Comprendre les enjeux de la modélisation du lien complexe entre énergie, climat et économie.

Emmanuel Hache, Marine Simoën, Gondia Sokhna Seck, Romain Grandjean

▶ **To cite this version:**

Emmanuel Hache, Marine Simoën, Gondia Sokhna Seck, Romain Grandjean. Comprendre les enjeux de la modélisation du lien complexe entre énergie, climat et économie.: Etat des lieux et limites de la modélisation énergie-climat au niveau mondial.. [Rapport de recherche] The Shift Project. 2019. hal-03141760

HAL Id: hal-03141760
https://ifp.hal.science/hal-03141760

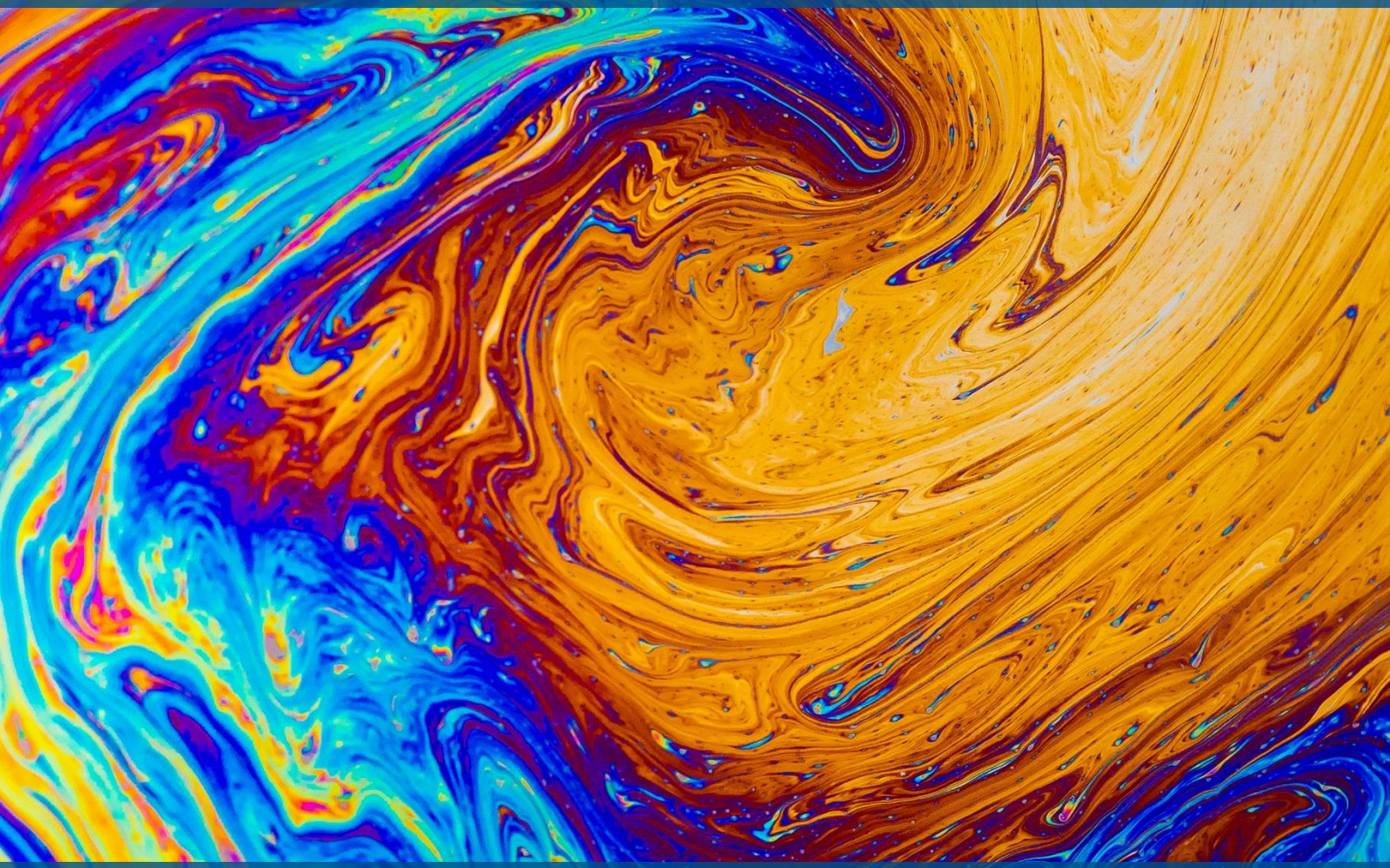
Submitted on 15 Feb 2021

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.

COMPRENDRE LES ENJEUX DE LA MODÉLISATION DU LIEN COMPLEXE ENTRE ÉNERGIE, CLIMAT ET ÉCONOMIE

ÉTAT DES LIEUX ET LIMITES DE LA MODÉLISATION ÉNERGIE-CLIMAT AU NIVEAU MONDIAL



THE SHIFT PROJECT & IFPEN
OCTOBRE 2019

AVANT PROPOS

Cette note d'analyse a été réalisée en collaboration avec IFP Energies Nouvelles, en marge d'une l'étude « Scénarios énergie-climat : évaluation et mode d'emploi » réalisée en partenariat avec l'Afep.

Son objectif est de réaliser un état des lieux des enjeux liés à la modélisation des scénarios de transition, de plus en plus utilisés par certains acteurs, notamment les entreprises. Ce travail a vocation à définir les principaux concepts, et démystifier l'activité de modélisation – essentielle dans les enjeux énergie-climat.

Ce travail découle d'abord d'une revue de la littérature disponible sur ce sujet : c'est donc un travail préliminaire, qui mériterait d'être complété, critiqué et enrichi par des rencontres et échanges avec la communauté des modélisateurs.

Ce travail vient également alimenter les recherches menées par le *Shift* depuis plusieurs années, à travers le Séminaire Scientifique des Houches « Scicence for Energy Scenarios » et le projet Power Systems 2050 sur les méthodologies de scénarisation de la transition des systèmes électriques.

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS 2

INTRODUCTION 4

I. Définition générale d'un modèle 5

Démarche de la modélisation et éléments structurants 5

Méthode de résolution 6

Les paradigmes de modélisation 7

II. Modèles d'évaluation intégrée 8

Genèse des IAMs 9

Usage des IAMs 10

Structure actuelle des IAMs 11

III. Exemples d'*IAMs* et tentative de classement des modèles 12

IV. Limites et discussions autour des IAMs 14

Remarques générales 14

Modèles socio-économiques 15

L'impact du changement climatique 16

Modèles énergétiques 17

Autres remarques 18

V. Conclusion 19

VI. Références 20

VII. Annexe : Caractéristiques de certains modèles 22

IMAGE (PBL) 22

MESSAGE-GLOBIOM (IIASA) 25

REMING-MAgPIE (PIK) 27

AIM/CGE (NIES) 29

GCAM (PNNL) 31

World Energy Model (IEA) 33

TIMES (IEA) 35

MESAP-E[R] (IER-Stuttgart) 37

E3ME (Cambridge Econometrics) 39

Auteurs 41

INTRODUCTION

L'incertitude et l'ampleur des transformations liées aux enjeux énergie-climat ainsi que l'irruption potentielle de ruptures (technologiques, politiques, économiques) ont conduit plusieurs organisations et institutions à s'interroger sur les trajectoires possibles permettant de limiter la hausse des températures moyennes en-dessous de 2°C et sur les contreparties socio-économiques ou environnementales associées.

Dans cette perspective, de nombreux travaux visant à modéliser ces trajectoires complexes ont été menés par différents acteurs tels que des instituts de recherche académiques, des organisations inter-gouvernementales ou encore certaines entreprises.

Les projections énergétiques sont au cœur de ces exercices de modélisation. En comparaison d'autres secteurs, la production d'énergie comporte certaines spécificités :

1. l'énergie est utilisée dans tous les secteurs de l'économie ;
2. la production d'énergie requiert des infrastructures de long terme ;
3. la production et l'utilisation d'énergie s'accompagnent d'externalités environnementales locales et globales.

L'introduction de la problématique climatique dans les exercices de modélisation est un véritable enjeu pour les modélisateurs. Au-delà de la description des interactions traditionnelles entre les systèmes énergétique et économique, la prise en compte des enjeux de transition et les impacts physiques du changement climatique apporte une complexité nouvelle et suscite de nombreuses questions.

Les modèles sont sous-jacents à la plupart des scénarios énergie-climat et constituent des outils très utilisés pour évaluer l'impact des politiques mises en œuvre et aider à la décision des acteurs politiques et économiques. La bonne interprétation des résultats de tels scénarios demeure un enjeu pour ces acteurs.

***

Les auteurs soulignent que cette note d'analyse est réalisée dans un souci de présentation générale et pédagogique. Cette analyse ne prétend pas couvrir l'exhaustivité des modèles et des concepts, mais vise à synthétiser les principaux enjeux liés à la modélisation sous-jacente aux scénarios énergie-climat.

I. Définition générale d'un modèle

Démarche de la modélisation et éléments structurants

Un modèle est une construction mathématique visant, à partir d'hypothèses d'entrée et de processus de résolution, à représenter le fonctionnement d'un système réel (le climat, l'économie d'un pays, etc.), et son évolution dans le temps, afin d'aider les utilisateurs à organiser d'une manière logique et cohérente un travail de réflexion sur le comportement d'un tel système.

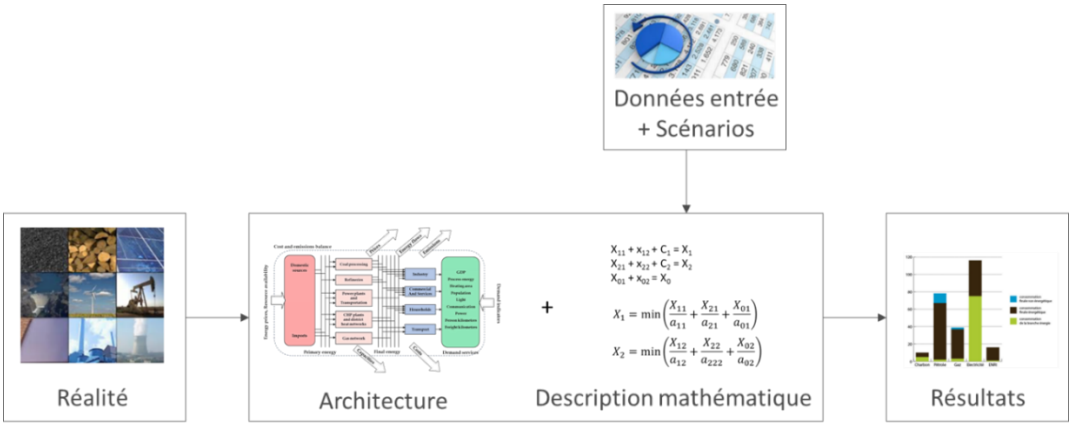


Figure 1 : Représentation schématique de la démarche de modélisation, auteurs, (adaptée de Bouvard et al., 2017).

La démarche de modélisation se décompose en plusieurs phases. Le fonctionnement du monde réel, d'une complexité infinie (1), peut être décrit par un ensemble de lois théoriques (lois de la physique par exemple) et empiriques (relations techniques ou économiques) plus ou moins interdépendantes. Ces lois sont représentées par un ensemble d'équations mathématiques dont la formulation est plus ou moins déterminée par le modélisateur. Ces équations font intervenir des variables[1] et des paramètres[2] dont elles permettent de décrire l'interaction (2).

Un ensemble de données d'entrée permet par la suite de calibrer le modèle (*i.e.* fixer les paramètres) à la période de référence (*i.e.* avant que le processus de résolution ne soit lancé) afin de représenter la réalité le plus fidèlement possible. La résolution du système d'équations permet alors de quantifier l'évolution dans le temps des différentes variables décrites, ce qui constitue le résultat de l'exercice de modélisation (3).

Parmi les variables qui interviennent dans le modèle, on distingue généralement les variables exogènes et les variables endogènes.

- Les variables « exogènes » ne sont pas calculées par le modèle. Ce sont des données d'entrée qui proviennent de sources extérieures[3]. Elles sont considérées indépendantes de la variation des autres variables du modèle. Leur valeur n'est pas nécessairement constante et peut évoluer. Cependant, cette évolution doit être renseignée par l'utilisateur du modèle. Dans les modèles étudiés dans cette note, le PIB ou le coût des technologies sont généralement des variables exogènes.
- Les variables « endogènes » sont calculées par le modèle à partir de la résolution du système d'équations et de l'évolution d'autres variables, endogènes ou exogènes. Ces variables sont par nature les résultats du modèle que l'utilisateur cherche à obtenir. Dans les modèles étudiés dans cette note, la quantité d'énergie produite ou consommée, ou la part de chaque source d'énergie dans le mix énergétique sont souvent des variables endogènes.

[1] Une variable est une grandeur dont la valeur est (provisoirement) indéterminée et peut fluctuer dans le temps, l'espace, etc.

[2] Les paramètres sont des valeurs numériques qui sont définies et fixées avant l'étape de résolution du modèle. Ils peuvent être des constantes physiques reconnues et non sujettes à discussion ou bien déterminés empiriquement et, dès lors, être discutés.

[3] Cela peut être des résultats d'un autre modèle, des données provenant d'institutions de référence comme la Banque mondiale, l'Agence Internationale de l'Energie, etc. ou encore l'avis d'experts.

La description réalisée par un modèle (évolution des variables) peut être projetée généralement selon trois dimensions : une dimension temporelle (horizon et pas de temps considérés), une dimension spatiale (périmètre et résolution géographique) et une dimension sectorielle[4]. L'introduction de ces trois dimensions permet au modèle de produire des résultats avec un degré de désagrégation plus ou moins important. Certains modèles représentent ainsi l'économie selon deux secteurs (le secteur énergétique et le reste de l'économie), d'autres ont une résolution géographique par pays.

Selon la complexité du système réel étudié, les modèles sont plus ou moins sophistiqués. Compte tenu de la complexité des enjeux énergie-climat, on observe que les modèles visant à décrire ces systèmes sont de plus en plus sophistiqués et intègrent de plus en plus de secteurs avec un niveau de désagrégation géographique important (voir partie 3).

La représentation proposée par le modélisateur demeure par nature simplifiée, dépend de l'objectif de modélisation et repose nécessairement sur des choix discutables, quel que soit le système réel étudié, et malgré les millions d'équations et de variables. Les résultats de l'exercice devront toujours être analysés au regard de ces aspects.

Enfin, il est important de distinguer ce qui relève de la responsabilité du scénariste et de celle du modélisateur (qui peuvent être le même individu). Le scénariste « client du modèle », est responsable des variables exogènes et de la fixation de certains paramètres qui traduisent le narratif du scénario. Le modélisateur est responsable de la structure du modèle et de la fixation de certains paramètres internes au modèle. Le scénariste demeure responsable du choix du modèle.

Méthode de résolution

On distingue généralement deux structures de résolution mathématiques différentes sur lesquelles peuvent reposer les modèles : les modèles de simulation et les modèles d'optimisation. Ces deux classes de modèles ne vont pas répondre au même type de question.

La logique d'optimisation repose sur la minimisation d'une grandeur de coût, appelée fonction objectif. Cette méthode permet par exemple de déterminer un système optimal pour satisfaire une demande[5]. Ce mode de résolution peut également satisfaire en parallèle d'autres contraintes prédéfinies (limites physiques sur la disponibilité de ressources, les potentiels techniques, les limites climatiques, etc.). Ces modèles sont généralement dits parfaitement omniscients et optimisent les variables sur la période entière d'étude[6]. Ce type de modèle se prête donc bien aux exercices dits normatifs avec des scénarios plutôt décisionnels, qui visent à répondre à la question « *Comment atteindre un objectif donné, compte tenu des contraintes ?* ». Par exemple, de nombreux modèles s'interrogent actuellement sur la question : « *Comment limiter une augmentation des températures moyennes mondiales inférieures à 2°C, compte tenu des technologies actuelles et de leurs coûts ?* ».

La logique de simulation a pour objectif de reproduire un système réel afin de pouvoir étudier son comportement, généralement par une extrapolation tendancielle du passé. Les modèles de simulation vont donc plutôt conduire à décrire ce qui pourrait se passer partant d'une situation de départ connue et selon une évolution des variables du modèles décrite par des lois d'évolution explicites et calibrées par l'observation de données historiques. Ces modèles sont généralement utilisés pour des scénarios exploratoires, qui visent à répondre à la question « *Que peut-il advenir ?* ». Ils permettent ainsi d'extrapoler des trajectoires basées sur des éléments de prospective classique fondés sur une approche dite « *What if ?* ».

Il existe enfin une troisième approche, dite récursive, qui consiste à optimiser une fonction « objectif » de façon récursive, c'est-à-dire que les résultats de l'optimisation à l'instant *t* serviront d'intrants au modèle à l'instant *t+1*. Dans ce cas, le modèle n'est pas omniscient, i.e. les agents (par exemple les individus, l'Etat ou les entreprises) ont dans ce cas une capacité d'anticipation limitée. Cette approche est en réalité une option qui est souvent intégrée aux exercices de simulation et d'optimisation qui vont alors présenter des optimums locaux sur chaque pas de temps défini dans le modèle (tous les 1, 5 ou 10 ans par exemple).

[4] Résolution sectorielle décrite à travers différents modules, représentés dans la structure schématique du modèle.

[5] Le coût du système dépendant des coûts d'investissement, des coûts opératoires, etc. On parle parfois de « maximiser le bien-être », ce qui peut revenir au même que « minimiser les coûts » selon la façon dont le bien-être est défini dans le modèle.

[6] Les agents dont le comportement est modélisé (par exemple les individus, l'Etat ou les entreprises) agissent (i.e. allouent des ressources) comme s'ils avaient une parfaite connaissance du futur.

A titre d'exemple, le modèle *TIMES* est un modèle d'optimisation alors que le modèle *WEM* repose sur un exercice de simulation.

Les paradigmes de modélisation

En parallèle du choix de la structure de résolution mathématique, il existe différents paradigmes de modélisation qui vont permettre de répondre également à différents besoins. Traditionnellement, les modèles sont décrits de manière *Top-down* (vision de l'économiste) ou *Bottom-up* (vision de l'ingénieur).

Les modèles *Bottom-up* partent du détail (approche ascendante), c'est-à-dire du niveau de désagrégation le plus bas, pour reconstituer le système global brique par brique. Ces modèles reposent ainsi sur une représentation technologique détaillée des systèmes étudiés[7].

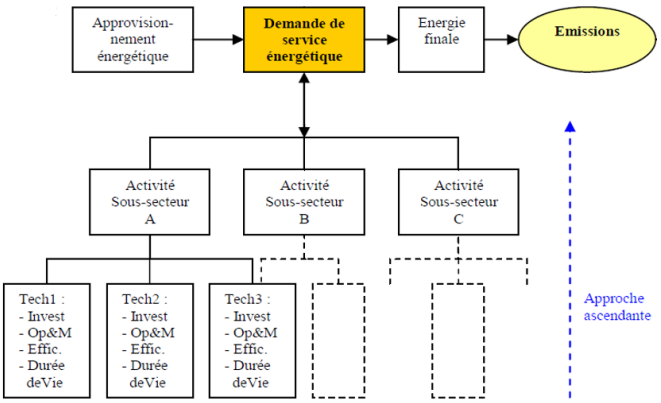


Figure 2 : schéma simplifié d'une approche Bottom-up (tirée de Assoumou, 2006). La demande en services énergétiques peut être déterminée par agrégation des besoins de chaque secteur. Elle peut aussi être une donnée d'entrée du modèle qui déterminera le chemin technologique optimal pour y répondre.

Les modèles d'optimisation (ex : modèle *TIMES* utilisé par l'AIE) dans lesquels le coût total du système est minimisé[8] reposent généralement sur ce paradigme.

Ce sont généralement des modèles d'équilibre partiel, c'est-à-dire que les secteurs vont être à l'équilibre, tel que l'offre soit égale à la demande sur chacun d'entre eux, mais de manière indépendante (pas de rétroaction vis-à-vis des autres secteurs). L'équilibre partiel permet d'avoir un niveau de détail sectoriel important. Cela signifie également qu'un secteur de l'économie pourrait être étudié de manière indépendante, toutes choses égales par ailleurs.

Généralement, la demande et les prix sont des variables exogènes dans ce type de modèle (Paltsev, 2017).

Ces modèles sont souvent utilisés pour étudier le secteur énergétique (parfois spécifiquement le secteur de la production d'électricité).

Les modèles *Top-down* vont plutôt mettre l'accent sur une compréhension complète du système économique, mais de manière très agrégée (approche descendante). Ils émanent plutôt d'une vision d'économiste. Plutôt que de décrire chaque brique du système, ils se fondent sur une représentation globale des relations économiques.

Ce type de modèle repose généralement sur un équilibre macroéconomique général, *i.e.* dans lequel les secteurs de l'économie sont tous en équilibre les uns par rapport aux autres (dont le secteur énergétique)[9].

Généralement la demande et les prix sont des variables endogènes dans ce type de modèle par l'équilibre de tous les secteurs et la compensation de tous les marchés.

[7] Ils incluent une représentation fine des ressources naturelles, des procédés de production énergétique, des consommateurs d'énergie finale (transport ou encore de chauffage domestique et industriel).

[8] Certains modèles bottom-up sont des modèles de simulation. Par exemple, le MEDEE (Modèle d'Evolution de la Demande d'Energie) est un cas de modèle de simulation Bottom-up développé par l'Institut Economique et Juridique de l'Energie (IEJE) de l'Université de Grenoble.

[9] Lorsque des modèles top-down sont utilisés dans la conception des scénarios énergie-climat, le système atteint un équilibre général dans lequel tous les secteurs de l'économie sont en équilibre simultanément et permettent d'obtenir la demande en service énergétique qui reste par la suite agrégée ou faiblement détaillée.

Le principal avantage de cette approche est la possibilité d'inclure des rétroactions des différents secteurs sur le système économique ainsi que la prise en compte de contraintes d'ordre fiscal ou financier, des échanges internationaux ou encore des balances de paiements entre les différentes régions. Toutefois, ce paradigme repose sur l'utilisation de fonctions de production et de consommation agrégées (c'est-à-dire qui ne rentrent pas dans le détail des différents facteurs de production) qui ne permettent pas de tenir compte d'un certain nombre de spécificités des différents secteurs de l'économie. Par ailleurs, dans le cas de modèles très détaillés, le temps de calcul peut être long.

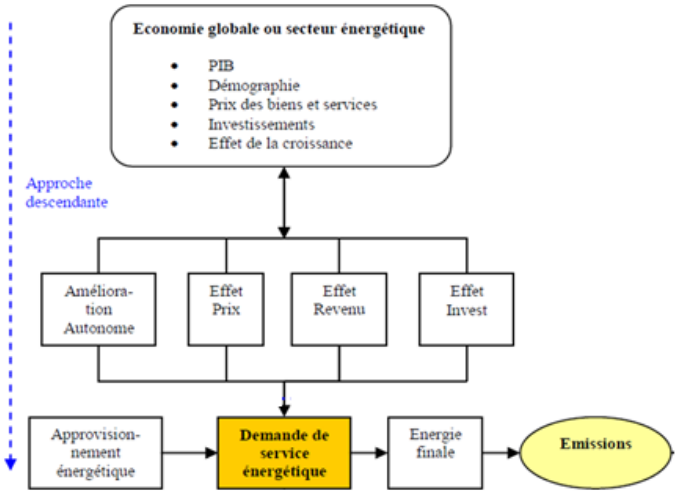


Figure 3 : schéma simplifié d'une approche Top-down (tirée de Assoumou, 2006).

Parmi les modèles *Top-down*, on retrouve des modèles à anticipation adaptative[10] (tel que le modèle IMAGE) ou encore des modèles d'équilibre général à anticipations parfaites[11] (tel que le modèle DICE).

Les deux approches, ascendantes et descendantes, précédemment décrites peuvent également être combinées à travers des modèles dits « hybrides ».

Une façon de créer un modèle hybride consiste à réaliser un « *soft-linking* », c'est à dire à coupler itérativement un modèle *Top-down* et un modèle *Bottom-up* (autrement dit, les données de sortie de l'un sont les données d'entrée de l'autre). Cette approche requiert néanmoins un important travail d'analyse sur les résultats que l'on souhaite introduire dans le modèle suivant alors que les interactions peuvent être limitées entre les modules (GEMINI E3/MARKAL)[12].

D'autres formes d'hybridation existent. Il est par exemple possible d'ajouter un module macroéconomique (MACRO) compatible à un modèle Bottom-up (MARKAL) afin de réaliser un « *hard-linking* », ce qui donne par exemple MARKAL-MACRO. Ces modèles nécessitent d'être adaptés afin d'être compatibles et d'assurer la convergence du modèle (c'est-à-dire des systèmes d'équations) et donc l'obtention de résultats.

Chacune de ses hybridations vise à combiner le « détail » technique des modèles *Bottom-up* avec la description globale de l'économie des modèles *Top-down* (Helgesen et al., 2018).

II. Modèles d'évaluation intégrée

L'apparition de la problématique climatique a conduit à l'émergence d'un troisième paradigme dit « *d'évaluation intégrée* » qui permet de prendre en compte les interactions entre les systèmes climatique, socio-économique et technique.

[10] On parle de myopie des agents, les choix étant uniquement basés sur le passé et le présent (pas de connaissance du futur)

[11] Comme décrit plus haut, les agents ont une parfaite connaissance du futur et l'optimisation se fait sur l'ensemble de l'horizon temporel.

[12] Drouet L., Haurie A., Labriet M., Thalmann P., Vielle M., Viguier L., A Coupled Bottom-Up / Top-Down Model for GHG Abatement Scenarios in the Housing Sector of Switzerland, in R. Loulou, J.-P. Waaub, and G. Zaccour (Ed.), Energy and Environment, Springer, New York, 2005, pp. 27-61.

Les « Modèles d'évaluation intégrée » ou *Integrated Assessment Models* (*IAMs*) sont des modèles économie-énergie-climat qui reposent sur un tel paradigme. Ils modélisent des systèmes physiques, socio-économiques, et techniques très complexes et tentent de représenter au mieux les chaînes causales partant des activités humaines (énergie, transport, agriculture, etc.) jusqu'au système climatique (via les émissions de GES) (Nicolas, 2016). Pour décrire ces systèmes complexes, les *IAMs* rassemblent de nombreuses disciplines (climatologie, économie, écologie, mathématiques appliquées, océanographie, sciences de l'ingénieur, sociologie, etc.).

Genèse des IAMs

Les *IAMs* trouvent leur origine dans la rencontre entre les travaux de Forrester - pionnier de la *Dynamique des systèmes* - et les travaux du Club de Rome[13] qui visent à traiter des questions relatives au développement socio-économique mondial.

La dynamique des systèmes est une approche permettant de prendre en compte le comportement des systèmes complexes dans le temps en utilisant des boucles dites de rétroactions. Elles permettent de comprendre comment un élément du système va réagir face à une perturbation extérieure (généralement appelée forçage). Celles-ci peuvent être positives (phénomène d'amplification) ou négatives (phénomène d'amortissement).

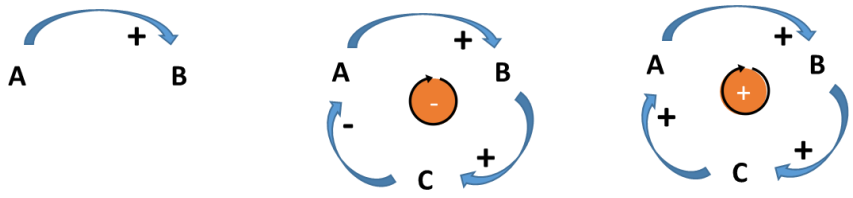


Figure 4 : liens de causalité et boucles de rétroaction. La boucle de droite est une rétroaction positive simple. La spirale salaires/prix en est un exemple : l'augmentation des salaires entraîne une hausse des prix qui conduit à exiger des salaires plus élevés, et ainsi de suite.

Le modèle « *World* », développé par Jay Forrester (1965, 1969) à partir de l'approche de la dynamique des systèmes, sera ainsi repris et amélioré par l'équipe de Dennis Meadows (1972), mandaté par le Club de Rome (*World 2* et *World3*). Il permettra de simuler les interactions entre population, capital industriel, pollution, ressources, production alimentaire et écosystèmes. Les résultats de ce premier modèle intégré à l'échelle mondiale donneront lieu à l'écriture du rapport *The Limits to Growth*, paru en 1972, et dont des versions actualisées existent encore aujourd'hui.

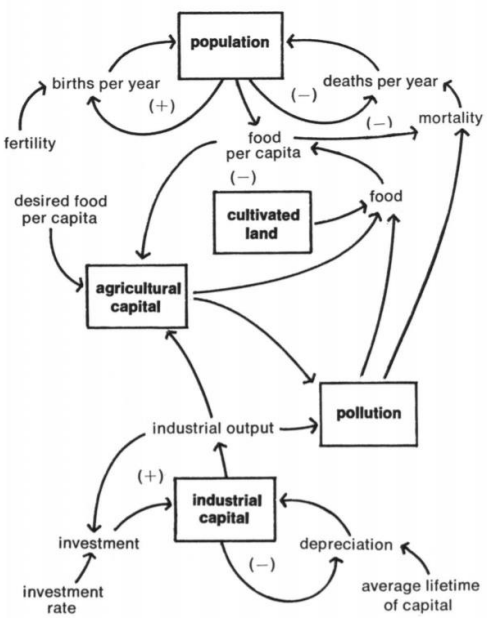


Figure 5 : Représentation schématique des boucles de rétroactions population-capital-agriculture et pollution. The Limits to Growth (1972) (p.97)

[13] Ce groupe de réflexion a été créé en 1968 sous l'impulsion notamment d'Aurelio Peccei, membre du conseil d'administration de FIAT et Alexander King, ancien directeur scientifique de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

Néanmoins, le rapport reçoit à l'époque un accueil mitigé de la part des économistes et des décideurs politiques. En effet, plusieurs simulations conduisent à un effondrement du système[14] (en raison notamment de la hausse de la pollution ou de l'épuisement des ressources) au cours du 21ème siècle et les solutions intuitives apportées par les auteurs - une croissance économique ramenée à zéro et une stabilisation de la population – ne sont pas audibles dans le contexte économique international des 30 glorieuses. La principale critique concernera l'absence de représentation des échanges économiques, et donc l'absence d'un équilibrage possible par le marché (et les prix) ou les politiques publiques. Les hypothèses concernant le progrès technique, considérées comme pessimistes (progression linéaire alors que la population augmente exponentiellement) sont aussi critiquées, tout comme l'absence de découvertes de nouvelles ressources naturelles. Finalement, le monde étant modélisé comme un tout, il occulte les disparités régionales, tant en termes de richesses que de ressources et de pollution.

De nouveaux modèles ont été créés en réponse aux critiques faites au modèle *World3* développé par l'équipe de Meadows et Forrester. Nordhaus, un des plus virulents critiques à l'encontre de ce premier exercice de modélisation, sera aussi un des premiers à tenter de coupler un modèle global avec un modèle climatique (1976). Ce travail théorique, assez rudimentaire car ne tenant compte que d'une variable CO_2, marque toutefois le début des modèles d'évaluation intégrée actuels. Il donnera naissance par la suite aux familles de modèles *DICE* (puis *RICE* qui en est une version régionalisée) dans les années 1990, toujours utilisés (et améliorés) aujourd'hui.

De nombreuses autres familles de modèles seront par la suite développées (*ICAM*, 1993 ; *IMAGE*, 1994 ; *MERGE*, 1995, etc.). A partir des années 2000, les objets d'étude s'orientent également sur les processus d'intégration et d'évaluation des *IAMs* afin de mieux préciser le cadre méthodologique entourant ces nouveaux exercices de modélisation (Matarasso, 2003). Certains modèles auront une audience et une utilisation très larges (*DICE*, *TIAM*), quand d'autres ne seront développés et exploités qu'au sein d'un seul et même laboratoire (par exemple *IMACLIM-R*, développé et utilisé par le CIRED[15]).

Au fur et à mesure des travaux, ces modèles ont été de plus en plus intégrés et désagrégés, tant au niveau géographique que sectoriel.

Les *IAMs* ont été, et sont toujours, développés par plusieurs centres de recherche, incluant un laboratoire de modélisation (IIASA, PBL, PIK, CIRED, etc.). Ces travaux de développement et de modélisation sont publiés dans des revues à comité de lecture et sont largement repris dans la littérature.

Usage des IAMs

L'usage des *IAMs* s'inscrit largement dans le cadre de travaux de recherche qui évaluent l'interaction entre les activités humaines et l'environnement, et plus particulièrement le climat. Ces modèles visent à représenter au mieux les différents systèmes (économiques, énergétiques et climatiques), l'ensemble de leurs dynamiques et leurs interactions. En d'autres termes, ils permettent d'avoir une compréhension des systèmes socio-économiques et énergétiques « du puits à l'atmosphère[16] » (*i.e.* de l'extraction des ressources naturelles jusqu'aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère).

Initialement, les *IAMs* ont été utilisés dans le cadre de recherches climatiques « exploratoires ». La logique de l'exercice de modélisation consistait à répondre à une question du type *« quels sont les impacts (climatiques) d'une trajectoire définie ? »*. Cette approche s'inscrivait dans la démarche du GIEC avec le *Special report on emissions scenarios*[17] (SRES).

Cette démarche a évolué depuis 2008 avec le développement des *Representative Concentration Pathways* (RCPs) et des *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). La logique de l'exercice de modélisation consiste désormais davantage à répondre à une question du type *« quelle trajectoire permettra d'atteindre cet objectif ?»*[18], **orientant davantage l'usage des IAMs vers <u>l'évaluation des politiques de lutte contre le changement</u>**

[14] On remarque qu'à cette époque, il n'y a pas encore de prise en compte d'impacts climatiques.

[15] Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement

[16] En référence à l'anglais « well-to-wheel ».

[17] Special Report on Emissions Scenarios, GIEC, 2000

[18] Ou encore « *quels choix technologiques et quelles politiques sont nécessaires pour atteindre un "objectif" de réchauffement spécifique* »

climatique[19] **et l'aide à la décision**. L'administration américaine s'appuie également sur des IAMs pour évaluer le « coût social du carbone » (*Social cost of carbon, SCC*[20]) et évaluer certaines politiques fiscales et politiques de réduction d'émissions (Pindyck, 2017).

Certains chercheurs soulignent que l'évolution de l'approche du GIEC en matière de scénarios – *i.e.* passage d'une approche exploratoire (scénarios SRES : *quels sont les impacts d'une trajectoire définie ?*) à une approche normative (RCP et SSP : *quelle trajectoire permettra d'atteindre tel objectif ?*) – renforce le rôle et le poids des *IAMs* dans le processus d'élaboration des politiques climatiques[21] (Dooley et al., 2018).

Structure actuelle des IAMs

D'une manière très générale, un IAM est un modèle constitué de plusieurs sous-modèles (parfois appelés modules) **qui interagissent entre eux** (i.e. les résultats de l'un servent d'intrants à l'autre). Ces interactions sont la clef pour étudier les possibles conséquences en cascade entre les différentes composantes du système[22].

Les modules sont alimentés par un certain nombre de données d'entrée (variables exogènes et certains paramètres) généralement de nature socio-économique et technique (telles que la croissance démographique, la croissance économique, la disponibilité des ressources, ou les politiques d'atténuation du changement climatique, etc.) qui sont déterminées en amont dans le cadre de l'exercice de scénarisation (*i.e.* ne dépendent pas du modélisateur).

L'exécution du processus de résolution produit des résultats (évolution des variables endogènes) décrivant la transition du système énergétique, de l'utilisation des terres, des effets économiques d'atténuation du changement climatique ou encore des trajectoires d'émissions (IPCC, 2014).

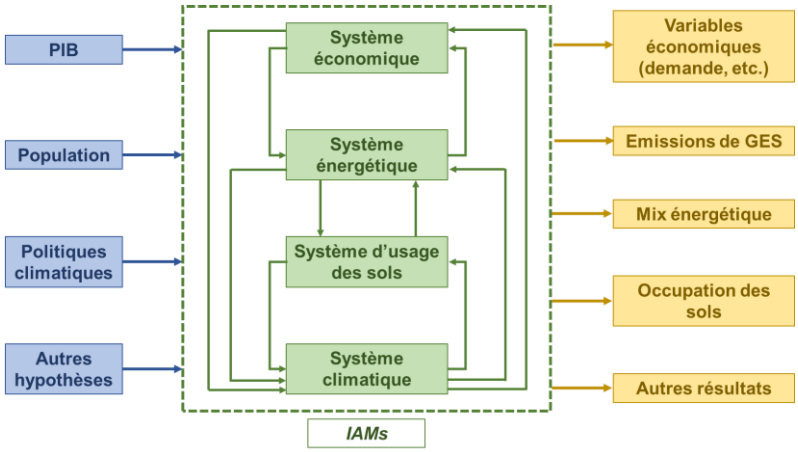


Figure 10 : Représentation simplifiée de la structure d'un modèle d'évaluation intégrée. CarbonBrief (2018)

Cette vision simplifiée ne doit pas masquer la complexité et la diversité des structures des IAMs. D'une manière générale, la construction d'un modèle est un exercice qui mobilise des ressources très importantes. Pour cette raison, les IAMs sont donc rarement construits *ex nihilo*.

Certains *IAMs* sont construits à partir d'un unique modèle intégrant des formulations simplifiées de modèles complets (par exemple le modèle *TIAM*[23] de l'*ETSAP*[24]).

[19] A partir de plusieurs jeux d'hypothèses (qualitatives et quantitatives) d'entrée, plusieurs centaines d'exercices de modélisation ont été réalisés à partir de différents IAMs. Leurs résultats alimenteront la réflexion sur les trajectoires d'atténuation et d'adaptation dans le cadre du 6ème rapport d'évaluation du GIEC (Riahi et al., 2017).

[20] Le coût social du carbone mesure le coût de l'externalité liée à la combustion d'une tonne de carbone et contribue à la détermination de la taxe carbone (ou d'une politique équivalente) qui devrait être imposée pour réduire les émissions de CO_2. […] Il est généralement calculé comme la valeur actualisée des réductions futures de PIB liées à l'émission d'une tonne de CO_2 (Pindyck, 2017)

[21] « *This shift from predictive to determinative places IAMs in a position of considerable authority regarding future climate policy, warranting an exploration of how modelled outputs are co-produced with policy demands, and which views gain authority.* » (Dooley et al., 2018)

[22] Par exemple une demande croissante de nourriture pourrait augmenter le besoin de terre à usage agricole, entrainant parallèlement des activités de déforestation, une augmentant des prix et des émissions de gaz à effet de serre.

[23] TIAM (TIMES Integrated Assessment Model) est la version globale de TIMES.

[24] ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program) est l'un des plus anciens programmes de collaboration technologique de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).

D'autres *IAMs* sont en réalité des agrégations de plusieurs modèles existants, relativement complets et liés entre eux. Par exemple, la structure du modèle d'évaluation intégrée développé par IIASA[25], dit *MESSAGE-GLOBIOM*[26], est composée de cinq modèles différents, complémentaires et spécialisés dans différents domaines :

- le modèle énergétique *MESSAGE ;*
- le modèle d'utilisation des terres *GLOBIOM ;*
- le modèle de pollution atmosphérique et de *gaz à effet de serre GAINS ;*
- le modèle macroéconomique agrégé *MACRO ;*
- le modèle climatique simple *MAGICC.*

Les modèles énergétiques sont très importants dans le fonctionnement des IAMs. Ce sont ceux qui permettent de déterminer l'évolution du système énergétique (production et consommation) et qui nourrissent le calcul des émissions de GES.

La construction des différents IAMs est donc très variable, notamment en ce qui concerne les modèles qui les constituent (leur structure interne, leur paradigme de modélisation, leur désagrégation sectorielle et géographique). Ainsi, même si les hypothèses d'entrée sont les mêmes, les résultats obtenus seront différents selon l'*IAMs* utilisé.

Il existe par ailleurs pour chaque *IAMs* de nombreuses options permettant un fonctionnement sous différents paradigmes de modélisation et méthodes de résolution.

Malgré cette grande diversité, il convient de souligner enfin que des consensus existent en ce qui concerne certains résultats des modélisations à partir d'*IAMs*. Par exemple, le fait que la mise en œuvre des NDC (Nationally Determined Contributions[27]) se sera pas suffisante pour limiter le réchauffement bien en-dessous de 2°C est validé par l'ensemble des simulations réalisées à partir de tous les *IAMs*.

III. Exemples d'IAMs et tentative de classement des modèles

Plusieurs organisations, principalement des centres de recherche, développent des *IAMs*. Six d'entre eux participent à la modélisation des *SSPs* qui seront les références des scénarios d'atténuation dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC :

- Le modèle *MESSAGE* (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) développé par IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis). Cf. Supra ;
- Le modèle *IMAGE* (Integrated Model to Assess the Global Environment), développé par PBL (Agence Néerlandaise pour l'environnement) ;
- Le modèle *AIM* (Asia-Pacific Integrated Model) développé par plusieurs centres de recherche en Asie ;
- Le modèle *GCAM* (Global Change Assessment Model (GCAM), développé par le PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) ;
- Le modèle *REMIND* (Regional Model of Investments and Development) développé par le PIK (Potsdam Institute for Climate Research) souvent couplé au modèle MAgPIE (Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment) qui intègre l'usage des sols ;
- Le modèle *WITCH* (World Induced Technical Change Hybrid) développé par plusieurs organisations italiennes. Ce modèle est souvent couplé au module d'occupation des sols GLOBIOM.

L'ensemble de ces *IAMs* utilisent le modèle climatique MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change) qui permet de transformer des émissions en concentration dans l'atmosphère et en

[25] International Institute for Applied Systems Analysis.

[26] Les deux composants les plus importants ont finalement été retenus pour désigner cet IAM.

[27] Les *Nationally Determined Contributions* (NDC) recouvrent les efforts déployés par chaque pays pour réduire ses émissions de GES et s'adapter aux impacts du changement climatique. L'Accord de Paris (article 4, paragraphe 2) exige de chaque Partie qu'elle prépare, communique et tienne à jour les contributions nationales successives qu'elle entend atteindre. Les Parties appliquent des mesures d'atténuation au niveau national en vue d'atteindre les objectifs de ces contributions. Voir UNFCCC.

forçage radiatif. Il permet aux *IAMs* de déterminer la trajectoire compatible avec une limitation de température par exemple.

Il existe beaucoup d'autres *IAMs* utilisés dans d'autres projets de recherche. On retrouve par exemple :

- Le modèle *IMACLIM*, développé par le CIRED ;
- Le modèle *MERGE* (Model for Evaluating Regional and Global Effects) développé par le PSI (Paul Scherrer Institute) ;
- Le modèle POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems) développé en Europe par le JRC IPTS[28] (EU Joint Research Centre at the Institute for Prospective Technological Studies).

Le classement des modèles est un exercice délicat, tant la diversité des modèles est importante. Le tableau suivant est donc nécessairement simplifié, général et approximatif. Il propose un classement des différents modèles « énergie-économie » (en jaune) selon leur approche initiale (*Bottom-up*/ *Top-down*) et leur méthode de résolution (Optimisation/Simulation).

Couplés à un modèle climatique, de manière totalement intégrée ou non (en bleu), - ainsi qu'à d'autres modèles spécialisés sur certains secteurs afin d'affiner leur représentation du monde (usage des sols par exemple) - ces modèles deviennent des IAMs (en vert).

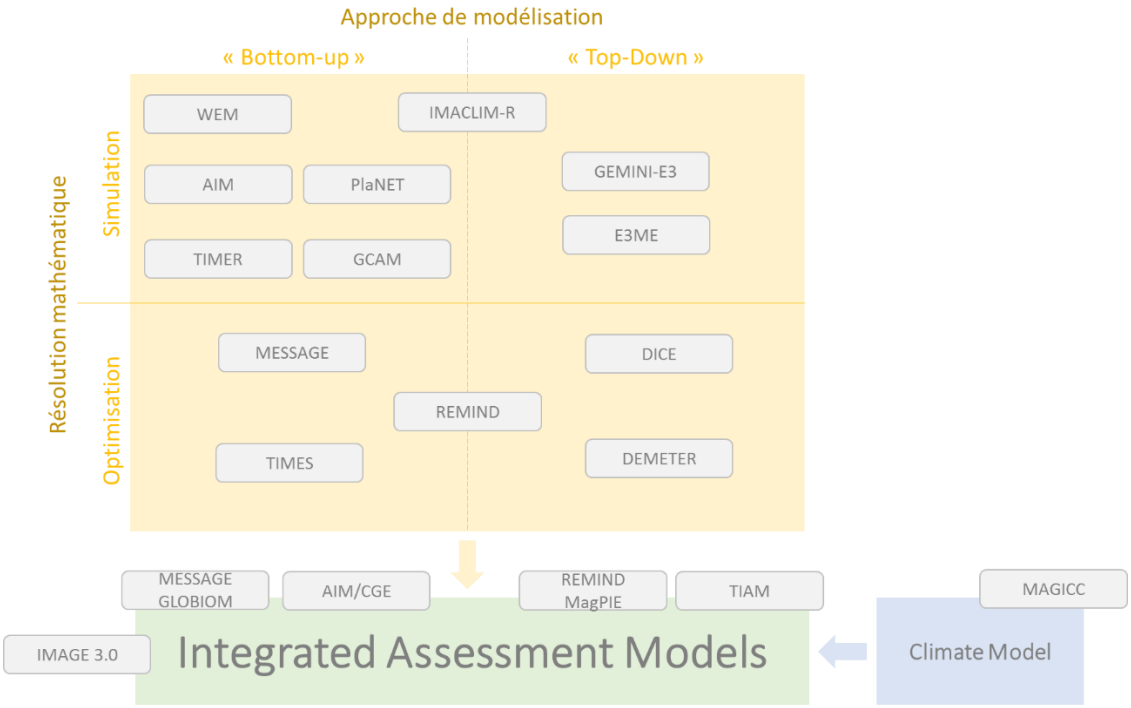


Figure 11 : Classification simplifiée des modèles selon l'approche de modélisation retenue. Cette représentation est illustrative et n'a pas pour vocation d'être exhaustive

A titre d'exemple le modèle d'évaluation intégrée IMAGE 3.0, qui a servi à la réalisation du scénario *marqueur SSP1 (Sustainable Road)*, utilise le modèle TIMER comme modèle pour l'offre/demande en énergie, qui est un modèle *Bottom-up* de simulation.

Plusieurs des IAMs et modèles évoqués précédemment font l'objet d'une description plus détaillée en annexe de ce document.

[28] Initialement développé par le LEPII-CNRS au début des années 1990. Ce modèle est depuis développé par Enerdata, LEPII et le JRC-IPTS

IV. Limites et discussions autour des IAMs

Les *IAMs* demeurent sujets à de nombreuses critiques. Celles-ci seront explicitées de manière générale avant d'introduire les limitations principales que cela peut impliquer sur l'interprétation des résultats liés à la représentation des systèmes économiques, énergétiques et climatiques.

Remarques générales

La complexité des IAMs limite la compréhension et l'interprétation des résultats.

Au fil de leur développement, les *IAMs* n'ont cessé de se complexifier pour tenter de représenter au mieux les interactions et rétroactions entre économie, énergie et climat.

Cette complexification entraine tout d'abord l'accroissement des données intervenant dans le modèle. Alors que la puissance de calcul disponible est de plus en plus importante[29], le développement des modèles se poursuit afin d'accroitre leur désagrégation sectorielle et géographique. Des modèles autrefois globaux sont maintenant régionalisés (le modèle de Nordhaus, DICE[30], devenu RICE[31] par exemple). Aujourd'hui, certains modèles comportent ainsi plusieurs millions de données.

Cependant, cette évolution se heurte parfois à l'absence de données d'entrée « à la bonne maille »[32], nécessaires pour paramétrer le modèle, qu'il faut alors compléter. L'ensemble de ces données doit par ailleurs être tenu à jour.

Cette complexification concerne aussi la structure même des modèles. Quelle que soit la structure de l'*IAM* (couplage de plusieurs modèles ou modèle complet mais simplifié), celui-ci demeure lié aux besoins pour lesquels le(s) modèle(s) qui le(s) constitue(nt) a(ont) été conçu(s) et qui ne sont pas nécessairement les mêmes.

Si les résultats de la modélisation varient d'un modèle à l'autre compte tenu de l'hétérogénéité des structures des *IAMs*, ces résultats doivent par ailleurs être interprétés en fonction des besoins auxquels l'usage de l'IAM devait répondre initialement.

La transparence de l'exercice de modélisation et des données utilisées limite également la compréhension et l'interprétation des résultats.

Les modèles reposent sur un grand nombre d'équations mathématiques relativement complexes. Ces équations demeurent difficiles à évaluer individuellement (certaines d'entre elles sont par exemple créées pour les besoins du modèle et sans fondement théorique ou empirique clair) ou globalement, notamment en ce qui concerne leurs interactions comme système complet (Pindyck et al., 2017).

D'une manière plus générale, s'il est possible de relever les principales caractéristiques sous-jacentes aux modèles utilisés[33], des marges de progression existent concernant la transparence et la clarté du processus de détermination de ces équations et paramètres, ainsi que de la structure des modèles. On peut ainsi regretter le manque de documentation claire, didactique et accessible permettant d'apprécier le fonctionnement et les performances des différents modèles (De Carolis et al., 2012).

Cet aspect est d'autant plus important que ces modèles semblent bénéficier d'une crédibilité « scientifique » auprès d'utilisateurs non-initiés, les incitant à appuyer sans démarche critique leurs analyses sur leurs résultats (Pindyck et al., 2017).

Enfin, il n'existe pas, à ce jour, de cadre d'évaluation des *IAMs* commun à l'ensemble de la communauté scientifique (Hache et Palle, 2019).

[29] Plus la puissance de calcul est importante, plus la taille des modèles peut être importante et intégrer un nombre important de données et d'équations.

[30] Dynamic Integrated model of Climate and the Economy.

[31] Regional Integrated model of Climate and the Economy.

[32] Certaines données économiques n'apparaissent par exemple pas dans les comptabilités nationales. L'accès aux données est une limitation majeure à nombreux exercices de modélisation.

[33] Certains modélisateurs publient le manuel décrivant le fonctionnement de leur modèle. Il est aussi possible de consulter le site de documentations mis en place par l'Integrated Assessment Modelling Consortium qui fournit des informations pour un certain nombre d'*IAMs*. Voir https://www.iamcdocumentation.eu/index.php/IAMC_wiki

Modèles socio-économiques

La modélisation des systèmes économiques a beaucoup progressé. Toutefois, compte tenu de la nature du sujet, plusieurs aspects demeurent à explorer et de nombreuses limites persistent. Ces aspects doivent être pris en compte dans l'analyse des résultats des exercices de modélisation.

Certaines équations et paramètres structurant le modèle sont déterminés par l'analyse économétrique de données historiques ou sont déterminés arbitrairement.

L'absence de cadre d'évaluation de la structure des modèles offre au modélisateur une liberté relativement importante dans le choix des paramètres et de la forme des équations utilisées pour décrire les relations socio-économiques.

C'est par exemple le cas des relations déterminant le « bien-être » du consommateur (*social welfare*) utilisées dans certains modèles (notamment *Top-down*). Ce « bien-être » est une variable déterminée à partir de fonctions d'utilité dont la forme et le paramétrage font l'objet d'incertitudes et de discussions[34] (Pindyck et al., 2017).

L'usage de données historiques conduit par ailleurs les modèles à surestimer à quel point l'avenir ressemblera au passé récent (Paltsev, 2017). Si dans certains cas, certaines relations socio-économiques observées n'ont pas de raison de changer de forme à l'avenir (notamment les relations dérivant des flux physiques), d'autres pourraient évoluer[35].

D'une manière plus générale, certains chercheurs indiquent que les connaissances scientifiques en matière de climat et les principes économiques sont en réalité *« limités sur la façon dont ils peuvent informer et déterminer la formulation des équations incluses dans les modèles ou leur paramétrage »* (Pindyck et al., 2017).

A hypothèses d'entrée égales, la détermination de ces équations et paramètres, qui diffèrent d'un modèle à l'autre, explique en partie les écarts observés dans les résultats obtenus à partir de différents modèles.

La valeur du taux d'actualisation a une influence très importante sur les résultats. Le taux d'actualisation détermine la temporalité des investissements, et particulièrement les investissements dans la transition énergétique dont les bénéfices sont attendus à long terme[36]. En d'autres termes, il détermine la valeur des « pertes de PIB » futures liées aux politiques climatiques ou aux impacts du changement climatique.

Il n'y a pas aujourd'hui de consensus général sur la valeur du taux d'actualisation, et des arguments recevables peuvent être avancés en faveur d'un taux d'actualisation faible ou élevé. A nouveau, le modélisateur dispose d'une grande souplesse dans le choix du taux d'actualisation (Pindyck, 2017)

Sa détermination peut être exogène (MESSAGE, GCAM, IMAGE), ou endogène[37] (ReMIND-MAGPIE, WITCH) particulièrement dans la transition énergétique. Dans le cadre de la contribution des IAMs aux travaux du GIEC (SSP), la valeur des taux d'actualisation est publiée et de l'ordre de 5 %[38]. Cette valeur peut être considérée comme relativement élevée[39].

Le processus de détermination et la valeur du taux d'actualisation devrait donc faire l'objet d'une transparence et d'une clarté importante.

La représentation économique des *IAMs* comporte des limites. Pour la plupart des modèles, l'exercice de modélisation repose sur l'atteinte d'un équilibre macro-économique (général ou partiel) ce qui conduit à optimiser l'emploi des ressources (capital, production, revenus). Les agents (individus, Etats, entreprises, etc.) sont considérés rationnels (ils agissent chacun indépendamment, à partir d'une information complète, pour maximiser

[34] La capacité de consommation (i.e. comment le consommateur utilise ses revenus) a un poids (très) important dans ce type de fonction. Cette représentation a des conséquences sur la façon dont les modes de vie sont représentés.

[35] Les déterminants des comportements des consommateurs pourraient évoluer à l'avenir. Or, dans certains modèles, de plus hauts revenus signifient systématiquement un mode de consommation convergeant avec celui des consommateurs occidentaux.

[36] Les coûts d'une politique de réduction des GES sont engagés dès maintenant, mais la plupart des avantages se feront sentir dans un avenir lointain. Un taux faible mettra en valeur les bénéfices futurs alors qu'un taux élevé les écrasera.

[37] Généralement déterminé à partir de la règle de Keynes-Ramsey.

[38] Voir SSP public database.

[39] A titre de comparaison, le rapport du « Interagency working group on social cost of carbon », EPA (2016), considère une valeur moyenne de 3%. Voir aussi Pindyck (2017), qui considère qu'un taux faible est de l'ordre de 1%.

leur bien-être (consommateurs) ou leurs profits (producteurs)) et les quantités de biens et services qu'ils consomment sont considérés comme mesurables.

En conséquence, il n'existe pas dans ces modèles de capacités inutilisées ou de gaspillage de ressources. Ceci entraîne inévitablement des écarts potentiellement significatifs avec la réalité, dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats.

La majorité des *IAMs Bottom-up* vise à déterminer une demande en énergie finale (*demand-driven model*) à partir de variables exogènes. La croissance de l'économie (PIB), de la population et les hypothèses sur le mode de vie (taux d'urbanisation par exemple) sont les principaux déterminants de la demande en bien et service et donc *in fine* en énergie finale. Ces variables sont, dans la grande majorité des cas, exogènes. Leur valeur a donc une influence très importante sur les résultats des exercices de modélisation. Les hypothèses utilisées sont généralement fondées sur les projections des principales organisations dans ces domaines (OCDE, FMI, division de la population de l'ONU etc.).

Alors que les prix des énergies (notamment fossiles) jouent un rôle important dans la plupart des modèles, leur détermination reflète rarement la réalité. Dans certains modèles, le prix des énergies est une variable exogène (ex : TIAM). Dans d'autres, ces prix sont déterminés par un équilibre d'offre/demande (ex : WEM, POLES). Or, la formation des prix des énergies, en particulier fossiles, n'obéit pas à une telle loi[40]. De nombreux facteurs financiers, géopolitiques, interviennent également et ne sont que peu pris en compte.

Le système financier n'est représenté dans aucun modèle. Si la modélisation du système financier revêt une complexité importante, son absence entraine plusieurs conséquences, parmi lesquelles la non-prise en compte de l'instabilité des marchés et son impact sur l'économie (cf. crise financière de 2008). Le prix de nombreuses commodités est par ailleurs déterminé sur les marchés financiers (cf. marchés des futures pour le pétrole). Le changement climatique est enfin une menace pour la stabilité du système financier, notamment par la dépréciation d'actifs liés aux énergies fossiles[41] (*Stranded Assets*). Cet aspect a été souligné par Mark Carney, directeur de la Banque d'Angleterre[42].

L'impact du changement climatique

L'impact du changement climatique sur le système économique est le défi qui se pose aux modélisateurs. A ce jour, très peu de modèles prennent en compte les conséquences physiques du changement climatique sur le système économique.

Cela signifie que pour la plupart des modèles, notamment ceux sur lesquels s'appuient certains travaux du GIEC, les projections socio-économiques et énergétiques comportent des limites et particulièrement dans le cas où les émissions de GES ne seraient pas réduites. Cela conduit également à discriminer les investissements visant à atténuer les effets du changement climatique dans le processus de modélisation.

Lorsque ces impacts sont pris en compte, une (ou plusieurs) fonction dite de « dommage », est généralement utilisée. Une fonction de dommage permet de lier une (ou plusieurs) grandeur caractéristique de l'externalité (ex : la température ou les émissions de CO_2) à une ou plusieurs grandeurs économiques (ex : le niveau de PIB ou sa croissance).

Ces fonctions de dommage sont cependant difficiles à utiliser et sujettes à une incertitude très élevée. D'une part, les connaissances théoriques sur leur formulation sont aujourd'hui limitées, et d'autre part, l'absence de données historiques complexifie leur calibrage[43]. A ce stade, lorsque des fonctions dommage sont utilisées dans un IAM, ces fonctions et leurs paramètres sont définis relativement arbitrairement par le modélisateur (Pindyck, 2013).

[40] Il n'existe pas de lien observable entre le volume de pétrole consommé et le prix du baril.

[41] La dépréciation d'un actif signifie que celui-ci a perdu de sa valeur. Par exemple, une centrale à charbon peut perdre de manière très rapide sa valeur si une politique publique interdit la production d'électricité à base de charbon. Les actifs peuvent être des immobilisations, des stocks, des créances ou des titres, par exemple.

[42] Voir Discours de Mark Carney au Lloyds de Londres en septembre 2015

[43] « *DICE model uses the simple inverse quadratic damage function of equation (1) while PAGE model uses a more complex and disaggregated set of damage functions. But these damage functions are typically calibrated to give GDP losses for moderate temperature increases (5°C or less) that match the "common wisdom," and thus are very similar. The projected GDP losses for very large temperature increases (6°C or more) do differ significantly across the models*. » (Pindyck, 2017)

Par construction, les modèles ignorent l'occurrence d'un choc « climatique ». Cet aspect, qui concerne les conséquences socio-économiques d'une élévation très importante des températures (5°C ou plus), est naturellement en partie lié à l'absence de fonction dommage, mais aussi au fait que le corpus de connaissances sur ce sujet demeure limité (Pindyck, 2013).

Modèles énergétiques

Tout comme pour le système économique, la représentation des systèmes énergétiques et climatiques peut conduire à certaines discussions.

Les modèles énergétiques reposent sur un très grand nombre de paramètres techniques dont la détermination est parfois approximative. Cet aspect peut être lié à l'absence de données faisant consensus. Par ailleurs, ces modèles, qui ne cessent de se complexifier, font intervenir un grand nombre de disciplines techniques dont les modélisateurs ne peuvent pas être experts. Il est ainsi possible que certaines approximations en découlent.

Il est cependant difficile de traiter cette incertitude tant le nombre de paramètres est élevé, en particulier dans les modèles technologiques (de type *Bottom-up*).

L'évolution du mix énergétique est relativement hétérogène selon les modèles et repose sur certaines données historiques ainsi que sur certains partis pris du modélisateur. Les projections sont fondées sur des données historiques de coûts (CAPEX et OPEX) et de performances de certaines technologies, par prolongation des tendances. Comme pour certains paramètres économiques, cela conduit à représenter un futur très ressemblant au passé récent (Paltsev, 2017). Ces éléments demeurent néanmoins très incertains et dépendent également de facteurs socio-économiques et techniques (évolutions des normes, ruptures, etc.).

Certains modèles (ex : MESSAGE[44]) incluent des mécanismes de contrôle de la diffusion des technologies afin d'éviter les surreprésentations dans le mix énergétique. Le paramétrage de ces dispositifs demeure à la main du modélisateur et influence les résultats.

La diffusion des technologies au niveau géographique dépend en effet de paramètres à l'échelle locale difficiles à prendre en compte (culture, compétences, etc.). Certains modèles intègrent ces contraintes (MESSAGE, IMAGE), mais celles-ci reposent sur des choix plus ou moins bien documentés de la part du modélisateur, qui peuvent influencer les résultats.

L'ensemble de ces aspects conduit à une relative hétérogénéité parmi les différents modèles en ce qui concerne l'évolution du mix énergétique dans le temps et sa composition (*i.e.* les technologies de production d'énergie mobilisées).

L'effet rebond n'est que marginalement pris en compte, en particulier dans les modèles *Bottom-up*. Cette grandeur caractérise la façon dont certains gains (énergétiques ou environnementaux) obtenus grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique, sont limités, voire annulés, par une augmentation des usages. Un tel effet peut être direct[45] ou indirect[46]. Alors que l'amélioration de l'efficacité énergétique est un levier très souvent activé pour diminuer les émissions de GES (par une baisse de la consommation d'énergie à niveau de service égal) dans les exercices de modélisation, la sous-estimation d'un tel effet pourrait entrainer des divergences importantes avec la réalité.

Par construction, les modèles *Bottom-up* (équilibre partiel) ne prennent pas en compte l'effet rebond indirect (Binswanger 2001).

[44] Voir « *Technology diffusion* », guide utilisateur du modèle MESSAGE : « *An important factor in this context that influences technology adoption in MESSAGE are technology diffusion constraints. Technology diffusion in MESSAGE is determined by dynamic constraints that relate the construction of a technology added or the activity (level of production) of a technology in a period t to construction or the activity in the previous period t-1* »

[45] L'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bien ou service entraine l'augmentation de la consommation de ce bien ou service

[46] L'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bien ou service entraine l'augmentation de la consommation d'autres biens ou services (investissements de l'agent dans un secteur différent)

Lorsqu'il est pris en compte, cet effet est généralement maitrisé sous la forme d'une taxe carbone additionnelle[47] qui vise à relever le prix des carburants (notamment lorsque celui-ci baisse avec la demande).

L'effet rebond serait plus important dans les pays en développement que dans les pays de l'OCDE, pour lesquels il demeure significatif[48] (Gillingham, 2015). Cet effet fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches et discussions.

Certains modèles mobilisent des technologies de rupture[49], notamment de captage et stockage du CO_2. Si ce choix appartient aussi en partie au scénariste, le recours à de telles technologies facilite dans certains cas la convergence de l'exercice de modélisation, mais entretient l'illusion d'une transition sans effort ni contrainte, notamment en ce qui concerne les modes de vie et de consommation.

Autres remarques

Le périmètre de modélisation des émissions de GES n'est pas complet[50] dans certains modèles. Dans le *World Energy Model* de l'AIE par exemple, les émissions issues de l'usage des sols sont considérées des variables exogènes (issues sur des projections de l'OCDE).

La prise en compte de la disponibilité des ressources non-énergétiques est limitée. Alors que la plupart des modèles conduisent, dans le cadre d'une limitation des émissions de GES, à l'électrification des usages énergétiques, plusieurs études indiquent que les besoins en ressources minérales pourraient significativement augmenter (Hache et al., 2019). Ces études suggèrent également que les réserves de matières premières disponibles et les capacités de transformation pourraient ne pas être suffisantes pour couvrir les besoins futurs.

La prise en compte de ces aspects (disponibilité, stocks, flux, transformation, usage de matières premières minérales) apparait limitée dans les modèles aujourd'hui (Boubault et al., 2018), notamment au niveau régional. Cela peut conduire notamment le modèle à surestimer le recours à certaines technologies consommatrices de telles ressources et à marginaliser les investissements dans des filières de recyclage.

Certains modèles (ex : IMAGE) prennent en compte ce type de ressources (ressources minérales, eau) en introduisant des boucles de rétroactions sur certaines variables.

[47] Voir par exemple le World Energy Model 2018.

[48] De l'ordre de 10% à 20%. Voir Gillingham, 2015

[49] Les technologies de rupture sont des technologies aujourd'hui très coûteuses dont on considère qu'elles se déploieraient très rapidement à l'avenir si elles devenaient rentables.

[50] Au sens des gaz du protocole de Kyoto.

V. Conclusion

L'émergence des problématiques économie-énergie-climat s'est accompagnée d'un essor des modèles visant à représenter la complexité des interactions entre ces trois systèmes. De plus en plus détaillés techniquement, sectoriellement et géographiquement, ces modèles sont sous-jacents à la plupart des scénarios énergie-climat réalisés aujourd'hui, sur lesquels de nombreux acteurs s'appuient, ou pourraient s'appuyer, pour éclairer leurs décisions.

Leur utilisation comporte de nombreuses limites qu'il est nécessaire de considérer en analysant les résultats produits. Pour certains chercheurs, ces limites sont structurelles et induisent en erreur les décideurs (Pindyck, 2017). Pour d'autres, les modèles sont perfectibles et demeurent la seule alternative disponible pour évaluer les politiques climatiques (Weyant, 2017).

La complexité et la multidisciplinarité sous-jacente aux exercices de modélisation soulignent également le besoin fondamental d'organiser l'ensemble de ces travaux avec des équipes pluridisciplinaires incluant spécialistes des sciences physiques, économiques et sociales.

D'une manière générale, la diversité des concepts et la complexité des structures des modèles constituent clairement une barrière pour la bonne compréhension et le bon usage des résultats par les non-initiés. Il existe des marges d'amélioration importantes en matière de transparence et de clarté de la part des modélisateurs, tant sur la philosophie des modèles (mode de résolution, paradigmes de modélisation), leur structure interne (structure mathématique, paramètres, etc.) que sur leur adéquation avec les questions auxquelles les utilisateurs souhaitent répondre.

Pour la plupart des scénarios énergie-climat disponibles, le modélisateur est aussi scénariste. Ces acteurs sont donc les interlocuteurs privilégiés avec lesquels les entreprises pourraient discuter afin de faciliter leur usage de tels scénarios et modèles.

VI. Références

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux de Lavergne, J-G., Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., Mathy, S., Menanteau, P., Safa, H., Teissier, O., Topper, B., (2014), "Les scénarios de transition énergétique de l'ANCRE", Revue de l'Energie, n°619, Mai-juin, pp.189-210.

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux de Lavergne, J-G., Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., Mathy, S., Menanteau, P., Safa, H., Teissier, O., Topper, B., (2014), "Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique", 115p.

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux De Lavergne, J.-G., Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., S., Menanteau, S. Mima, F. Thais. (2017). « Scénario "loi de transition énergétique pour la croissance verte" de l'ANCRE : focus sur le mix énergétique ». HAL Post-Print, hal01569649.

Assoumou E., (2006), Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français, Thèse Mines ParisTech.

Binswanger, M., (2001), Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?, Ecological Economics 36 (2001) 119 – 132.

Boubault A, Kang S, Maïzi N, (2018) "Closing the TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR) Raw Materials Gap with Life Cycle Inventories. Journal of Industrial Ecology", Wiley, In press, ⟨10.1111/jiec.12780⟩. ⟨hal-01652739v2⟩

Bouvard, F., Hache, E., Querini, F., Tchung-Ming S., (2017), "Recommandations pratiques pour l'ACV prospectives. Références et exemples dans le domaine de l'énergie", Rapport SCORELCA, janvier 2017, 106p.

DeCarolis, J. F., Hunter, K., Sreepathi, S., (2012). The case for repeatable analysis with energy economy optimization models. Energy Economics 34 (6), 1845–1853.

Gielen D, Taylor M. (2007). Modeling industrial energy use: the IEAs energy technology perspectives. Energy Econ;29:889–912

Gillingham, Kenneth & Rapson, David & Wagner, Gernot. (2015). The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy. Review of Environmental Economics and Policy. 10. rev017. 10.1093/reep/rev017.

Dooley, K., Christoff, P., & Nicholas, K. (2018). Co-producing climate policy and negative emissions: Trade-offs for sustainable land-use. Global Sustainability, 1, E3. doi:10.1017/sus.2018.6

Drouet L., Haurie A., Labriet M., Thalmann P., Vielle M., Viguier L., (2005). A Coupled Bottom-Up / Top-Down Model for GHG Abatement Scenarios in the Housing Sector of Switzerland, in R. Loulou, J.-P. Waaub, and G. Zaccour (Ed.), Energy and Environment, Springer, New York, p27-61

Hache, E., Seck G-S., Simoen, M., Bonnet, C., Carcanague, S.,(2019). Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport. Applied Energy, vol 111, p489-504.

Hache, E., Palle, A. (2019), "Renewable energy source integration into power networks, research trends and policy implications: A bibliometric and research actors survey analysis", *Energy Policy*, 124, Janvier, pp.23-35.

Helgesen P. I., Lind A., Ivanova O., Tomasgard A., (2018). Using a hybrid hard-linked model to analyze reduced climate gas emissions from transport, Energy 156, p196-212

IPCC, 2014. Climate Change (2014). Mitigation of Climate Change - Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf

Matarasso P., (2003). Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique, Annales des Ponts et Chaussées.

Meadows D. L., Meadows D. H., Randers J., Behrens W., (1972). The limits to growth, rapport du Club de Rome.

Nicolas C., (2016), Robust energy and climate modeling for policy assessment. Thèse de doctorat Université Paris Ouest-Nanterre.

Paltsev S., (2017). Energy scenarios: the value and limits of scenario analysis. WIREs Energy Environ. 6: null. doi: 10.1002/wene.242

Pindyck, R. S., (2013). Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? Journal of Economic Literature, vol 51, p860–872.

Pindyck, Robert. (2017). The Use and Misuse of Models for Climate Policy. Review of Environmental Economics and Policy. 11. 100-114. 10.1093/reep/rew012.

Riahi K. et al., (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, vol 42, p153–168.

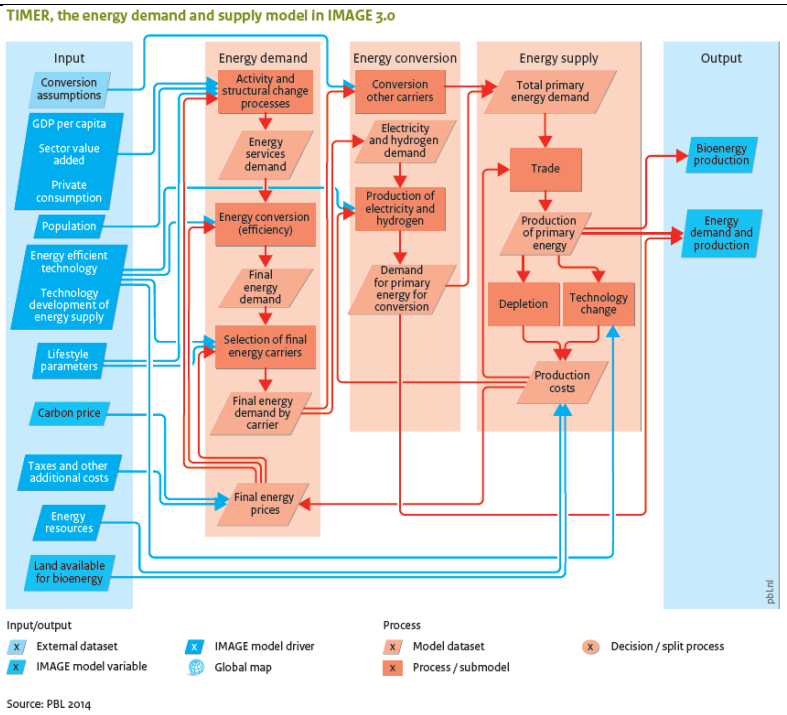
Weyant, J. (2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. Review of Environmental Economics and Policy. 11. 115-137. 10.1093/reep/rew018.

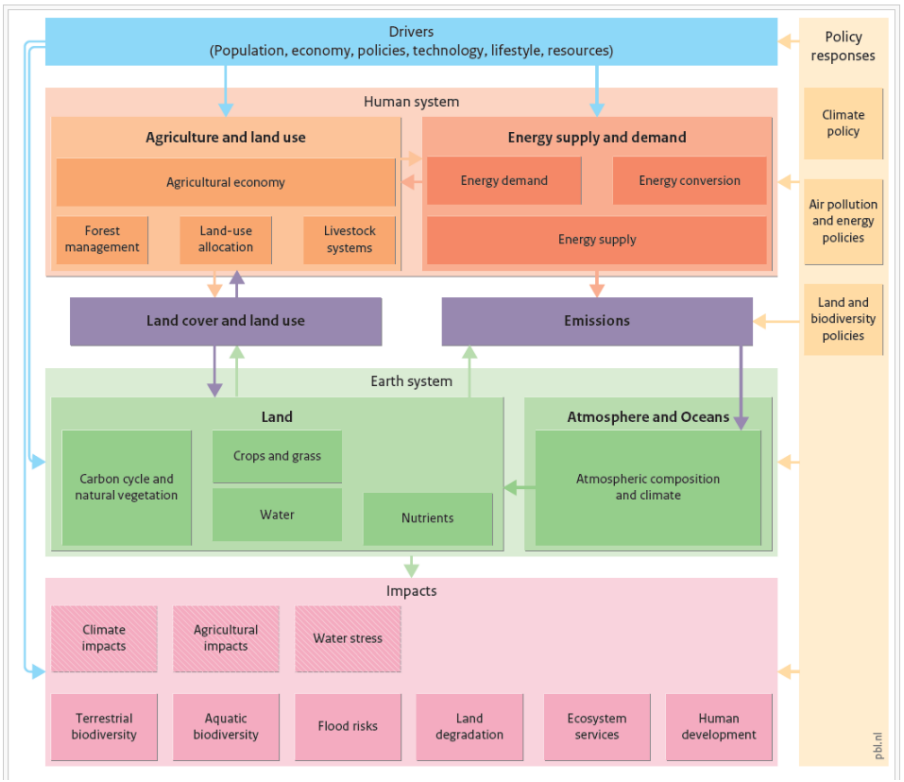
Wilson et al., (2019). The potential contribution of disruptive low-carbon innovations to 1.5°C climate mitigation, Energy Efficiency, vol 12, p423-440.

VII. Annexe : Caractéristiques de certains modèles

IMAGE (PBL)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**IMAGE** (Integrated Model to Access the Global Environment)
Concepteur du modèle (institution)	PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, modèle développé dans les années 1980
Approche de modélisation et méthode de résolution	Objectif : Explorer les dynamiques à long terme et les répercussions des changements globaux résultant de l'interaction des facteurs socio-économiques et environnementaux. Il s'agit d'un modèle de simulation sans anticipation. IMAGE comprend deux systèmes principaux : le système socio-économique qui décrit le développement des activités humaines à long terme (à travers des modules demande/offre énergie, agriculture et usage des sols) et le système Terre qui décrit les changements dans l'environnement naturel (où les différents modules sont : cycle du carbone, culture et pâturage, eau, nutriments, composition atmosphérique et climat). Ceux-ci sont représentés dans la structure schématique du modèle. Il existe une version simplifiée du module énergie/climat (FAIR module) pouvant être exécuté en amont de la modélisation pour obtenir des données pour les simulations de politique climatique. Les principaux impacts étudiés ne sont pas économiques.
Variables clés	Les facteurs exogènes qui vont traduire les différents scénarios sont : - démographie (à travers par exemple des projections de population, etc.), - développement économique (PIB par habitant, etc.), - politique et gouvernance (régimes commerciaux, tarifs douaniers et barrières commerciales, politiques environnementales, etc.), - développement technologique (dans le système énergétique, agricole, forestier), - culture et mode de vie, - disponibilité des ressources naturelles.
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Il s'agit d'un modèle global et multirégional, divisé en 26 régions. Il permet de travailler sur un pas de temps annuel ou de 5 années. L'année de référence est 1971 (calibration sur la période 1971-2005) et le modèle peut s'exécuter à 2050 ou 2100.
Modélisation de la demande en services énergétiques	Au niveau le plus agrégé l'activité économique est décrite en termes de PIB par habitant. Dans IMAGE 3.0, le modèle d'offre/demande d'énergie est TIMER (voir ci-dessous). Les variables économiques sont utilisées comme drivers de la demande d'énergie.

<table>
<tr>
<td></td>
<td>


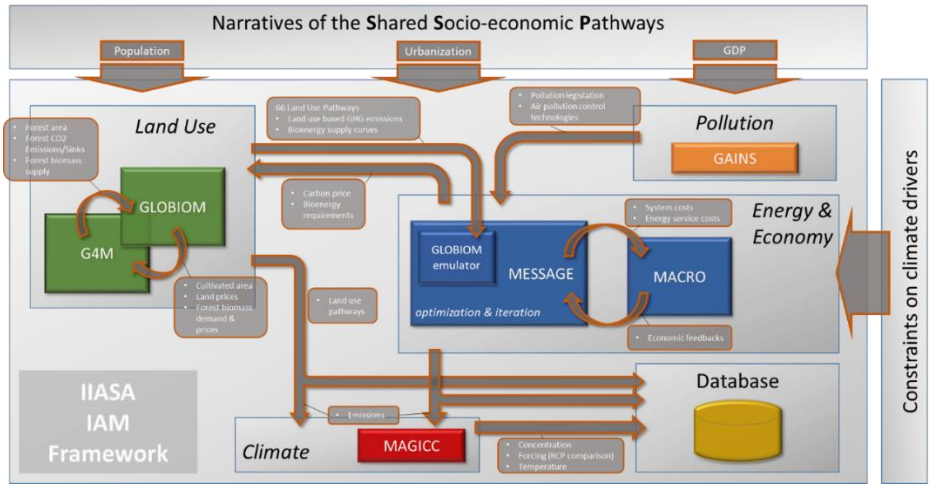
</td>
</tr>
<tr>
<td>Structure globale du modèle</td>
<td>
IMAGE a une structure modulaire, les composants peuvent être reliés directement au code du modèle ou bien être issus de soft-linking (les modèles fonctionnent de manière indépendante avec échange de données par l'intermédiaire de fichiers de données). L'architecture est donc flexible.


</td>
</tr>
<tr>
<td>Exemples d'autres scénarios</td>
<td>IMAGE est utilisé pour le scénario Marqueur SSP1 – Sustainable Road et le scénario P2 du rapport 1.5 du GIEC.</td>
</tr>
</table>

construits à partir de ce modèle	Le modèle est largement documenté et utilisé aujourd'hui. Il a par exemple été utilisé pour explorer des scénarios d'atténuations globaux pour les rapports du GIEC (2007, 2014). IMAGE a notamment servi à l'élaboration du scénario RCP2.6 et à la coordination des travaux liés à l'élaboration globale des scénarios SSP. *Van Vuuren D. P. et al., 2012. A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities, Global Environmental Change, vol. 22*
Pour aller plus loin	*Integrated Assessment of Global Environmental Change with Model Description and policy Applications IMAGE 3.0, Model description and policy applications, Elke Stehfest, Tom Kram, 2014.* Publication disponible sur www.pbl.nl/en

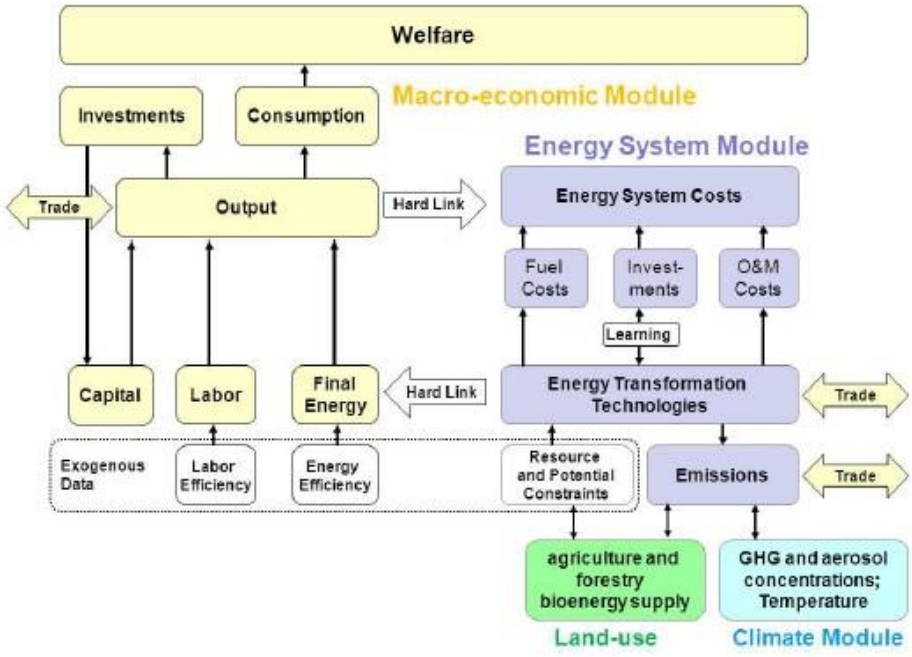
MESSAGE-GLOBIOM (IIASA)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**MESSAGE-GLOBIOM** (Integrated Model to Access the Global Environment) - MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) - GLOBIOM (Global BIOsphere Management)
Concepteur du modèle (institution)	International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA, USA), modèle développé dans les années 1980.
Approche de modélisation et méthode de résolution	**Objectif** : Optimiser le système énergétique afin qu'il puisse répondre aux besoins énergétiques spécifiés au coût le plus faible possible. La structure du modèle repose sur une combinaison de cinq modules différents : - le modèle énergétique MESSAGE, - le modèle d'utilisation des terres GLOBIOM, - le modèle de pollution atmosphérique et de gaz à effet de serre GAINS, - le modèle macroéconomique agrégé MACRO - le modèle climatique simple MAGICC. Les cinq modèles fournissent des données d'entrée et itèrent entre eux au cours d'un cycle typique d'élaboration de scénarios. Les deux plus gros composantes sont les modules MESSAGE et GLOBIOM d'où l'appellation du modèle d'évaluation intégré. C'est un modèle d'optimisation de type *bottom-up* avec une désagrégation technologique fine. MESSAGE peut à la fois fonctionner avec anticipation parfaite sur tout l'horizon temporel, anticipation limitée (par exemple, deux ou trois périodes dans le futur) ou de façon myope, en optimisant une période à la fois.
Variables clés	Les demandes en services énergétiques de base sont fournies de manière exogène à MESSAGE, bien qu'elles puissent être ajustées de manière endogène en fonction des prix de l'énergie en utilisant la liaison MESSAGE-MACRO. Pour le module MACRO les principales variables du modèle sont - le stock de capital, - la main-d'œuvre disponible - les intrants énergétiques, qui déterminent ensemble la production totale d'une économie selon une fonction de production imbriquée de CES (Constant Elasticity of Substitution).
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Le modèle MESSAGE-GLOBIOM a une couverture mondiale, avec une subdivision en 11 régions (qui correspondent aux 11 régions initialement présente dans le modèle énergétique MESSAGE). Il existe, en plus de ces 11 régions, une région mondiale pour les échanges. MESSAGE modélise l'horizon temporel de 1990 à 2110 par pas de temps de 5 et 10 ans. Les quatre premières périodes, jusqu'en 2005, sont entièrement calibrées. GLOBIOM modélise l'horizon temporel de 2000 à 2100 par pas de temps de 10 ans (2000 = année de référence).
Modélisation de la demande en services énergétiques	Il y a sept demandes de services énergétiques comprenant : - Thermique résidentiel/commercial - Résidentiel/commercial spécifique

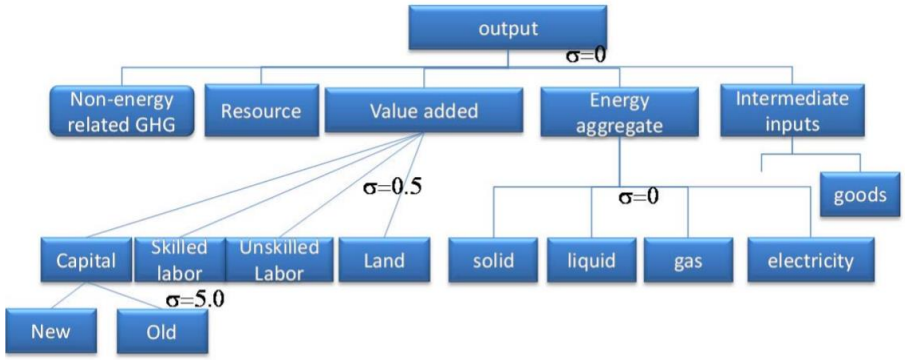
	- Thermique industriel - Spécifique à l'industrie - Matières premières industrielles (hors énergie) - Transport - Biomasse non commerciale. Le générateur de scénarios utilise les données historiques du PIB par habitant et de la consommation finale d'énergie au niveau national, ainsi que les projections du PIB et de la population, pour extrapoler les sept demandes de services énergétiques dans le futur.
Structure globale du modèle	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	MESSAGE-GLOBIOM est utilisé pour le scénario **marqueur SSP2 – Middle of the road** et dans les **scénarios P3** du rapport 1.5 du GIEC On peut retrouver l'usage du modèle GLOBIOM pour la modélisation de l'approvisionnement en biomasse à l'échelle mondiale dans des scénarios sur les bioénergies développés conjointement par IIASA et WWF. *Kraxner et al., 2013. Global bioenergy scenarios – Future forest development, land-use implications, and trade-offs, Biomass and Bioenergy, Vol. 57.* MESSAGE a joué un rôle majeur dans les rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) ; il a notamment fourni des scénarios marqueurs des RCPs (Representative Concentration Pathways). Il a également été à la base d'une partie de du Global Energy Assessment (GEA, 2012). *Edenhofer et al., Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC (2014)*
Pour aller plus loin	https://data.ene.iiasa.ac.at/message-globiom/ Fricko et al., The marker quantification of the shared socioeconomic pathway 2: a middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 2016.

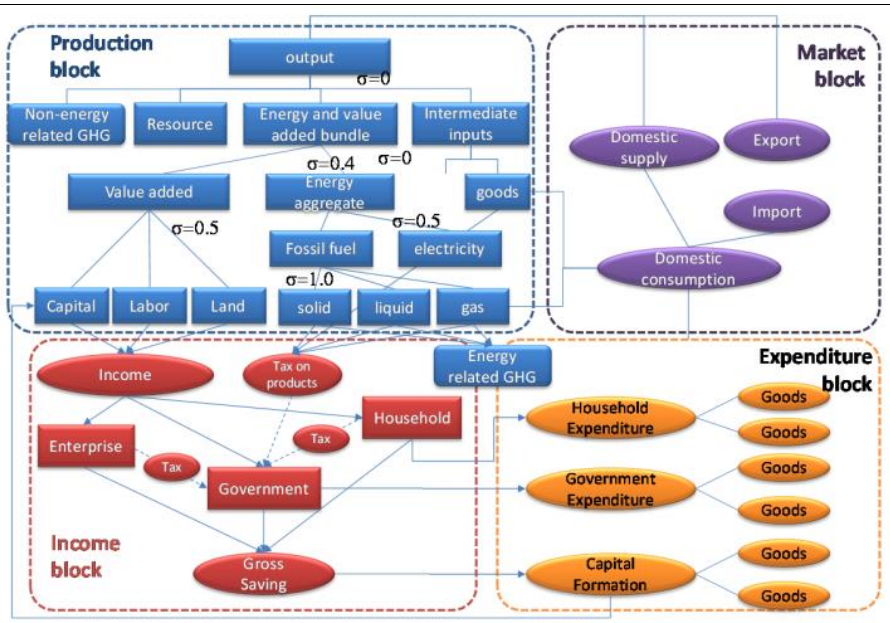
REMING-MAgPIE (PIK)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**REMIND-MAgPIE** - REMIND (Regional Model of Investment and Development) - MAgPIE (Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment)
Concepteur du modèle (institution)	Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK, Germany)
Approche de modélisation et méthode de résolution	La structure du modèle d'évaluation intégré REMIND-MAgPIE consiste dans le couplage d'un modèle énergie-économie-climat (REMIND) et d'un modèle d'utilisation des terres (MAgPIE). Le modèle REMIND repose sur une approche *bottom-up* du système énergétique reliée à un modèle macroéconomique à anticipation parfaite. Quant à MAgPIE il s'agit d'un modèle d'optimisation de l'utilisation des terres reposant sur un équilibre partiel. La fonction objective de MAgPIE est de répondre à la demande agricole de dix régions du monde en minimisant les coûts globaux et en tenant compte des contraintes biophysiques et socio-économiques. Le modèle climatique MAGICC est utilisé pour évaluer les impacts climatiques dus aux émissions en provenance de REMIND-MAgPIE
Variables clés	Les variables clés sont la population et le PIB par habitant
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Le modèle couvre 11 régions géographiques et peut s'exécuter jusqu'à l'année 2100.
Modélisation de la demande en services énergétiques	L'énergie finale de référence dans REMIND est étalonnée en fonction des projections du modèle EDGE2 (Energy Demand Generator, version 2). EDGE2 intègre des projections économétriques fondées sur les tendances historiques et des hypothèses de scénario concernant l'évolution à long terme. Le modèle EDGE2 couvre six vecteurs énergétiques (biomasse, charbon, électricité, liquides, gaz, chauffage urbain) et six secteurs (résidentiel, commercial, industrie, utilisation non énergétique, agriculture et pêche et autres). Les régressions économétriques s'appuient sur la relation historique entre la demande de vecteurs énergétiques par habitant dans chaque secteur et le PIB par habitant.
Structure globale du modèle	Le schéma ci-dessous représente le modèle REMIND (hard link entre le module macroéconomique et le module du sysème énergétique). Celui-ci peut être couplé avec le modèle MAgPIE (soft-linking)

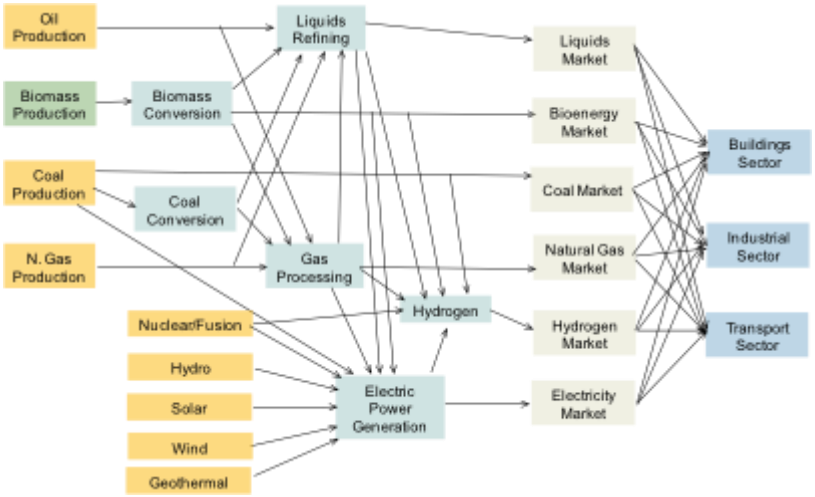
	
Exemple d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	ReMIND-MAgPIE est utilisé pour le sscénario **marqueur SSP5 - Fossil-fueled Development** et le **scénario P4** du rapport 1.5 du GIEC. ReMIND-MAgPIE a par exemple été utilisé pour évaluer le déploiement de technologies dans différents scénarios climatiques. Bauer N. et al., 2010. Technologies, Policies and Economics of Global Reductions of Energy Related CO2 Emissions, an Analysis with ReMIND Klein D., 2011. Bio-IGCC with CCS as a long-term mitigation option in a coupled energy-system and land-use model, Energy Procedia, Vol. 4.
Pour aller plus loin	Kriegler et al., 2016. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century https://www.pik-potsdam.de/research/transformation-pathways/models/remind

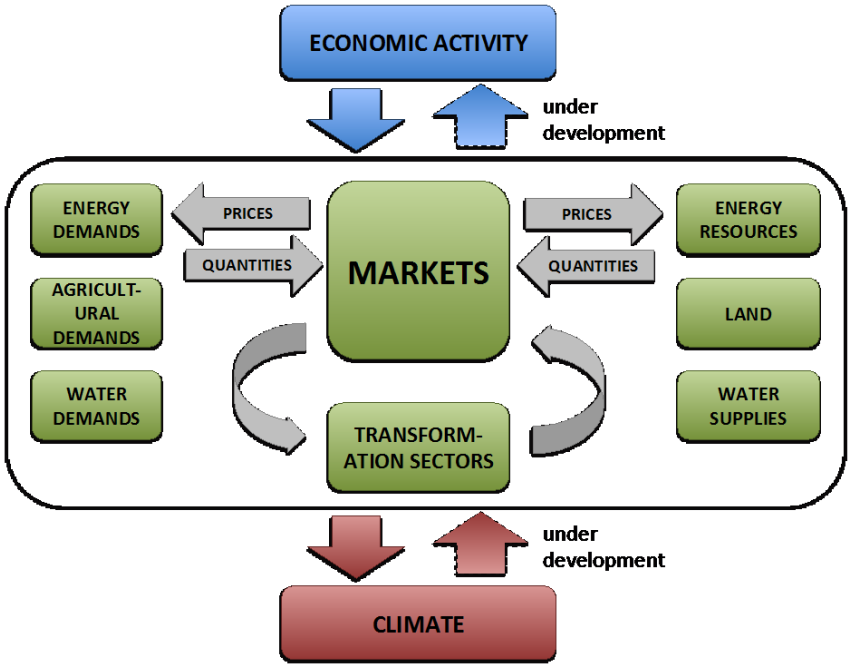
AIM/CGE (NIES)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**AIM/CGE** (Asia-Pacific IntegratedAssessment/Computable General Equilibrium)
Concepteur du modèle (institution)	National Institute for Environmental Studies (NIES, Japan)
Approche de modélisation et méthode de résolution	Le modèle AIM/CGE a été développé pour analyser l'atténuation du changement climatique et son impact. Les secteurs énergétiques et agricoles sont désagrégés. Le modèle consiste en 4 blocs correspondant à la production (fonctions de production), la distribution des revenus (entreprises/gouvernement/ménages), la consommation finale (biens) et le marché des biens et services. AIM/CGE est un modèle d'équilibre général dynamique de type récursif avec un pas de temps annuel. Le module climatique MAGICC a été connecté à travers un un *softlink* afin d'obtenir les impacts climatiques (changement de la température, forçage radiatif). Néanmoins, le modèle lui-même n'a pas de rétroaction de la composante climatique.
Variables clés	Les variables clés sont la population et le PIB par habitant
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Le modèle est subdivisé en 17 régions avec une désagrégation en 42 classifications industrielles : - 10 secteurs de production dans l'agriculture, - 20 dans le secteur de production énergétique - 12 dans les secteurs de consommation finale (secteurs de la chimie, du textile, du papier, etc.)
Modélisation de la demande en services énergétiques	La représentation schématique ci-dessous représente la structure de production des secteurs de la transformation d'énergie. 
Structure globale du modèle	Représentation de la structure de AIM/CGE pour une région :

	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	AIM/CGE est utilisé pour le scénario **marqueur SSP3 – Regional rivalry**. AIM/CGE a été utilisé pour le scénario Representative Concentration Pathway 6.0 (RCP6). *Masui et al., 2011. An emission pathway for stabilization at 6 Wm−2 radiative forcing*
Pour aller plus loin	https://www.iamcdocumentation.eu/index.php/References_-_AIM-CGE Fujimori et al., 2016. SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways Fujimori, 2012. AIM/CGE [basic] manual.

GCAM (PNNL)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**GCAM**
Concepteur du modèle (institution)	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL, USA), développé à partir des années 1980 (premier couplage avec un cycle du carbone en 1984 !).
Approche de modélisation et méthode de résolution	Le modèle d'évaluation du changement global (GCAM) est un modèle global qui représente le comportement et les interactions entre cinq systèmes : le système énergétique, l'eau, l'agriculture et l'utilisation des terres, l'économie et le climat. C'est un modèle d'équilibre partiel où économie-énergie-agriculture-utilisation des terres-climat et leurs interactions sont néanmoins représentés dans un système unique (résolution simultanée sur la même période). Le GCAM est un modèle récursif dynamique, ce qui signifie que les décideurs ne connaissent pas l'avenir lorsqu'ils prennent une décision aujourd'hui. Après avoir résolu chaque période, le modèle utilise ensuite l'état du monde qui en résulte, y compris les conséquences des décisions prises au cours de cette période - comme l'épuisement des ressources les évolutions stock de capital et les changements dans le paysage - et passe ensuite à la prochaine étape temporelle et effectue le même exercice. GCAM est un modèle de simulation *bottom-up*.
Variables clés	Les principales hypothèses externes comprennent les facteurs socioéconomiques (la population et le PIB), les caractérisations technologiques (le coût, les rendements, les besoins en eau, etc.) et les hypothèses stratégiques, y compris les politiques liées aux mesures climatiques (contraintes liées aux émissions par exemple) et non climatiques.
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Le système économie-énergie fonctionne avec une désagrégation mondiale à 32 régions, les terres sont agrégées en 235 sous-régions alors que la commodité eau est suivie via une agrégation en 384 bassins hydrologiques à travers le monde.
Modélisation de la demande en services énergétiques	Le système énergétique est une représentation détaillée des sources d'approvisionnement en énergie, des modes de transformation de l'énergie et des demandes de services énergétiques tels que le transport de passagers et de marchandises, l'utilisation industrielle de l'énergie et les demandes de services énergétiques résidentiels et commerciaux. Les demandes en services énergétiques sont déterminées par le système macroéconomique (population, productivité) 

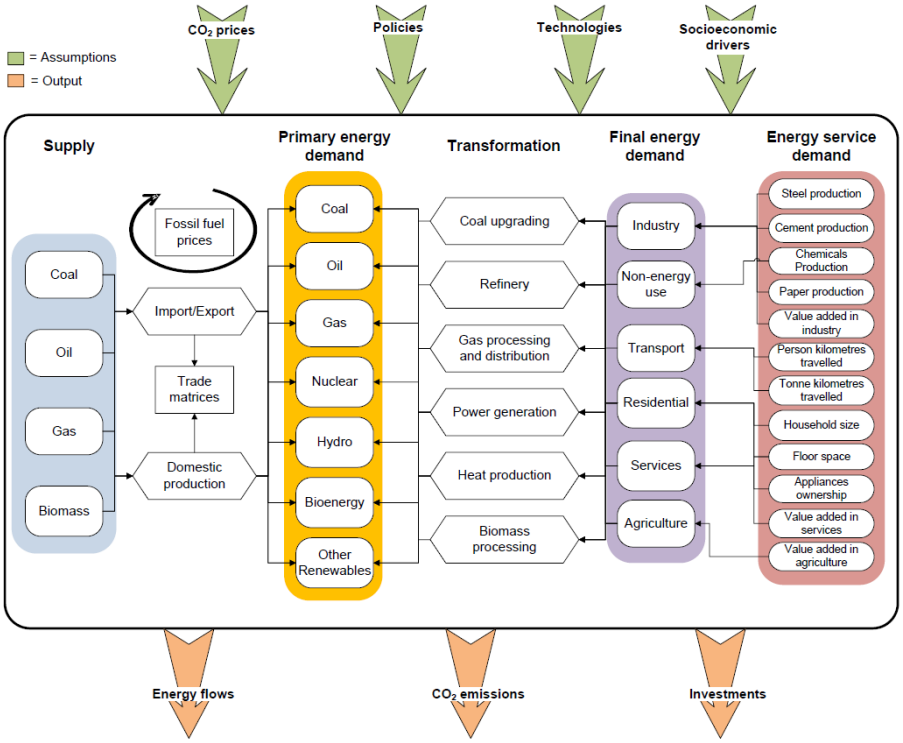
Structure globale du modèle	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	GCAM est utilisé pour le scénarios **marqueur SSP4 - Inequality – A Road Divided** Il existe également une version du modèle GCAM-USA où sont développés de nombreux scénarios à l'échelle régionale. *Scott Michael J., 2014. Evaluating sub-national building-energy efficiency policy options under uncertainty: Efficient sensitivity testing of alternative climate, technological, and socioeconomic futures in a regional integrated-assessment model,* *Energy Economics, Volume 43*
Pour aller plus loin	Calvin et al., 2016. The SSP4 : A world depending inequality http://jgcri.github.io/gcam-doc/

World Energy Model (IEA)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**WEM** (World Energy Model)
Concepteur du modèle (institution)	IEA (International Energy Agency)
Approche de modélisation et méthode de résolution	Le WEM est un modèle de simulation couvrant l'approvisionnement en énergie, la transformation de l'énergie et la demande énergétique. Les déterminants de la demande sont estimés économétriquement à partir des données historiques et des déterminants socioéconomiques. Les fonctions Logit et Weibull sont utilisées pour déterminer la part des technologies en fonction de leurs coûts spécifiques. Le WEM est implémenté dans le logiciel de simulation Vensim
Variables clés	Les principaux drivers socio-économiques exogènes sont la croissance économique et la démographie. Les taux d'accroissement de la population pour chaque région WEM sont basés sur différentes projections de fécondité moyenne contenues dans le rapport du United Nations Population Division. Les hypothèses de croissance économique à court et à moyen terme reposent en grande partie sur celles établies par l'OCDE, le FMI et la Banque mondiale.
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	La version actuelle du WEM couvre les développements énergétiques jusqu'en 2040 dans 25 régions. En fonction du module spécifique du WEM, des pays sont également modélisés individuellement : 12 pays en demande, 101 dans l'offre de pétrole et de gaz et 19 dans l'offre de charbon.

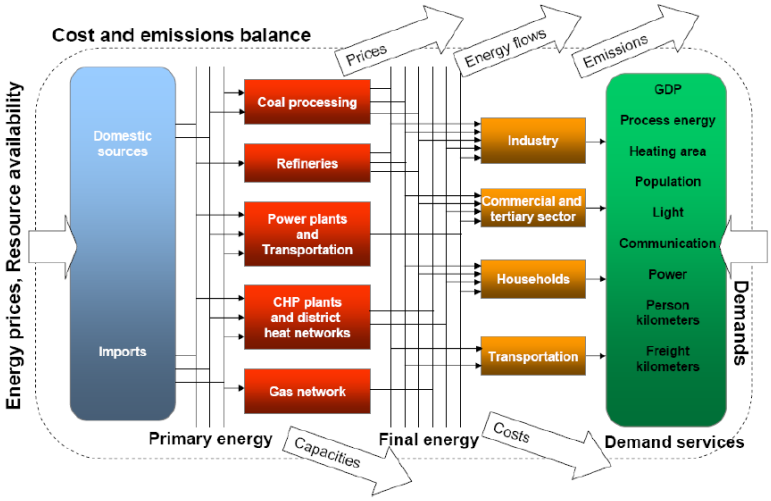
Modélisation de la demande en services énergétiques	Les déterminants de la demande sont estimés économétriquement à partir des données historiques et des déterminants socioéconomiques.
	Les modules suivants sont inclus dans le modèle énergétique mondial :
	- Le module de production d'énergie
	- Le module raffinage et commerce pour relier l'offre et la demande de pétrole et de gaz.
	- Pour la composante de la demande d'énergie, il existe :
	  ○ un module Industrie
	  ○ un module Bâtiments
	  ○ un module de transport

Structure globale du modèle	

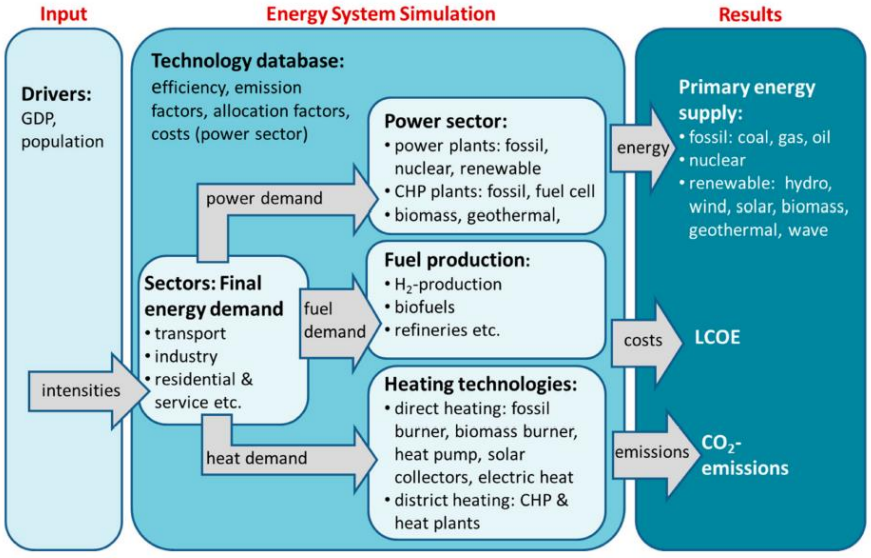
	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	Le WEM est utilisé pour les **scénarios du World Energy Outlook (SDS, NPS, CPS)** Un autre scénario étudié avec le WEM est le scénario « Futur is electric ». Il s'agit d'un scénario élaboré spécifiquement pour le WEO-2018, qui met l'accent sur l'électrification. Il part des conditions du Scénario NPS (New policies scenario) et explore les principaux domaines d'incertitude pour la demande future d'électricité.
Pour aller plus loin	World Energy Model documentation, 2018 version https://www.iea.org/media/weowebsite/energymodel/WEM2018.pdf

TIMES (IEA)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**TIMES** (The Integrated Markal-EFOM System)
Concepteur du modèle (institution)	IEA (International Energy Agency)
Approche de modélisation et méthode de résolution	C'est un générateur de modèles économiques pour les systèmes énergétiques locaux, nationaux, multirégionaux ou mondiaux, qui fournit une base riche en technologies pour représenter la dynamique de l'énergie sur un horizon temporel multi périodique Ce modèle technologique est à approche ascendante (approche *Bottom-Up*) Ce modèle utilise une méthode d'optimisation. Le modèle TIMES vise à fournir des services énergétiques à un coût global minimal (plus précisément à une perte minimale de l'excédent total) en réalisant simultanément les décisions concernant l'investissement et le fonctionnement de l'équipement, l'approvisionnement en énergie primaire et le commerce de l'énergie pour chaque région
Variables clés	Dans TIMES, un scénario complet se compose de quatre types d'intrants exogènes : - Demande de services énergétiques (en utilisant des facteurs macroéconomiques (PIB, population) via un autre modèle, c'est-à-dire un modèle descendant ou d'autres sources de référence), - La composante offre (pour définir un certain potentiel de la ressource disponible à un coût particulier...), - Un cadre politique (pour être en mesure d'évaluer les impacts de certaines limitations, objectifs liés au système énergétique), - La description d'un ensemble complet de technologies (la définition des paramètres techniques et économiques supposés pour la transformation des ressources primaires en services énergétiques)
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	Le périmètre peut se réaliser au niveau local, national, multirégional ou mondial du système énergétique. Le modèle est adapté à la mise en œuvre et à l'analyse des politiques énergétiques et environnementales, qui peuvent être représentées avec précision grâce à l'explicitation de la représentation des technologies et des carburants dans tous les secteurs de l'économie. Pour l'ETP (Energy Technology Perspectives) de l'AIE, tous les secteurs suivants ont été définis : - Secteur de transformation des énergies primaires - Secteur industriel - Secteur des transports - Bâtiments (résidentiels et commerciaux/services) L'horizon temporel est divisé en un nombre de périodes choisi par l'utilisateur, chaque période contenant un nombre d'années (éventuellement différent).
Modélisation de la demande en services énergétiques	La demande de services énergétiques dépend de facteurs macroéconomiques exogène (dont PIB, population).

Structure globale du modèle	
Exemple d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	TIMES est utilisé pour **les scénarios de l'Energy Technology Perspectives (2DS, B2DS, RTS)**. Le modèle est également utilisé pour les scénarios d'analyses du CAS (Centre d'Analyse Stratégique) Syrota, J. 2007. Perspectives énergétiques de la france à l'horizon 2020-2050. Technical report, Centre d'Analyse Stratégique
Pour aller plus loin	TIMES Documentation and Demo Models https://iea-etsap.org/index.php/documentation

MESAP-E[R] (IER-Stuttgart)

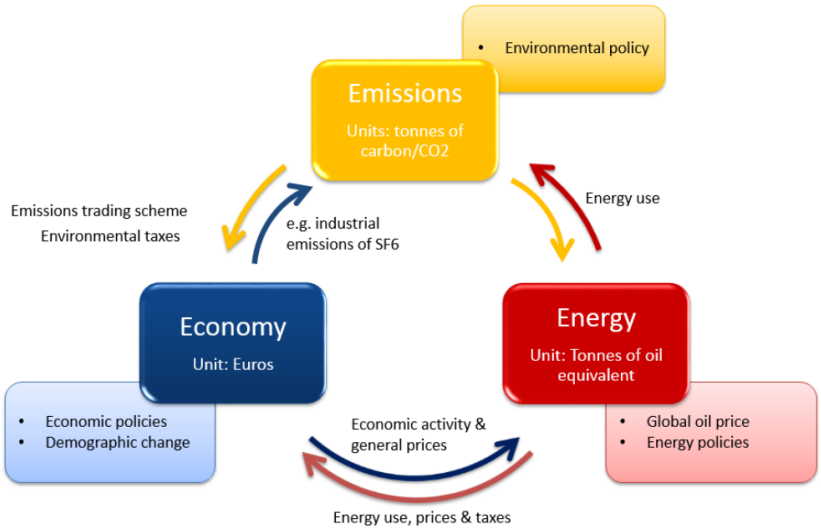
Facteurs	Description
Nom du modèle	**MESAP-E[R]** (dérivé du MESAP/PlaNet) ((Modular Energy System Analysis and Planning Environment/ Planning Network)
Concepteur du modèle (institution)	IER-Stuttgart (Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy à l'Université de Stuttgart)
Approche de modélisation et méthode de résolution	MESAP est une boîte d'analyse de systèmes énergétiques et PlaNet (Planning Network) est un module de réseau linéaire pour MESAP qui est conçu pour analyser et simuler la demande, l'offre, les coûts et les impacts environnementaux des systèmes énergétiques locaux, régionaux et mondiaux. PlaNET est un modèle de simulation énergétique, qui fait partie du progiciel de planification énergétique et environnementale MESAP
Variables clés	Les déterminants de la consommation d'énergie tels que le PIB et la population sont exogènes pour la simulation.
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	15 versions de Mesap PlaNet ont été publiées et comptent environ 20 utilisateurs. La portée du réseau peut varier d'une seule évaluation technologique à un modèle complexe de systèmes énergétiques très désagrégés à l'échelle régionale et sectorielle.
Modélisation de la demande en services énergétiques	
Structure globale du modèle	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	Le modèle MESAP est notamment utilisé pour le **scénario [R]evolution** de Greenpeace. Le système MESAP a été développé dans de nombreux pays. Les scientifiques, les agences gouvernementales, les consultants en planification énergétique et environnementale l'ont utilisé et MESAP a prouvé sa pertinence dans plusieurs cas.

	- Le scénario à 2 °C - Une perspective énergétique mondiale durable (Krewitt, W., Simon, S., Graus, W., Teske, S., Zervos, A. & Schäfer, O., The 2 °C scenario-A sustainable world energy perspective. Politique énergétique, 35(10), pp. 4969-4980, 2007) - Transformation vers un système d'énergie renouvelable au Brésil et Mexique-Options technologiques et structurelles pour l'Amérique latine (Simon et al, 2018, Energies 11, 907 ; doi:10.3390/fr1104040907) - Comparer les stratégies d'efficacité énergétique en Slovénie (Al-Mansour, F., Merse, S. & Tomsic, M., Comparison of energy efficiency strategies in the industrial sector of Slovenia. Énergie, 28(5), pp. 421-440, 2003) - en Autriche pour une analyse coût-efficacité des mesures de réduction des émissions (Voss et al., 1994, IER Stuttgart, MESAP III:A Tool for Energy Planning and Environmental Management History and New Developments) - au Nigeria pour une étude nationale de planification énergétique (Voss et al., 1994, IER Stuttgart, MESAP III : A Tool for Energy Planning and Environmental Management History and New Developments). - en Iran pour une analyse régionalisée des perspectives du système d'approvisionnement énergétique (Voss et al., 1994, IER Stuttgart, MESAP III : A Tool for Energy Planning and Environmental Management History and New Developments) - en Turquie pour la planification de l'expansion de l'électricité (Voss et al., 1994, IER Stuttgart, MESAP III : A Tool for Energy Planning and Environmental Management History and New Developments)
Pour aller plus loin	Transformation towards a Renewable Energy System in Brazil and Mexico—Technological and Structural Options for Latin America (Simon et al., 2018, Energies 11, 907; doi:10.3390/en11040907)

E3ME (Cambridge Econometrics)

Facteurs	Description
Nom du modèle	**E3ME** (Econometric Energy-Environment-Economy Model)
Concepteur du modèle (institution)	La première version du modèle E3ME a été construite par une équipe européenne dans le cadre d'une succession de contrats dans les programmes de recherche JOULE/THERMIE et de la Commission européenne. Le modèle appartient à Cambridge econometrics qui en assure la maintenance.
Approche de modélisation et méthode de résolution	E3ME combine les caractéristiques d'un modèle sectoriel annuel à court et moyen terme estimé par des méthodes économétriques formelles et certaines des méthodes des modèles d'équilibre général calculable, fournissant une analyse du mouvement des résultats à long terme pour les indicateurs clés E3 en réponse aux changements politiques. Il s'agit essentiellement d'un modèle de simulation global et dynamique qui est estimé par des méthodes économétriques. Il est composé de 3 modules : énergie, environnement et économie.
Variables clés	Pour le module économique, les facteurs clés comprennent les facteurs démographiques et la politique économique (y compris les taux d'imposition, la croissance des dépenses publiques, les taux d'intérêt et les taux de change) qui sont exogènes. Pour l'énergie les facteurs exogènes sont les prix mondiaux du pétrole et la politique énergétique (y compris la réglementation des industries énergétiques). En ce qui concerne la composante environnementale, les facteurs exogènes comprennent des politiques telles que la réduction des émissions de SO_2 au moyen de filtres en fin de cycle provenant des grandes installations de combustion.
Périmètre et niveau de désagrégation du modèle	E3ME couvre 53 régions du monde, avec une désagrégation sectorielle détaillée (niveau NACE[51] 2) dans chacune d'elles et des projets annuels jusqu'en 2050. Cette désagrégation sectorielle se compose de 69 secteurs économiques en Europe et 43 secteurs pour le reste du monde. Elle est fréquemment appliquée au niveau national, en Europe et au-delà, ainsi que pour une analyse politique plus large (européenne et mondiale).
Modélisation de la demande en servies énergétiques	L'évolution de la demande en matières premières est prise en compte via des intensités matières, l'activité économique, leurs prix et les données technologiques
Structure globale du modèle	Sa spécification économétrique répond aux préoccupations relatives aux modèles macroéconomiques conventionnels et fournit une base empirique solide pour l'analyse. Le module économie fournit au module d'énergie des mesures de l'activité économique et du niveau général des prix ; le module énergie détermine ensuite le niveau de la consommation d'énergie et les prix des principaux vecteurs, qui sont transmis au module environnement et sont également renvoyés au module économie

[51] Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne

	
Exemples d'autres scénarios construits à partir de ce modèle	E3ME est utilisé notamment pour le **scénario Remap de l'IRENA.** Le modèle est également utilisé par certains scénarios énergétiques développés par la Commission européenne.
Pour aller plus loin	Cambridge Econometrics https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2016/09/E3ME-Manual.pdf

Auteurs

Emmanuel HACHE – IFP Energies nouvelles

Economiste et Prospectiviste – + 33 (0) 6 13 37 93 98 | emmanuel.hache@ifpen.fr

Emmanuel HACHE est économiste et travaille sur les questions de prospective énergétique au sein d'IFP Energies nouvelles. Il est le porteur du projet GENERATE (Géopolitique des Energies Renouvelables et Analyse Prospective de la Transition Energétique), qui a reçu un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) en 2017. Il est Docteur en Sciences économiques de l'Université Paris I et diplômé en Géopolitique et Prospective. Il travaille depuis 2014 en tant que responsable de projets dans le Département Économie & Évaluation Environnementale à IFP Energies Nouvelles sur les questions de prospective énergétique. Il enseigne la prospective, l'économie de l'énergie ou l'économie des matières premières dans de nombreux établissements. Il est directeur de recherche associé à l'IRIS et chercheur associé à Economix (EconomiX-CNRS, Université Paris Nanterre).

Marine SIMOËN – IFP Energies nouvelles

Ingénieure de recherche en économie– + 33 (0) 6 03 26 93 18 | marine.simoen@ifpen.fr

Diplômée de Chimie ParisTech et de l'Université Pierre et Marie Curie (profil environnement et énergie), Marine a également suivi le programme « Énergie et marché » de l'IFP School. Elle exerce aujourd'hui en tant qu'ingénieure économiste au sein de la direction « Économie et veille » d'IFP Énergies nouvelles.

Gondia Sokhna SECK – IFP Energies nouvelles

Spécialiste modélisation des systèmes énergétiques – + 33 (0) 7 53 15 46 71 | gondia-sokhna.seck@ifpen.fr

Gondia Sokhna SECK travaille en tant que spécialiste modélisation et analyses des systèmes énergétiques au sein du département Economie et Analyses Environnementales d'IFP Energies Nouvelles. Il est titulaire d'un doctorat en économie et d'une spécialisation en optimisation des systèmes énergétiques de l'école des Mines ParisTech, d'un diplôme d'ingénieur Génie Atomique (Sciences et Technologies du Nucléaire) de l'INSTN au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) et d'un diplôme d'ingénieur en Chimie et Physique de l'Ecole Supérieure de Physiques et Chimie Bordeaux. Il a également travaillé environ 5 ans chez EDF R&D (Thèse CIFRE) et Mines ParisTech (Post-Doc) pour évaluer l'impact des politiques de maîtrise de la demande d'énergie dans l'industrie, la fiabilité du secteur électrique et la planification du déploiement technologique à partir de modèles de systèmes énergétiques "Bottom-up". Après sa thèse CIFRE avec EDF R&D et post-doc, il a également travaillé pendant 3 ans à la Commission Européenne sur les questions énergétiques. Il y a contribué à l'élaboration et à l'évaluation de la planification énergétique et des politiques climatiques à long terme de l'UE à travers le développement d'outils de modélisation

Romain GRANDJEAN – THE SHIFT PROJECT

Chef de projet – + 33 (0) 6 03 26 93 18 | michel.lepetit@global-warning.fr

Romain Grandjean est Chef de Projet pour The Shift Project depuis septembre 2016. Diplômé de l'école des Arts et Métiers ParisTech et de l'IFP School, il a auparavant travaillé au sein d'un groupe pétrolier pendant plusieurs années. Il est le chef de projet et l'auteur principal des deux études réalisées par The Shift Project en partenariat avec l'Afep : « Analyse du risque climat : acteurs, méthodologie, perspectives » (2018) et « Scénarios énergie-climat : évaluation et mode d'emploi » (2019).

IFPEN

IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un organisme public de recherche, d'innovation et de formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement. De la recherche à l'industrie, l'innovation technologique est au cœur de son action.

IFPEN intervient dans quatre grands domaines :

- Mobilité durable,
- Energies renouvelables
- Hydrocarbures responsables
- Climat et environnement.

Contacts : Emmanuel Hache, IFPEN
+33 (0)1 47 52 67 49 | emmanuel.hache@ifpen.fr

The Shift Project

The Shift Project est un think tank qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, notre mission est d'éclairer et influencer le débat sur la transition énergétique en Europe. Nos membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité. *The Shift Project* a fondé l'Observatoire 173 en 2016.

Contacts : Jean-Noël Geist, The Shift Project
+ 33 (0) 6 95 10 81 91 | jean-noel.geist@theshiftproject.org