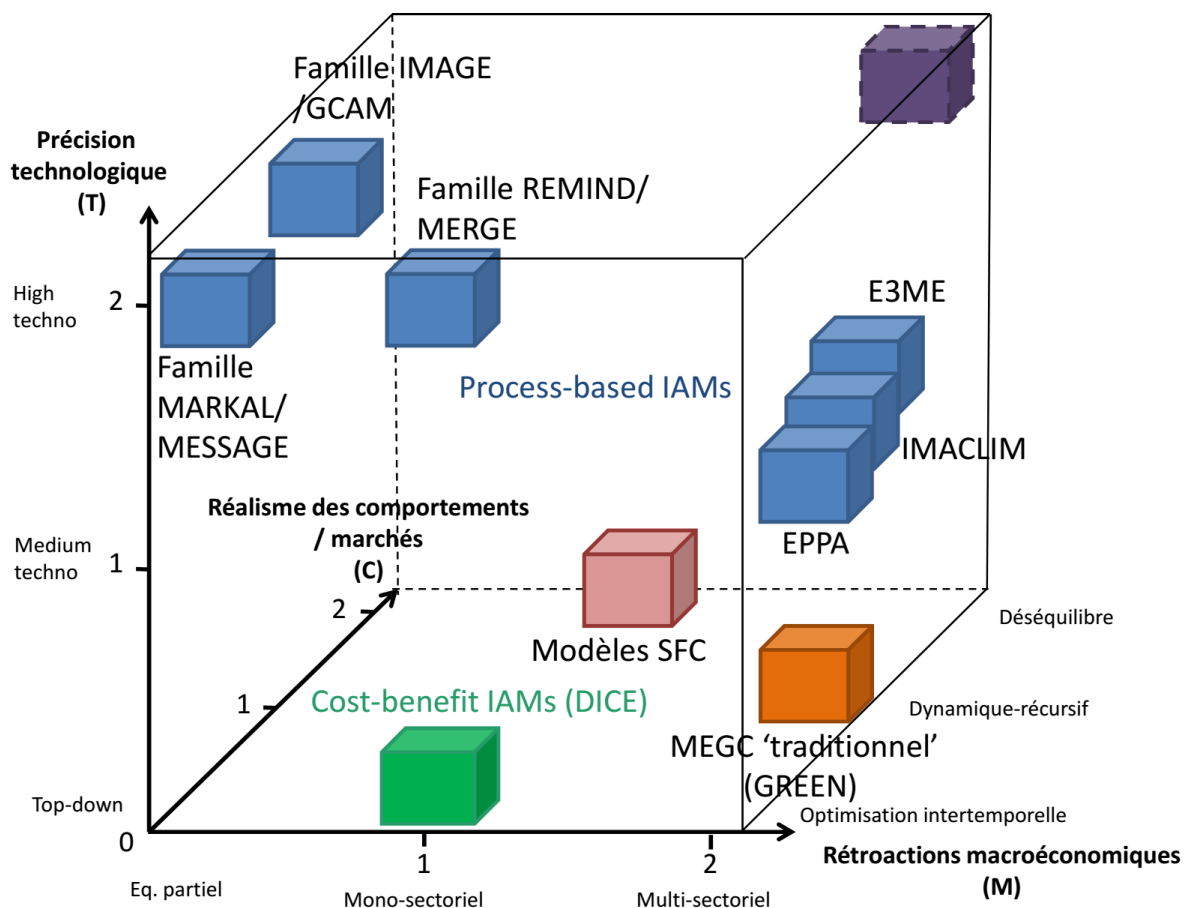


Figure 1 Taxonomie des modèles énergie/climat selon trois axes de caractéristiques

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.

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 $(T \geq 1, M=2, C \geq 1)$). 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 en intrant 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*⁷ 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

⁷ 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 (Ghersl, 2015), appliquées à un nombre croissant d’économies au sein d’un réseau international labellisé par le CNRS.

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.

I.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 coûts-bénéfices 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 '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 test* (voir section III.2 ci-dessous). 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.

II.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 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 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 se soit bien gardé, jusqu'ici, de donner une évaluation monétaire des dommages et que la communauté internationale se soit engagée sur des objectifs en température comme mesure de précaution (Ambrosi et al., 2003). Il convient de le rappeler, vue 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.

II.2 Les risques de l'énergie-centrisme

Vue 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 industriels⁸. 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 diagnostic⁹.

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, le secteur industriel constitue 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.

II.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

⁸ 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).

⁹ 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.

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 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.

II.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 (Encart 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 pauvreté¹⁰, un effort important a été consacré aux moyens de produire un 'double dividende' environnemental (moins d'émissions) et économique (plus d'activité).

Encart 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 :

¹⁰ 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.* »

$$Y = (a R^\rho + b E^\rho)^{\frac{1}{\rho}} \quad (1)$$

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 de 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, 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 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 émission. 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.

III.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 le dossier climat 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) s'appuient souvent sur des scénarios tirés des *Energy Transition Pathways* (ETP) ou du *World Energy Outlook* (WEO) de l'Agence Internationale de l'Energie, 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, soit tiré de modèles intégrés comme dans le cas des scénarios NGFS¹¹.

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

III.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 ».

¹¹ https://www.ngfs.net/sites/default/files/medias/documents/820184_ngfs_scenarios_final_version_v6.pdf

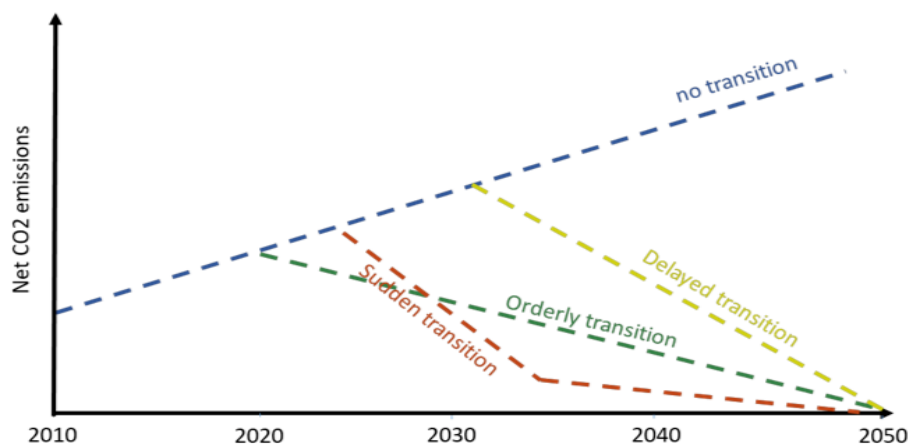


Figure 2. Emissions de CO₂ dans les scénarios de l'exercice de stress test ACPR.
Source : Allen et al. (2020).

III.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 plus haut : 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. A 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 Encart 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. L’exercice Banque de France/ACPR contourne ainsi les efforts des IAM pour intégrer des données hétérogènes dans un cadre cohérent (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Encart 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 GTAP,¹² 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 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

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

¹² <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/>.

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.

Encart 3 Modélisation hybride énergie/économie

Dans des modèles réglant les substituabilités de facteurs par des fonctions de production agrégées (voir Encart 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' 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).

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.

III.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 un modèle statique de plein emploi, REMIND un modèle d'équilibre général d'optimisation intertemporelle et GCAM 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 substituables¹³.

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 n'est 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 préexistantes 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'ingénieur et d'économistes (Encart 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 élasticité¹³. 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.

III.3. Implications : une 'cartographie' biaisée des risques

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.

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

¹³ 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.

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 (Encart 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 métaux¹⁴. 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.

Encart 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 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) 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.

III.3 Scénarios, analyse des risques et stratégies d'alignement des portefeuilles

L'exercice ACPR/BdF montre qu'il n'y a donc 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.

¹⁴ <http://www.epe-asso.org/etude-fond-dri-epe-iddri-scenarios-de-transition-vers-un-monde-econome-en-carbone-en-2050-quels-enjeux-pour-lindustrie-resultats-resume-et-rapport-complet-2008-2009/>.

Il faut repartir de la raison d'être de 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, excluent 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 (USA, 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). 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.¹⁵

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 rentabilité 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 enfilerait 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’expérience¹⁶. 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

¹⁵ 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.

¹⁶ 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.

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 ce '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.

Références

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. doi:10.2307/2325486. JSTOR 2325486.

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.

DOI 10.5089/9781498331555.081

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., Ghersi, F. (2018). Hybrid Input-Output tables for France at year 2010. Mendeley Data, v1. <http://dx.doi.org/10.17632/gyv6hxcwt3.1>

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 (non daté). *NiGEM technical documentation*, National Institute of Economic and Social Research, London, 14 p.

Accès par <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., Martinez-Jaramillo, S. (2021). Climate risk and financial stability in the network of banks and investment funds. *Journal of Financial Stability* 54. <https://doi.org/10.1016/j.jfs.2021.100870>

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. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.p20151103>

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.

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.

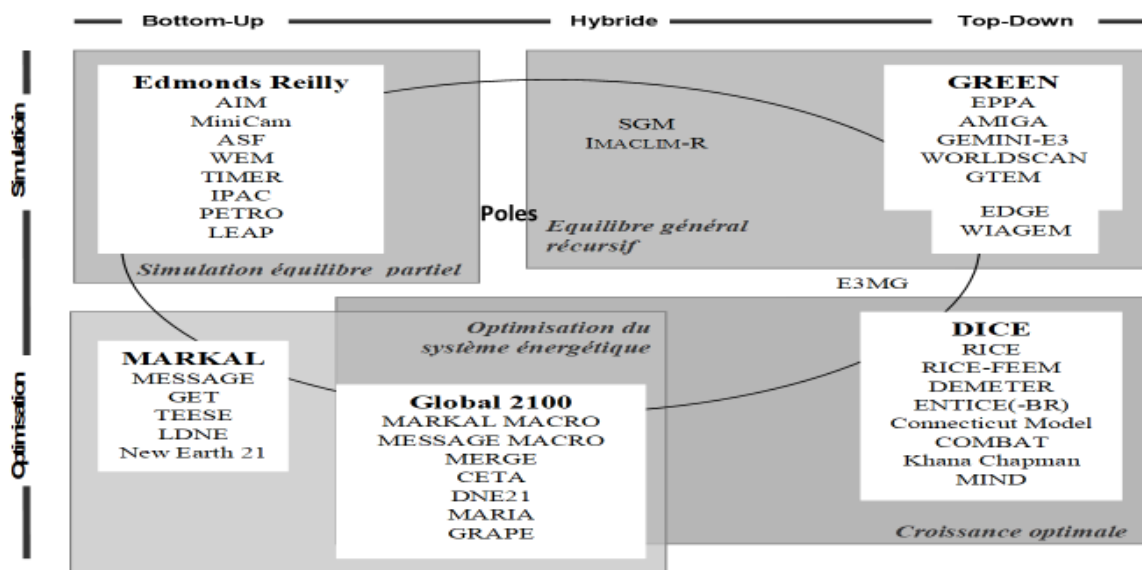


Figure 3. Aux origines des 'tribus' de modélisation
Source : Crassous, 2008.

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.

	Equilibrium		Non-equilibrium
	General equilibrium (full economy)	Partial equilibrium (partial economy)	
Perfect foresight (optimisation)	REMIND, 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	

Figure 4. Typologie des IAM
Source : UNEP Finance Initiative, 2021.