

Contributions des modèles DICE et RICE à une meilleure compréhension des modèles à intégration assignée (Integrated Assessment Models, IAM)

Abdourakhmane NDIAYE, Arnaud DIEMER, Ganna GLADKYKH

CERDI, Université Clermont Auvergne

Résumé

Notre papier entend examiner l'histoire et la pratique actuelle des modèles d'évaluation intégrée (IAM) articulant énergie, économie et climat à travers la famille des modèles DICE et RICE. Il commence par examiner le problème émergent du changement climatique. Ensuite, il présente un bref aperçu de la montée en puissance des IAM dans les années 1970 et au-delà. Enfin, il entend faire une exposition détaillée d'un modèle IAM, la famille de modèles DICE / RICE, qui a valu à William Nordhaus, l'obtention du Prix Nobel de Sciences économiques en 2018.

Mots-clés

Changement climatique, DICE, modèles d'évaluation intégrée, Nordhaus, RICE

L'historique Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), signée par 154 pays lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) et qui s'est tenue au Brésil en juin 1992, avait pour objectif central la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, considérée par toutes les Parties, comme une dangereuse interférence anthropique avec le système climatique. L'article 2 de cette convention stipulait qu'il convenait « *d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement au changement climatique, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique durable puisse se poursuivre d'une manière durable* » (United Nations, 1992, article 2). Toutefois, il ne précisait ni la signification opérationnelle du terme "ingérence anthropique dangereuse", ni le moyen de détecter le risque de survenue de cette interférence, ni les mesures qu'il convenait d'appliquer pour l'éviter.

Dans leur volonté de rendre opérationnel la dite-Convention, la communauté scientifique a proposé une synthèse disponible des connaissances scientifiques, techniques, économiques et sociopolitiques sous la forme de modèles à évaluation intégrée. L'évaluation intégrée se distingue de la recherche pure par son but, qui est d'éclairer les politiques et la prise de décision plutôt que de faire progresser les connaissances scientifiques. Cependant, plus l'ensemble des connaissances devant être

synthétisées pour éclairer l'action politique est large, plus les problèmes intellectuels à résoudre pour fournir une évaluation efficace et pertinente sont importants.

Le degré d'intégration d'une évaluation donnée dépend de la question ou de la décision prise. Le changement climatique nécessite peut-être plus que toute autre question de politique générale, d'une évaluation intégrée. Prendre des décisions rationnelles sur le changement climatique nécessite de connaître un grand nombre de processus interdépendants, à commencer par les activités humaines qui affectent les émissions de gaz à effet de serre et s'étendent aux processus atmosphériques, océaniques et biologiques. On pourrait faire le même constat pour les processus climatiques et radiatifs qui lient les concentrations atmosphériques au climat mondial et régional, ou encore les processus écologiques, économiques et sociopolitiques qui lient le changement de climat à des études d'impacts. Tout progrès dans la compréhension et la résolution d'un problème complexe requiert une capacité à interpréter, intégrer, réconcilier, organiser et communiquer les connaissances dans tous les domaines, c'est-à-dire d'effectuer une évaluation intégrée.

Bien qu'il y ait eu dans le passé, des exemples significatifs d'évaluations intégrées concernant les problèmes environnementaux - à l'image du projet américain CIAP (Grobeck et al, 1974) ou des études européennes sur les pluies acides dans le modèle RAINS (Alcamo et al, 1990) - le niveau actuel des publications en matière d'évaluation intégrée sur le changement climatique est sans précédent et mobilise des équipes de recherche sur la scène internationale. Pour le prix Nobel d'économie 2018, William Nordhaus, « *faire face aux défis du réchauffement climatique est une tâche ardue pour les scientifiques et les économistes, qui doivent comprendre les changements futurs, et pour les décideurs, qui doivent choisir en fin de compte les politiques pour équilibrer les risques et les coûts. Gérer le 'Global Commons' représente un effort unique pour englober aspects économiques, scientifiques et politiques de cette grande expérience géophysique* » (Nordhaus, 1994). Dans ce qui suit, nous définirons un modèle d'intégration assignée comme un modèle intégrant un processus interdisciplinaire et participatif visant à combiner, interpréter et communiquer des connaissances issues de diverses disciplines scientifiques afin de permettre la compréhension des systèmes complexes. Ce modèle, généralement centré sur le triptyque énergie - climat - économie, visent à proposer la meilleure réponse possible, en l'état de la recherche, aux questions posées par les décideurs politiques sur des problèmes environnementaux. Notre étude entend apporter un éclairage sur l'usage de ces modèles dans le cadre des débats sur le réchauffement climatique et sur leur capacité à proposer des scénarios porteurs d'avenir pour nos sociétés. Notre réflexion sera présentée en deux temps. Dans une première section, nous précisons l'état de l'art en matière d'IAMs en insistant d'une part, sur le contexte et l'émergence de l'évaluation assignée et d'autre part, en proposant quelques repères chronologiques pour comprendre leur succès. Dans une seconde section, nous présenterons une analyse détaillée de la famille des modèles DICE/RICE, largement médiatisée par Nordhaus suite à l'obtention de son Prix Nobel.

1. Les modèles d'intégration assignée (IAM) : Etat de l'art

Les modèles d'évaluations intégrées (ou integrated assessment models IAM en anglais) sont des cadres pratiques cherchant à combiner des connaissances pluridisciplinaires. Ils visent principalement trois objectifs : « (1) *l'exploration coordonnée des trajectoires futures possibles des systèmes humains et naturels* ; (2) *le développement de connaissances sur les questions clés de la formation des politiques* ; (3) *la hiérarchisation des besoins en recherche afin d'améliorer notre capacité à identifier des options stratégiques solides* » (Grobeck, 1974).

Historiquement, les premiers modèles visant à intégrer les informations disponibles de plusieurs disciplines en matière d'évaluation intégrée et à produire des scénarios pour le futur furent les modèles World 2 (Forrester, 1972) et World 3 (associé au Rapport Meadows). Ces modèles reposaient sur une architecture mondiale (World Model) et une programmation informatique permettant de simuler des résultats dans différents contextes (Ndiaye, Diemer, Gladkykh, 2017). D'une manière générale, les IAM peuvent être divisés en deux grandes classes : les modèles d'optimisation et les modèles d'évaluation des politiques. Les premiers cherchent à optimiser les variables clés de contrôle des politiques telles que les taux de contrôle des émissions de carbone ou les taxes sur le carbone (on peut rechercher à optimiser le bien-être ou à réduire le coût associé à la réalisation d'un objectif de réduction ou de concentration des émissions de carbone). Les modèles d'optimisation des politiques peuvent être divisés en deux sous-catégories : (1) les modèles coûts-avantages ; (2) Les modèles basés sur des cibles, qui optimisent les réponses en fonction d'objectifs en matière d'émissions ou de climat. Les seconds projettent les conséquences physiques, écologiques, économiques et sociales de politiques spécifiques. Ces modèles sont de deux types : (1) les modèles de projection déterministes, dans lesquels chaque entrée et chaque sortie prennent une valeur unique ; (2) les modèles de projection stochastiques, dans lesquels au moins certaines entrées et sorties sont traitées de manière stochastique. Chaque approche présente des forces et des faiblesses et produit des informations particulières sur le changement climatique.

De nos jours, les chercheurs issus des sciences naturelles et des sciences sociales s'inscrivent de plus en plus dans une approche en termes de systèmes complexes. Les problèmes environnementaux en sont une parfaite illustration. En effet, les questions environnementales sont intrinsèquement liées aux sciences naturelles d'une part et d'autre part exigent des sciences sociales, politiques et économiques des solutions efficaces et durables. Le domaine d'application le plus fécond de cette illustration est « *la science et la politique du changement climatique qui englobent un large éventail de sciences telles que la chimie atmosphérique et les sciences du climat, l'écologie, l'économie, les sciences politiques, la théorie du jeu et le droit international* » (Weyant et al, 1996). Ainsi à mesure

que notre compréhension progresse sur ces différents domaines, il est de plus en plus nécessaire de les relier afin de concevoir et de mettre en place des politiques plus efficaces. Dans ce contexte, les modèles d'évaluation intégrée (IAM) peuvent jouer un rôle déterminant pour définir des approches intégratrices entre les connaissances de deux ou plusieurs domaines. Ainsi, « *en très peu de temps, une pléthore de modèles d'évaluation intégrée (MIA) a été construite et utilisée pour estimer le coût social du carbone (CSC) et évaluer d'autres politiques de réduction* » (Pindyck, 2013). Dans ce qui suit, nous reviendrons brièvement sur les étapes chronologiques qui ont amené à l'émergence des modèles d'intégration assignée, puis nous présenterons les avancées et les challenges auxquels ces modèles sont aujourd'hui confrontés.

1.1 Contexte et émergence de l'évaluation intégrée

L'évaluation intégrée n'est ni un nouveau concept ni une activité spécifique au changement climatique, même si ce dernier occupe une place privilégiée dans la conception des modèles. La première évaluation intégrée d'un problème environnemental mondial est à mettre au crédit du Programme d'évaluation des impacts climatiques (CIAP), mené par le Département américain des transports pour évaluer les impacts environnementaux des vols supersoniques dans la stratosphère (Grobeck et al, 1974). Six équipes interdisciplinaires distinctes ont examiné un maillon de la chaîne de causalité allant des activités humaines (scénarios de vol supersonique et de conception de moteurs à réaction) à la chimie de l'atmosphère et aux rayonnements jusqu'à des impacts biologiques, économiques et sociaux. Ces équipes de chercheurs ont échangé des informations et des données numériques afin de produire des estimations quantitatives des impacts environnementaux et économiques de scénarios spécifiques de la stratosphère.

Au cours des années 1970 et au début des années 1980, plusieurs autres évaluations intégrées majeures ont été menées à l'aide d'une structure similaire de groupes d'experts interdisciplinaires. Parmi les premières évaluations du changement climatique mondial qui ont aidé à jeter les bases de l'approche actuelle du GIEC, on peut citer les travaux de Clark (1982) et du Conseil national de la recherche des États-Unis (1983). Cette approche globale et interdisciplinaire s'est poursuivie dans des instances telles que les groupes d'évaluation du Protocole de Montréal (Nations-Unies, 1992) et le GIEC (2005) lui-même. Depuis le CIAP¹, cependant, aucune évaluation n'a

¹ Climatic Impact Assessment Program (CIAP): probably the first major project in integrated assessment of an environmental issue was the Climatic Impact Assessment Program (CIAP), which investigated potential atmospheric impacts of the proposed American supersonic transport aircraft (SST) in the early 1970s. Though climate change was part of CIAP's mandate, most of their work focused on potential SST-caused depletion of the stratospheric ozone layer and on resultant increases in ground-level ultraviolet (UV) radiation and accompanying ecosystem damages and health risks. (For further information on the effects of ozone depletion and increased ultraviolet radiation, see the CIESIN Thematic Guide on Ozone Depletion and Global Environmental Change.) The mission statement reflected the intended broad policy-oriented perspective of the study: "in order to determine regulatory constraints on flight in the stratosphere such that no adverse environmental effects result, CIAP will assess ... the impact on man, plants, and animals of climatic changes which may occur from the operation of a

tenté une intégration aussi précise et complète des processus, des activités humaines aux conséquences valorisées, sans utiliser un modèle d'intégration formel.

Les études d'évaluation intégrée formellement modélisées tirent leur inspiration, sinon leurs méthodes, des modèles globaux des années 70, tels que Meadows et al. (1972), Mesarovic et Pestel (1974) (voir également Meadows et al, 1982). Ces modèles dynamiques très agrégés comprenaient des représentations généralisées de la pollution et de l'épuisement des ressources, mais ne traitaient pas d'un problème environnemental particulier. Les modèles d'évaluation intégrée du changement climatique ont émergé quant à eux à la fin des années 1970 à partir de modèles économiques et techniques de politique énergétique. Nordhaus (1979) a présenté le premier modèle combinant la conversion d'énergie, les émissions et la concentration de CO atmosphérique. Des efforts ultérieurs d'évaluation intégrée du changement climatique ont mis l'accent sur la modélisation de l'énergie (Hafele et al, 1981 ; Nordhaus et Yohe, 1983) et l'intégration de l'incertitude sur les futures concentrations de CO (Edmonds et Reilly, 1985). Au cours des années 1980, les études d'évaluation du climat utilisant une modélisation intégrée ont eu une portée plus restreinte que celles utilisant des panels d'experts interdisciplinaires. Les évaluations modélisées ne sont pas allées au-delà des concentrations atmosphériques en CO₂, excluant à la fois les autres gaz et leurs impacts sur le changement climatique. Le premier modèle d'évaluation intégrée prenant en compte les émissions de CO₂ et leurs impacts ne traitait pas du changement climatique, mais de la question des pluies acides. Le modèle d'acidification RAINS a été développé par l'IIASA au début des années 1980 (Alcamo, Shaw et Hordijk, 1990). RAINS intègre des modèles d'émissions d'acide, de transport et de dépôt dans l'atmosphère. Le projet RAINS a instauré une relation étroite entre l'équipe de modélisation et les décideurs politiques, ce qui a permis de proposer un modèle plus pertinent pour les décideurs politiques et une contribution plus utile aux négociations internationales. Les premières mesures visant à étendre la modélisation intégrée du changement climatique ont été proposées par Mintzer (1987), via l'intégration des autres gaz et le changement de température globale, puis par Lashof et Tirpak (1989) dans leur travail concernant la stabilisation atmosphérique. IMAGE 1.0 (Rotmans et al., 1990) a été le premier modèle à tenter une représentation totalement intégrée du climat, des sources aux impacts. Ce modèle a été à l'origine du développement du modèle européen intégré ESCAPE (Hulme et al. 1995).

Depuis 1990, le nombre de projets de modélisation d'évaluation intégrée du changement climatique mondial a augmenté rapidement². L'idée que des modèles utiles pourraient être développés pour couvrir l'ensemble du problème du climat a été

worldwide stratospheric fleet as projected to 1990." The project was established by Congress in 1971 under the authority of the Department of Transportation (DOT), with a \$20 million budget and a three-year deadline. DOT supervised the effort and provided the project leader, but the project involved hundreds of researchers.

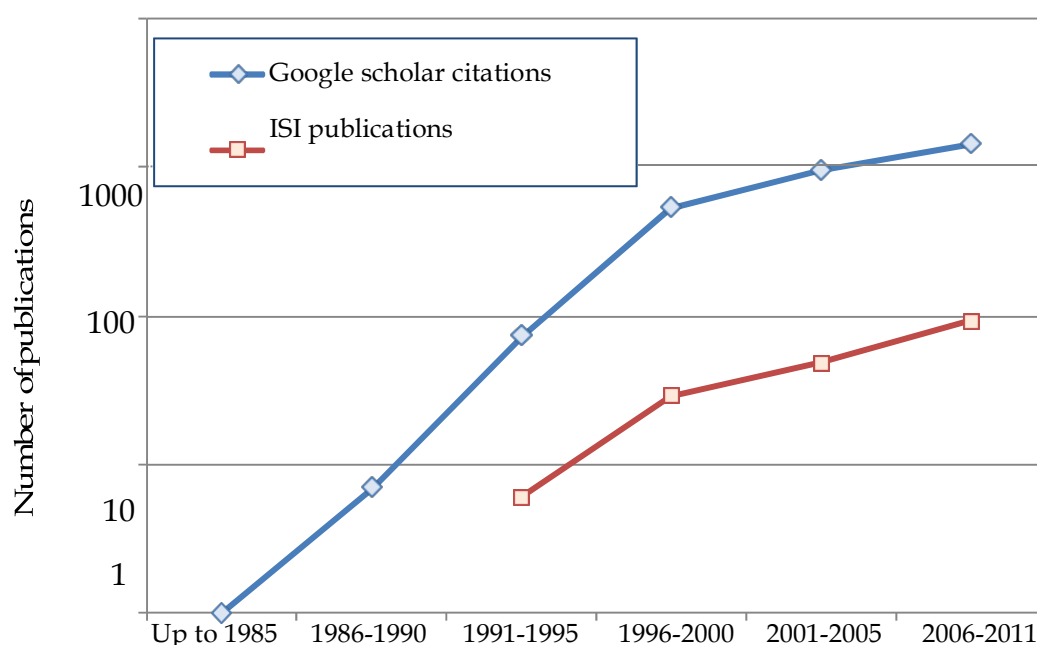
² Le projet MINK (Rosenberg et Crosson, 1991 ; Rosenberg, 1993) était spécifiquement axé sur les impacts climatiques, combinant des modèles sectoriels détaillés de l'agriculture, des forêts, de l'énergie et des ressources en eau.

de plus en plus acceptée par la communauté scientifique et les décideurs politiques, à mesure que les progrès de la puissance de calcul, de la compréhension pluridisciplinaire et des efforts de modélisation sectoriels sur lesquels reposent ces projets de modélisation intégrée se sont largement diffusés sur la scène internationale. La première conférence consacrée à l'évaluation de l'activité sur le terrain (Nakicenovic et al. 1994) a marqué un tournant dans la maturation de la modélisation d'évaluation intégrée du changement climatique.

1.2 Le paysage des IAM, quelques repères

Une recherche sur Google Scholar a abouti à 3610 références à des « *modèles d'évaluation intégrée* ». Cependant, le nombre de publications dans les revues est beaucoup plus faible, 175 entre 1995 et 2011.

Figure 1 : Tendence temporelle de l'évolution des IAM



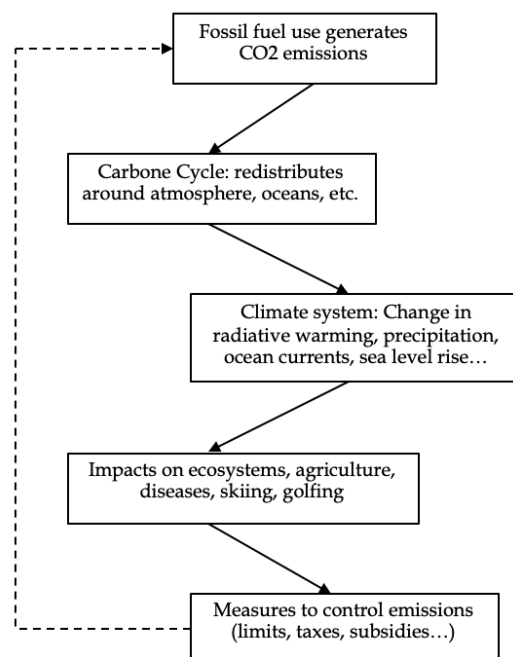
Source : Nordhaus (2011)

La figure 1 précise l'évolution temporelle en matière d'IAM. Il est clair que la recherche progresse considérablement dans ce domaine, même si le ratio entre les publications ISI (International Scientific Indexing) et Google Scholar reste encore faible. Une des raisons est qu'une grande partie du travail est effectuée dans la « *littérature grise* » plutôt que dans des revues scientifiques standards. Bien que les modèles d'évaluation intégrée soient de plus en plus utilisés depuis deux décennies, il existe relativement peu de publications analysant les aspects techniques de ces modèles.

En revanche, il existe une vaste littérature sur les résultats ainsi que sur les applications des modèles. Weyant et al. (1996) ont examiné - dans le cadre de la deuxième évaluation du GIEC - une large gamme d'IAM et fourni un aperçu détaillé de l'état de

la technique. Weyant et al. (1996) ont souligné l'importance des approches multiples dans le développement des IAM et la difficulté d'englober tous les éléments importants dans un même modèle. Kolstad (1998), Kelly et Kolstad (1999) ont également apporté leurs contributions à une meilleure connaissance des IAM. Leurs travaux ont examiné 21 IAMs, sur la période allant de 1992 à 1996. Les auteurs ont souligné la distinction importante entre les modèles d'optimisation et les modèles d'évaluation des politiques. Cette distinction reste l'une des lignes de division centrales entre les différents modèles, même si Kolstad (1998) semble tempérer quelque peu les résultats : « *presque tous les résultats sont issus des modèles d'optimisation des politiques, les modèles top-down économie-climat. Pratiquement aucune nouvelle compréhension de base ne semble avoir émergé des modèles d'évaluation des politiques...* ». Au final, ces travaux concluaient de la manière suivante : la communauté de l'évaluation intégrée a fait un excellent travail d'analyse et de comparaison des nombreux IAM. Cependant, malgré les efforts des chercheurs et les sommes importantes consacrées à la recherche par les gouvernements, les messages ne vont pas au-delà de la communauté de l'évaluation intégrée. Cette dernière doit donc faire davantage pour amener les résultats au premier plan des débats sur le changement climatique. Il semblerait que ce constat ait quelque peu changé ces dernières années, les gouvernements ayant de plus en plus recours aux IAM dans leurs analyses des politiques publiques, rendant de plus en plus nécessaire le recours à la modélisation intégrée.

Figure 2 : Diagramme schématique d'un modèle d'évaluation intégré complet pour la science, l'économie et les politiques relatives aux changements climatiques



Source : Nordhaus (2017)

La modélisation intégrée a pour tâche de rassembler les différents aspects d'un problème (dimensions géophysiques, économiques, politiques...) afin qu'une décision ou une analyse puisse prendre en compte toutes les variables endogènes importantes qui opèrent simultanément. La figure 2 montre schématiquement les modules importants dans le cas du changement climatique. Une analyse complète doit prendre en compte les émissions, les concentrations, le changement climatique et les impacts. La dernière flèche du processus relie les impacts et les politiques aux émissions, fermant ainsi la boucle.

C'est dans ce contexte de diffusion des IAM sur la scène internationale qu'il nous semble important de revenir sur les contributions de William Nordhaus, notamment via la famille des modèles DICE et RICE.

2. Des apports des modèles DICE et RICE à la compréhension des interactions économie, énergie et climat

Dans cette section, nous allons à la fois présenter la structure et l'évolution des modèles d'évaluation intégrée DICE et RICE. Les modèles DICE (modèle intégré dynamique du climat et de l'économie) et RICE (modèle intégré régional du climat et de l'économie) ont fait l'objet de plusieurs révisions depuis leur développement initial en 1992. Les dernières versions publiées sont les modèles DICE-2016R. Nous commencerons tout d'abord par replacer le contexte historique de l'émergence du modèle DICE, puis nous procéderons à une description détaillée du modèle, enfin nous aborderons le modèle RICE. Nous nous appuierons principalement les travaux de Nordhaus (1974, 1977, 1994, 2007, 2010, 2017), Nordhaus et Boyer (2000).

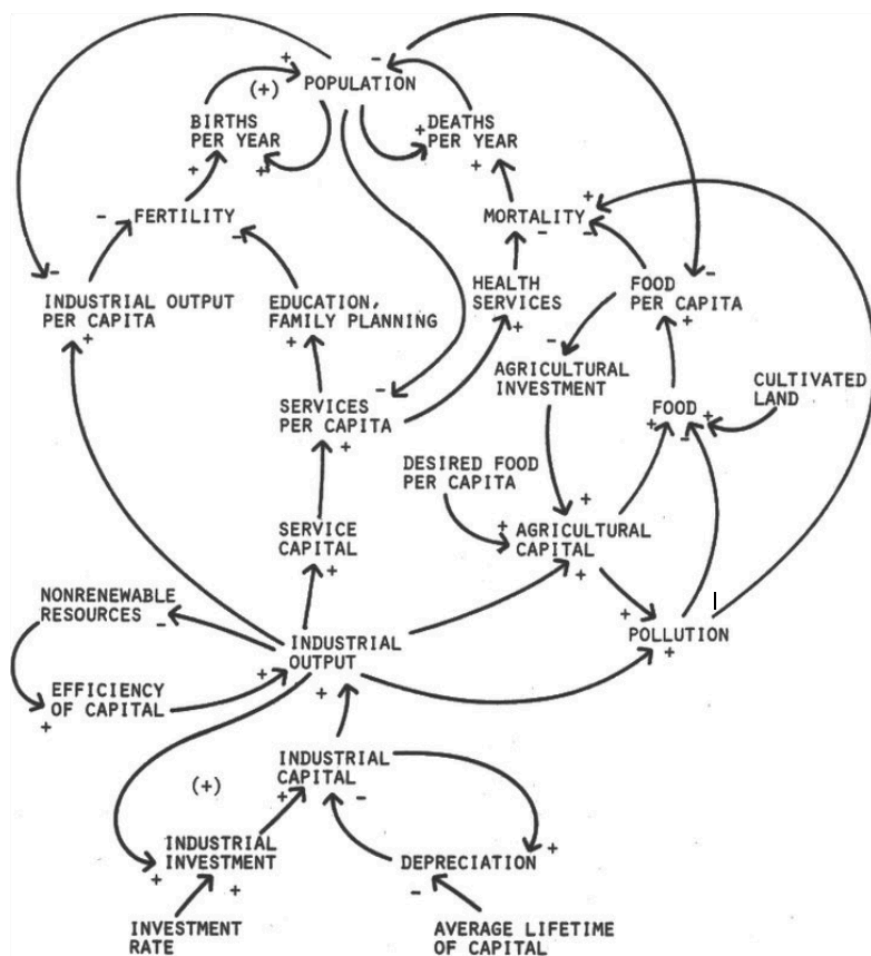
2.1 De la gestion des ressources énergétiques à la prise en compte de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère

Il est difficile de comprendre l'émergence du modèle DICE sans aborder les débats relatifs à la concentration du CO₂ dans l'atmosphère (symbolisant une forte pollution) au cours des années 70 et notamment la parution du rapport *Limits to Growth* (1972) commandé par le Club de Rome. Ce que l'on a coutume d'appeler aujourd'hui le modèle World 3 (World 2 ayant été proposé par J.J Forrester dans son ouvrage *World Dynamics*) cherchait - à partir d'une méthode, la dynamique des systèmes - à analyser les interdépendances et les interactions entre cinq variables « critiques » : l'explosion démographique, la production alimentaire, l'industrialisation, l'épuisement des ressources naturelles et la pollution (Diemer, Figuière, Pradel, 2013). Ces cinq variables auraient la particularité d'évoluer selon une progression géométrique, de nature exponentielle. La dynamique des systèmes mettait ainsi « *en évidence les nombreuses relations entre éléments, formant des boucles avec couplage, et pour certaines à effets décalés dans le temps* » (Meadows et ali., 1972, p. 153). Une boucle positive amplifie le système (*Reinforcing Loop*) et apparaît à chaque fois que l'on rencontre une quantité variant

exponentiellement. Dans une boucle positive, toute séquence de relations de cause à effet aboutit fatalement à son point de départ, tout accroissement donné à l'un des éléments quelconques de la boucle amorcera une suite logique de modifications dont le résultat final se traduira par une augmentation encore plus grande de l'élément de départ. Dans une boucle négative, toute séquence vise à maintenir à un niveau constant une fonction qui tend à croître ou à décroître. Elle agit donc en sens inverse de la variation de la fonction. La boucle négative (*Balancing Loop*) a un rôle régulateur. Les cinq variables sont reliées les unes entre elles par un réseau de relations et de boucles.

Ainsi, la hausse de la population engendre un besoin de nourriture (boucle positive), qui demande elle-même des investissements et une production, cette dernière va utiliser des ressources naturelles, générer des déchets et de la pollution, celle-ci pouvant provoquer une hausse de la mortalité et donc une baisse de la population (boucle négative).

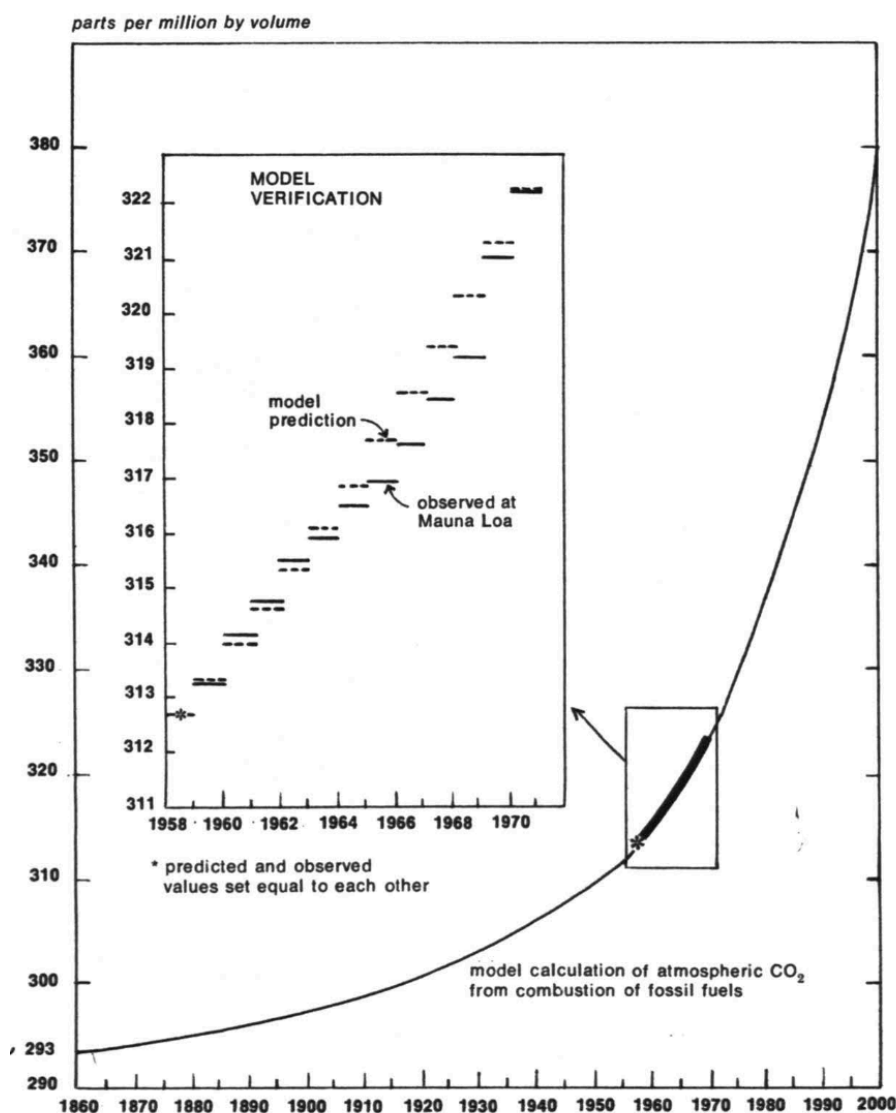
Figure 3 : Diagramme de boucles dans World 3



Source : Meadows et al. (1972)

Notons ici que dans le rapport *Limits to Growth* de 1972, le système climatique ne fait pas partie du modèle (Diemer, 2004, 2015). La variable pollution est appréhendée par la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Meadows et al. (1972, p. 71) introduisent ici une boucle positive : plus la production industrielle augmente, plus l'énergie fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) est sollicitée ; ce qui libère du CO₂ dans l'atmosphère et provoque une hausse de la mortalité.

Figure 4 : Concentration de CO₂ dans l'atmosphère



Source : Meadows et al. (1972, p. 72)

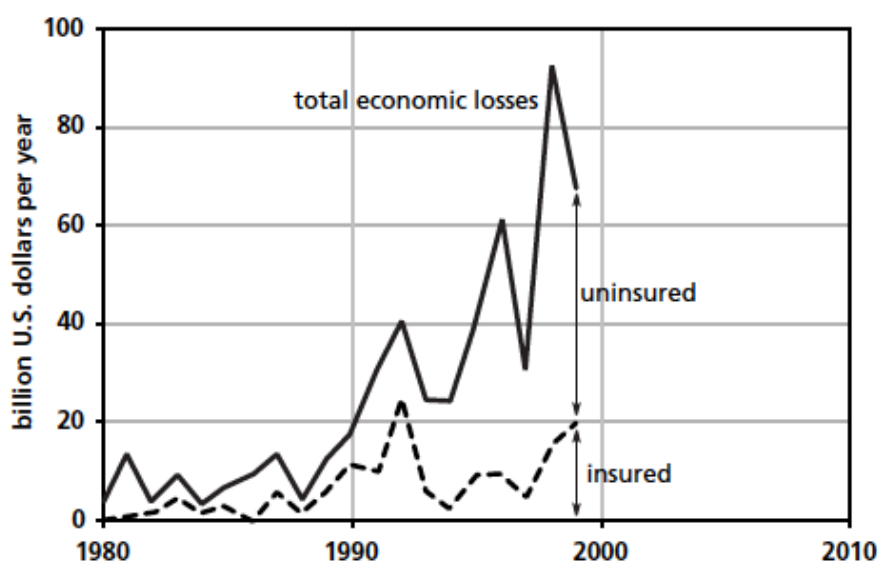
Il faudra attendre la parution de *Beyond The Limits* (1992) pour que le climat soit explicitement intégré dans la dynamique des systèmes. Mais là encore, il se trouve disséminé dans le chapitre 3 (*The Limits : Sources and Sinks*) consacré à la pollution et aux déchets. Si le changement climatique à l'échelle globale est bien présenté comme le nouvel enjeu des prochaines années (les preuves scientifiques du réchauffement climatique s'accumulent), son analyse continue d'alimenter les débats sur la

croissance : « *Many scientists believe that the next global limit humanity will have to deal with is the one called the greenhouse effect, or the heat trap, or global climate change* » (1992, p. 92). Ainsi, le changement climatique global ne peut être détecté dans le court terme, mais bien sur des dizaines d'années.

A ces observations de longue période, il faut ajouter trois types d'incertitudes : 1° Quelles seraient les températures globales sans interventions humaines ? Une réduction de la croissance n'est peut-être pas suffisante pour réduire les concentrations de CO₂ si ces dernières augmentent naturellement sur le long terme ; 2° Quelles sont les conséquences du réchauffement climatique sur les précipitations, les vents, les écosystèmes et les activités humaines à des endroits particuliers de la Terre ? 3° Comment appréhender toutes les boucles associées aux flux de carbone et d'énergie. La modélisation d'un tel système est complexe et des boucles de régulation peuvent très bien intervenir pour stabiliser les émissions de CO₂ (les océans peuvent en absorber une partie).

La parution de *Limits to growth, the 30 years update* (2004), mérite que l'on s'y attarde quelque peu, car le climat génère de nombreuses boucles dans World 3. Le rapport n'hésite pas à cibler les économistes, les principaux climato-sceptiques et à souligner les conséquences du changement climatique sur les activités économiques, et donc par conséquent sur la croissance économique : « *More scientists, and now many economists as well, believe the next global limit humanity will have to deal with the greenhouse effect, or global climate change... Even some economists – a group well known for its skepticism about environmentalist alarmism – are becoming convinced that something unusual and significant is going on in the atmosphere, and that it may have human causes* » (2004, p. 113-115).

Figure 5 : Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters



Source : Meadows et al. (2004, p. 117)

Les changements climatiques occasionnent des pertes économiques qui remettent en cause la viabilité des systèmes d'assurances (les années 1990 et 2000 marquent une rupture de tendance, la part des dommages ne donnant lieu à aucun remboursement s'envole). Le scénario 2 (*Global Pollution Crisis*) introduit à lui-seul les effets dommageables de la pollution et du changement climatique. La boucle positive se présente de la manière suivante : une hausse de la pollution réduit la fertilité des terres, qui elle-même réduit la production agricole, les investissements se déplacent dans le secteur agricole pour maintenir la production de nourriture et diminuent dans les autres secteurs, la pollution entraînant une baisse de l'espérance de vie et une hausse de la mortalité. Cette boucle est renforcée par trois effets : la contamination des terres par les métaux lourds et les produits chimiques, les changements climatiques qui altèrent la production agricole de façon aléatoire et récurrente et les radiations d'ultra-violet relatifs à la diminution de la couche d'ozone.

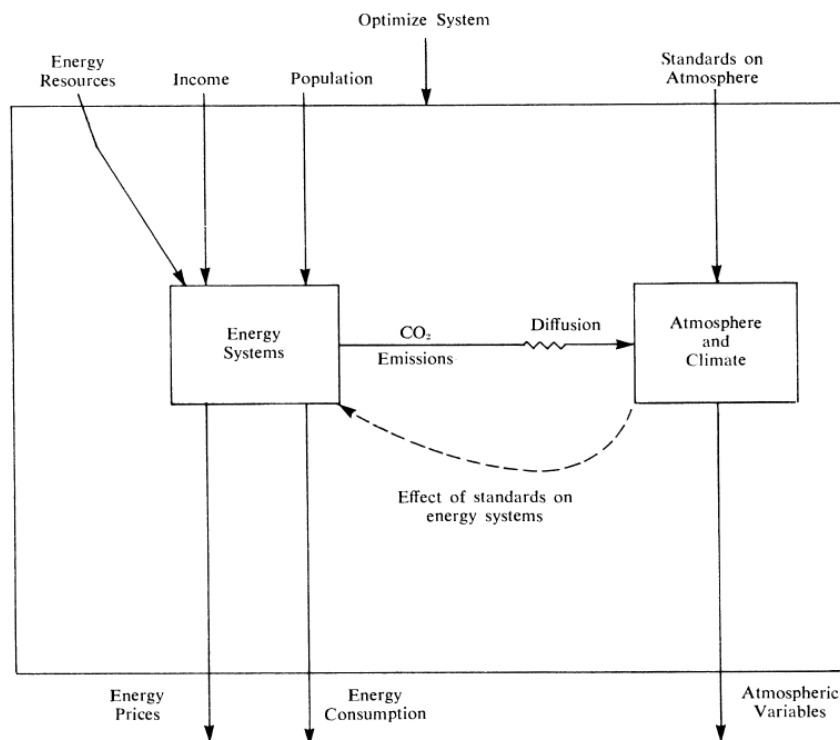
Il ne va pas sans dire que ces travaux ont soulevé de larges critiques de la part des économistes (Matarasso, 2007, Diemer, 2015), William Nordhaus (1972, 1973) sera le principal artisan de cette fronde. Dans un article co-écrit avec James Tobin et intitulé « Is Growth Obsolete ? », Nordhaus entend répondre au rapport *Limits to Growth* (« *We mention this point now because we shall return later to the ironical fact that the antigrowth men of the 1970s believe that it is they who represent the claims of a fragile future against a voracious present* », 1972, p. 4) en mobilisant la théorie autour de trois questions : 1° la mesure de la croissance économique; 2° le lien entre croissance et ressources naturelles ; 3° le lien entre taux de croissance de la population et bien être économique. Un an plus tard, Nordhaus (1973) récidive avec pour cible, l'ouvrage *World Dynamics* de Forrester. Le titre « *World Dynamics Measurement without data* » et le contenu de l'article sont sans équivoque « *What is the overall impression after a careful reading of World Dynamics? First, the dynamic theory put forward in the work represents no advance over earlier work... Second, the economic theory put forth in World Dynamics is a major retrogression from current research in economic growth theory... Third, Forrester has made no effort in World Dynamics to identify any relation between his model and the real world... Fourth, the methodology of modelling in World Dynamics differs significantly from other studies of economic systems... Fifth, the predictions of the world's future are highly sensitive to the specification of the model... Sixth, there is a lack of humility toward predicting the future* » (1973, p. 1183).

C'est dans ce contexte que Nordhaus va engager ses recherches « *Resources as a constraint to growth* » (1974), dans la gestion des ressources énergétiques, puis prendre en compte l'impact de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Il en conclut qu'en supposant que « *10 percent of the atmospheric CO₂ is absorbed annually (G. Skirrow), the concentration would be expected to rise from 340 ppm in 1970 to 487 ppm in 2030 - a 43 percent increase* » (1974, p. 26). Cet article constitue une première tentative de modélisation intégrée du climat. Elle est certes rudimentaire (seule la variable CO₂ est prise en compte), toutefois elle traduit bien les débats des années 70. Sur fond de crise

énergétique, Nordhaus entendait bien développer un modèle énergétique mondial, susceptible d'être couplé avec un modèle climatique. Nordhaus (1976, 1977) présentera ce cadre théorique dans deux articles, l'un présenté à la Cowles Commission (*Strategies for the Control of Carbon Dioxide*, 1976), l'autre publié dans *The American Economic Review* (*Economic Growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem*, 1977).

La figure 6 donne un aperçu du modèle utilisé par Nordhaus (1977) pour étudier les stratégies de contrôle des émissions de dioxyde de carbone. Le bloc « système énergétique » est un système combinant les mécanismes du marché et des politiques économiques.

Figure 6 : *Modèle d'optimisation du système énergie - environnement*



Source : Nordhaus (1977, p. 343)

Les variables déterminantes sont l'énergie, les ressources naturelles, le revenu et la population. L'interaction de l'offre et de la demande conduit à une trajectoire d'optimisation inter-temporelle des prix et de la consommation. Pour prendre en compte des externalités telles que le cycle du dioxyde de carbone, Nordhaus propose de prendre en compte les émissions et la distribution du CO₂. Cette étape l'amène à imposer des normes standards sur les concentrations atmosphériques (côté droit de la figure). En imposant de telles normes, il devient possible de fermer la boucle et de forcer le système énergétique à agir sur la structure de l'offre et la demande. Nordhaus examine deux stratégies permettant de maintenir les concentrations atmosphériques de CO₂ à un niveau raisonnable. La première stratégie consiste à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Cela revient à remplacer les carburants à haute teneur en CO₂ par des carburants à basse teneur en CO₂. La deuxième stratégie consiste à compenser

les effets des émissions de dioxyde de carbone ou à utiliser de nouveaux procédés industriels (écotechnologies) pour « aspirer » le dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Afin d'éviter « *the odor of science-fiction* » (1977, p. 343), Nordhaus privilégiera la première stratégie en cherchant à optimiser le système à partir des normes standards.

Il faudra attendre les années 90 pour que la famille des modèles DICE (*Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy*) et RICE (*Regional Integrated Model of Climate and the Economy*) voit le jour (Nordhaus, 1992, 1994).

2.2 La structure des modèles DICE-RICE

Le modèle DICE, développé à partir de 1989 et publié dans Nordhaus (1992, 1994), fait partie des premiers IAMs sur le changement climatique. Depuis son développement initial, le modèle DICE a fait l'objet de plusieurs révisions. La dernière version publiée est le DICE-2016R (Nordhaus 2017, 2017a), avec une description complète (Nordhaus et Sztorc, 2013) et une version intermédiaire (Nordhaus, 2008). Ainsi, depuis les premières versions, le modèle DICE a fait l'objet de nombreuses itérations, réactualisant l'argumentation théorique ainsi que les données économiques et environnementales.

Le modèle DICE est un modèle d'optimisation (Ramsey, 1928) dynamique cherchant à estimer la trajectoire optimale de réduction des GES (Diemer, 2004, 2015). La trajectoire optimale peut être interprétée comme la voie la plus efficace pour ralentir le changement climatique, compte tenu des intrants et des technologies (Veille-Blanchard, 2007). Elle peut être également interprétée comme un équilibre de marché concurrentiel dans lequel les externalités sont corrigées en utilisant les prix sociaux appropriés pour les GES. Dans le modèle DICE, les émissions comprennent tous les GES, toutefois celles associées au CO₂ sont privilégiées. Les émissions de GES, qui s'accumulent dans l'atmosphère, peuvent être contrôlées par une augmentation des prix des intrants (comme l'énergie) ou des produits à forte intensité de GES. Le changement climatique est appréhendé par la température moyenne à l'échelle globale de la terre, variable utilisée dans la plupart des modèles climatiques actuels. Les impacts économiques du changement climatique sont supposés augmenter dans l'augmentation de température réalisée.

Concrètement, l'approche d'un modèle d'optimisation consiste à maximiser une fonction objectif, laquelle fait référence au bien-être économique (ou à l'utilité) associé à un chemin de consommation. Dans le modèle DICE (mais également le modèle RICE), on suppose que les régions du monde ou les régions individuelles ont des préférences bien définies, représentées par une fonction d'utilité sociale, qui classe différents chemins de consommation. La fonction de bien-être social augmente dans la consommation par habitant de chaque génération, avec une utilité marginale décroissante de la consommation. L'importance de la consommation par habitant d'une génération dépend de la taille de la population. L'importance relative des

différentes générations est influencée par deux paramètres normatifs, le taux pur de préférence sociale dans le temps (l'« *actualisation générationnelle* ») et l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation (l'« *élasticité de la consommation* »). Ces deux paramètres interagissent pour déterminer le taux d'actualisation des biens, ce qui est essentiel pour les choix économiques inter temporels. Le modèle DICE suppose que les politiques économiques et climatiques doivent être conçues pour optimiser le flux de consommation au fil du temps. Il est important de souligner que la consommation doit être interprétée comme une « consommation généralisée », qui comprend non seulement les biens et services du marché traditionnel tels que l'alimentation et le logement, mais également des produits non marchands tels que les loisirs, la santé et les services environnementaux.

La représentation mathématique de cette hypothèse est que les politiques sont choisies pour maximiser une fonction de bien-être social, W , c'est-à-dire la somme actualisée de l'utilité de la consommation par habitant pondérée en fonction de la population, où c est la consommation par habitant, L est la population et $R(t)$ est le facteur d'escompte. L'équation (1) est l'énoncé mathématique de la fonction objectif. Cette représentation est classique dans les théories modernes de la croissance économique optimale (Ramsey 1928, Koopmans 1965, Cass 1965).

$$(1) W = \sum_{t=1}^{T_{\max}} U[c(t), L(t)]R(t)$$

Dans les modèles DICE et RICE, l'utilité est représentée par une fonction constante.

$$(2) U[c(t), L(t)]R(t) = L(t)[c(t)^{1-\alpha}/(1-\alpha)]$$

Cette équation traduit d'une part une élasticité constante de l'utilité marginale de la consommation α , l'élasticité est un paramètre qui représente l'étendue de la substituabilité de la consommation d'années ou de générations différentes. Si α est proche de zéro, alors les consommations de différentes générations sont des substituts proches ; si α est élevé, les consommations ne sont pas des substituts proches. D'autre part, elle traduit une spécification qui suppose que la valeur de la consommation au cours d'une période donnée est proportionnelle à la population.

Le bien-être économique des générations futures peut prendre la forme suivante :

$$(3) R(t) = (1 + \rho)^{-t}$$

$R(t)$ est le facteur d'actualisation, tandis que le taux pur de préférence temporelle sociale, ρ , est le taux d'actualisation qui fournit les pondérations de bien-être sur les utilités des différentes générations.

La lecture de la croissance économique est appréhendée sous la forme d'une approche par secteurs économiques. Toutefois, à la différence de l'analyse standard qui requiert peu de délais d'ajustement entre les variables économiques, la modélisation du changement climatique nécessite de très longs délais (un siècle, voire au-delà). D'un point de vue théorique, cela suppose une prise en compte de l'accumulation du capital (analyse néoclassique) et des contraintes géophysiques. Dans le premier cas, les fonctions de production Cobb Douglas servent de fonctions de productions régionales et mondiales, à rendements constants dans les changements de capital, de main-d'œuvre et de technologies.

$$(4) \quad Q(t) = [1 - A(t)]A(t)K(t)^{\gamma} L(t)^{1-\gamma} / [1 + \Omega(t)]$$

Dans le second cas, le défi consiste à simplifier des dynamiques intrinsèquement complexes en un petit nombre d'équations utilisables dans un modèle économique et géophysique intégré. La principale caractéristique du modèle DICE (RICE) est l'inclusion de plusieurs relations géophysiques qui relient l'économie aux différentes forces affectant le changement climatique (5), (6), (7) et (8).

$$(5) \quad E(t) = E_{\text{Ind}}(t) + E_{\text{Land}}(t)$$

$$(6) \quad M_{\text{AT}}(t) = E(t) + \phi_{11}M_{\text{AT}}(t-1) + \phi_{11}M_{\text{UP}}(t-1)$$

$$(7) \quad M_{\text{UP}}(t) = \phi_{12}M_{\text{AT}}(t-1) + \phi_{12}M_{\text{UP}}(t-1) + \phi_{32}M_{10}(t-1)$$

$$(8) \quad M_{10}(t) = \phi_{23}M_{\text{UP}}(t-1) + \phi_{53}M_{10}(t-1)$$

Dans le modèle DICE (RICE), les émissions de CO2 sont projetées en fonction de la production totale, d'un taux de rendement des émissions variable dans le temps et d'un taux de maîtrise des émissions. Le ratio émissions / production est estimé pour chaque région (RICE) et est ensuite agrégé au ratio global (DICE). Notons que dans les premières versions, DICE et RICE utilisaient le taux de contrôle des émissions comme variable de contrôle dans l'optimisation en se basant sur les algorithmes à programme linéaire. Aujourd'hui le taux de contrôle des émissions est déterminé par la politique de changement climatique combinée à une taxe de carbone en tant que variable de contrôle. C'est pourquoi dans les modèles DICE / RICE-2010, le CO2 industriel est le seul gaz à effet de serre contrôlé. Cela reflète le fait que le CO2 est le principal facteur de réchauffement de la planète. L'équation (5) génère ensuite les émissions totales de CO2 sous la forme d'une somme des émissions industrielles et liées à l'utilisation des terres.

Les équations (5), (6), (7) et (8) précisent qu'il existe trois réservoirs de carbone. Les variables $M_{\text{AT}}(t)$, $M_{\text{UP}}(t)$, $M_{10}(t)$ représentent respectivement le carbone dans l'atmosphère, le carbone de la biosphère et le carbone des océans. Les paramètres d'écoulement entre les réservoirs sont représentés par ϕ .

L'équation suivante (9) concerne la relation entre l'accumulation de GES et le changement climatique. Les équations climatiques sont une représentation simplifiée

qui comprend une équation pour le forçage radiatif et deux équations pour le système climatique. L'équation de forçage radiatif permet de calculer l'impact de l'accumulation de GES sur le bilan radiatif du globe. Tandis que les équations climatiques calculent la température moyenne à la surface du globe et la température moyenne des océans profonds à temps réel. Ces équations sont issues des modèles de circulation générale atmosphérique à grande échelle et ont servi de base de travail pour les rapports du GIEC (4^e et 5^e rapport).

$$(9) F(t) = \log 2 [M_{AT}(t)/M_{AT}(1750)] + F_{EX}(t)$$

Même si le modèle RICE (modèle régional intégré du climat et de l'économie) est la version régionalisée du modèle DICE, nous pouvons noter une différence au niveau de la spécialisation des préférences. En effet, dans RICE, celle-ci englobe plusieurs agents (régions). La fonction de préférence générale est une fonction de bien-être social de type Bergson-Samuelson.

$$(10) W = W(U^1, \dots, U^N), \text{ avec } U^1 \text{ comme fonction de préférence d'une région.}$$

Dans ce modèle, l'approche de Negishi (1961, 1962) est privilégiée et les régions sont agrégées à l'aide de pondérations temporelles et spécifiques à des régions soumises à des contraintes budgétaires. Cela permet au modèle RICE-2010 de diviser le monde en 12 régions : les États-Unis, l'Union européenne, le Japon, la Russie, l'Eurasie (Europe de l'Est et plusieurs anciennes républiques soviétiques), la Chine, l'Inde, le Moyen-Orient, l'Afrique subsaharienne, l'Amérique latine, d'autres pays à revenu élevé et d'autres pays en développement. Chaque région est supposée produire un seul produit pouvant être utilisé pour la consommation, l'investissement ou la réduction des émissions. Chaque région est aussi dotée d'un stock initial de capital et de main-d'œuvre et d'un niveau de technologie initial et spécifique à la région.

La structure de la population, de la technologie et de la production est la même que dans le modèle DICE. Notons aussi que les secteurs géophysiques du modèle RICE sont fondamentalement les mêmes que le modèle DICE. La seule différence dans ce domaine, est qu'il existe des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des sols par région, mais elles sont exogènes et ont peu d'effet sur les résultats. En fin de compte, la fonction objective utilisée dans le modèle RICE diffère de celle du modèle DICE : chaque région est supposée avoir une fonction de bien-être social, chaque région optimise sa consommation, ses politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre et ses investissements dans le temps.

2.3 Les résultats de 2015 et les projections pour 2100

Les résultats exposés dans ce papier concernent la période de 2015. Il s'agit de données historiques de la dernière version, mais de projections dans la version la plus ancienne. Dans la version de 1992, Nordhaus a utilisé des données du milieu des années 80. Les

prévisions pour 2015 peuvent être considérées donc comme des prévisions pour les 30 prochaines années. Le tableau 1 présente les projections et les valeurs réelles pour 2015. La première colonne présente les estimations pour 2015 dans le modèle de 1992, tandis que la deuxième colonne présente les estimations pour 2015 à partir du modèle de 2017, qui sont des données réelles. Dans de nombreux domaines, les erreurs étaient grandes et la troisième colonne montre l'évolution de 1992 à 2017, ce qui correspond à l'erreur de prévision dans le modèle de 1992.

Tableau 1 : Principales variables estimées pour 2015

	DICE 1992	DICE-2016R	Change 1992 to 2016
	2015	2015	[%]
Major driving variables			
Economic			
Population (billions)	6,868	7,403	8%
Per capita GDP (2010\$)	11,293	14,183	26%
Consumption per capita (2020\$)	9,195	10,501	14%
Geophysical			
Other Forcings (W/m ²)	0.89	0.50	-44%
CO ₂ /output ratio (tCO ₂ /000 2010\$)	0.607	0.350	-42%
Outcome variables			
Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	42.3	35.7	-15%
Output (trillions 2010\$)	77.6	105.0	35%
Atmospheric concentration C (ppm)	399	400	0%
Atmospheric concentrations (GtC)	849	851	0%
Atmospheric Temperature (°C) Total forcings (W/m ²)	1.16	0.85	-27%
Social cost of carbon (\$/tCO ₂ 2010\$)	3.04	2.46	-19%
	4.54	30.98	582%

Source : Nordhaus (2017)

Dans cette nouvelle version, la production et la population sont largement sous-estimées. Les émissions et autres forçages sont surestimés car le taux de décarbonisation était sous-estimé. Les concentrations sont correctement appréhendées, tandis que la température - comme pour la plupart des modèles du système terrestre - est surestimée. Le coût social du carbone (CSC) reste la plus grande erreur car il était énormément sous-estimé en raison de la combinaison de différents facteurs. Il est intéressant de noter que le SCC n'était pas calculé dans la première version du modèle. Il est introduit pour la première fois dans la version de 2008. Par conséquent, les estimations du SCC pour les versions antérieures sont donc des estimations rétrospectives. Le tableau 1 nous fournit également un guide sur les erreurs qui se produisent dans les IAM (famille des modèles DICE/RICE). Lorsque les

modèles s'inscrivent dans un temps long (prévisions à long terme), il est possible de visualiser et de suivre les erreurs.

Le tableau 2 nous présente les révisions totales estimées entre 1992 et 2017 pour les principales variables.

Tableau 2 : Principales variables estimées pour 2100

	DICE 1992	DICE-2016R	Change 1992 to 2016	Estimated error	
	2100	2100	[%]	2008	2017
Major driving variables					
Economic					
InterestRate(% peryear)	3.4%	3.5%	2.8%	na	0.9%
Population (billions)	9,812	11,126	13%	na	2,421
Savings rate	0.17	0.24	43%	na	Na
Per capita GDP (2010\$)	22,272	73,367	229%	na	49,165
Damage parameter (% at 3 °C)	1.3%	2.1%	62%	na	1.1%
Consumption per capita (2020\$)	18,536	55,825	201%	na	Na
Geophysical					
Other Forcings (W/m2)	1.42	1.00	-30%	na	na
CO2/output ratio (tCO2/000 2010\$)	0.113	0.094	-16%	na	0.03
Outcome variables					
IndustrialEmissions(GTCO2peryear)	78.7	70.8	-10%	50.40	52.60
Output (trillions 2010\$)	218.5	816.3	274%	206.0	581.0
Atmospheric concentration C	670	854	27%	162	234
(ppm) Atmospheric	1,428	1,820	27%	334	498
concentrations (GtC) Atmospheric	3.20	4.29	34%	1.00	0.89
Temperature (°C) Climate	1.5%	4.3%	191%	na	0.028
Damages (% output)	6.65	7.00	5%	na	Na
Total forcings (W/m2)	11.79	265.73	2154%	na	Na
Social cost of carbon (\$/tCO2 2010\$)					

Source: Nordhaus (2017)

Les deux dernières colonnes représentent les incertitudes estimées (mesurées par les écarts types) à partir de deux études sur l'incertitude (Nordhaus, 2008, 2017a). La première estimation utilisait le modèle DICE de 2008 et permettait d'estimer l'incertitude de plusieurs variables. Celles-ci sont indiquées dans la colonne d'incertitude intitulée « 2008 ». La deuxième étude a calculé l'écart type des variables à l'aide du modèle DICE-2016R et porte la mention « 2017 ». Le schéma des révisions pour 2100 présenté dans le tableau 2 est similaire au schéma des erreurs du tableau 1 pour 2015. La révision à la hausse massive du PIB mondial est certainement la révision la plus frappante des variables déterminantes lors de ces révisions.

Un autre fait marquant de cette révision est le passage « *des taux de change du marché (commun jusqu'en 2000 environ) aux taux de change à parité de pouvoir d'achat* » (Nordhaus, 2017). Enfin, précisons que les premières versions du modèle DICE, ainsi que d'autres modèles d'économie d'énergie, étaient basées sur des estimations fortement biaisées en stagnation, avec une forte baisse de la croissance de la productivité après 2025 (voir Nordhaus et Yohe, 1983). Les facteurs à l'origine des émissions et des forçages, en

revanche, ont été fortement révisés à la baisse.

En examinant le groupe de variables du bas du tableau 2, nous constatons une tendance intéressante. Les émissions, les concentrations et les forçages sont généralement sous-estimés, mais par une fraction relativement faible. Alors que les variables économiques telles que la production, les dommages et la CCS sont massivement sous-estimées. L'un des résultats les plus frappants de la rétrospective actuelle, est que les variables économiques constituent les principales sources d'incertitude. À titre de comparaison finale, le tableau 3 ci-dessous présente les modèles DICE 1992 et 2016R et les compare aux rapports du GIEC datant approximativement des mêmes dates (GIEC 1990, 2014).

Tableau 3 : Projections comparatives de DICE et du GIEC, début des années 90 et milieu des années 2010

	1980	2000	2015	2050	2100
CO2 emissions (GtCO2)					
IPCC 1990	22.0	26.0	36.7	55.0	89.8
DICE1992	24.6	36.9	46.7	67.6	89.1
DICE2016			35.8	58.2	70.9
IPCC 8.5				64.2	95.3
CO2 Concentrations (ppm)					
IPCC 1990	340	375	412	535	825
DICE1992	334	368	404	513	700
DICE2016			399	552	826
IPCC 8.5			400	530	940
Total radiative forcing (W/m2) (a)					
IPCC 1990	2.00	3.10	4.20	6.60	9.90
DICE1992	1.66	2.49	3.12	4.78	6.86
DICE2016			2.46	4.39	6.82
IPCC 8.5 (d)	1.50	1.30	2.50	4.80	8.00
Global temperature (°C)					
IPCC 1990(b)	0.20	0.40	0.80	1.90	3.45
DICE1992 (c)	0.19	0.56	0.87	1.72	2.77
DICE2016	0.21	0.38	0.85	2.13	4.10
IPCC 8.5 (e)			0.85	2.05	4.55

(a) Radiative forcing in principle since 1750 or 1850 but unclear for different sources

(b) Subtracts 0.3 °C to correct for initial condition of 1965 = 0.2 °C.

(c) Adds 0.2 °C to correct for initial conditions of 0 °C at 1990.

(d) Adds 0.5 to normalize.

(e) Adds 0.35 to make comparable to other estimates.

Source : Nordhaus (2017)

Le premier rapport du GIEC comportait un scénario de « statu quo » comparable au scénario de base du modèle DICE. Le cinquième rapport a abandonné cette approche en adoptant des trajectoires de concentrations représentatives, pour lesquelles le RCP 8.5 est le plus proche du cas de figure habituel. Dans les approches des modèles IPCC et DICE, nous pouvons noter aussi la révision à la hausse de la température à 2100.

Les estimations des erreurs de prévision sont des outils pour comprendre les erreurs de prévision potentielles dans la révision des modèles. Pour le modèle 2008 et le modèle 2016R, Nordhaus a utilisé les études systématiques des erreurs de prévision issues des techniques de type Monte-Carlo. Ces dernières sont plus complètes toutefois elles présentent l'inconvénient d'être des estimations d'erreurs rétrospectives. Le tableau 4 qui suit, nous indique le « ratio de prévision d'erreurs », qui correspond au ratio de la variation des prévisions entre 1992 et 2017 par rapport à l'incertitude prévisionnelle estimée (mesurée en tant qu'écart type).

Tableau 4 : Ratio de prévision d'erreurs

Variables		Ratio: (difference 2016-1992)/ estimated error
Major driving variables		
Economic		
	Interest Rate (% per year)	0.11
	Population (billions) Savings rate	0.54
	Per capita GDP (2010\$) Damage parameter (% at 3 °C)	1.04
	Consumption per capita (2020\$)	0.77
Geophysical		
	Other Forcings (W/m ²)	
	CO ₂ /output ratio (tCO ₂ /000 2010\$)	
Outcome variables		-0.70
2100		
	Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	-0.15
	Output (trillions 2010\$)	1.03
	Atmospheric concentration C (ppm)	0.79
	Atmospheric concentrations (GtC)	0.79
	Atmospheric Temperature (°C)	1.22
	Climate Damages (% output)	1.02
	Total forcings (W/m ²)	
2015		
	Social cost of carbon, 2015 (\$/tCO ₂ 2010\$)	0.93

Source: Nordhaus (2017)

Conceptuellement, ils sont similaires aux ratios t bien qu'ils n'aient pas de structure probabiliste formelle. Pour les désigner, Nordhaus propose $xi(m, n)$ comme observation ou projection de la variable xi pour une période future m estimée à la date n . En utilisant cette notation, Nordhaus déduit que l'erreur de prédiction ultime en 2100 par rapport au modèle de 1992 est $xi(2100, 2100) - xi(2100, 1992) = [xi(2100, 2100) - xi(2100, 2017)] + [xi(2100, 2017) - xi(2100, 1992)]$.

Dans ces modèles, les taux d'erreur les plus importants sont de l'ordre de 1 et se produisent pour la température, la production par habitant, la production, les dommages et la perte de temps et les CSC. Ces estimations indiquent que, si les erreurs de projection à ce jour et dans certains cas sont très importantes (par exemple pour le CSC), les estimations structurelles des processus sous-jacents indiquent que les incertitudes pour des variables telles que le CSC sont intrinsèquement extrêmement élevées. Nordhaus attire ainsi notre attention sur le fait que la production ou les estimations du CSC soient substantiellement révisées ou que d'autres révisions majeures doivent être envisagées.

Une dernière question est la source des changements pour les projections de différentes variables en ce qui concerne les révisions de la structure du modèle et les données économiques et environnementales. L'approche utilisée par Nordhaus est simple en principe mais compliquée en pratique. Cela consiste à toujours commencer avec la version la plus ancienne, celle de 1992, ensuite d'introduire une étape à la fois sur les différences de modèle et de données entre les modèles de 1992 et 2017, et enfin évaluer l'impact sur différentes variables à chaque étape. Cette étape a permis ainsi de déterminer la taille et les sources des révisions pour les variables importantes. Cependant, Nordhaus reconnaît l'existence d'ambiguïté dans cette approche, dans la mesure où il existe des interdépendances entre les révisions. C'est pourquoi, la plupart des changements sont effectués pas à pas. Le tableau 5 nous montre les ajustements effectués pas à pas. Cette liste répertorie les « versions » du modèle utilisé pour passer de DICE 1992 à DICE-2016R. Il omet les versions qui étaient triviales et permet de vérifier l'exactitude des ajustements.

Tableau 5 : Principales étapes du passage du modèle DICE de 1992 à 2017 pour tester l'impact des révisions

v1: Takes the 1992 version to recreate the 1992 results (1989 \$).
v5: Adjusts for inflation with price increase of factor of 2 for all economic variables (1989\$ to 2010\$).
v6: Adds the calculation of the real interest rate from 2016R calculation.
v7: Updates GDP and capital to match 2015 levels.
v9: Adjusts emissions and concentrations to match 2015 levels and match through 2100.
v10: Updates damage function parameter to 2016R model.
v11: Increases TFP growth to 2016R model.
v12: Adjusts sigma growth and other TFP parameters to 2016R model.
v13: Adjusts utility function.
v14: Adjusts climate model to 2016R model.
v18: Final adjustment of carbon cycle to match 2016R.
V20: Final adjustment of climate model and other forcings; match equilibrium and transient temperature sensitivity from 2016R model.

v21: Adjusts for abatement in 2016R model.
v22: Is the current model (DICE-2016R).

Source : Nordhaus (2017)

Il est important de souligner dans cette étape, que la séquence est une progression logique et non un ensemble d'étapes temporelles. Certaines des premières étapes (telles que le changement en dollars de 2010) ont eu lieu à la fin, tandis que plusieurs modifications ont été apportées à la modélisation du cycle du carbone au cours des années écoulées. En guise d'exemples nous avons le tableau 6 qui présente la décomposition du coût social du carbone pour 2015 et le tableau 7 qui présente un calcul similaire pour l'augmentation de la température à l'horizon 2100.

Tableau 6. Décomposition de l'évolution du coût social du carbone, 2015

Change in Social Cost of Carbon (SCC), 2015			
<i>From</i>	<i>To</i>	<i>Changed variable</i>	<i>Change due to These variables</i>
v14	v18	Carbon cycle	66%
v9	v10	Damage Function	59%
v12	v13	Utility Function	47%
v6	v7	Initial Output	36%
v10	v11	Productivity growth	15%
v21	v22	DICE-2016R	13%
v13	v14	Climate model Climate	8%
v18	v20	Parameters Abatement	2%
v20	v21	function	0%
v7	v9	Initial Emissions and Concentrations	-1%
v11	v12	CO2 /GDP ratio and trend	-9%

Source: Nordhaus (2017)

Tableau 7 : Décomposition des variations de la température mondiale 2100

Change in global temperature, 2100			
<i>From</i>	<i>To</i>	<i>Changed variable</i>	<i>Change due to this variables</i>
v14	v18	Carbon cycle	22%
v21	v22	DICE-2016R	11%
v10	v11	Productivity growth	8%
v13	v14	Climate model Initial	4%
v6	v7	output	4%
v12	v13	Utility function	1%
v20	v21	Abatement function	0%
v9	v10	Damage function	0%
v18	v20	Climate parameters	-3%
v11	v12	CO2 /GDP ratio and trend	-4%
v7	v9	Initial Emissions and Concentrations	-10%

Source: Nordhaus (2017)

La liste du tableau 6 indique les principales sources de révision des estimations du coût social du carbone de 1992 à 2017 dans l'ordre tandis que celle du tableau 7 indique

les principales sources de révision des prévisions de la température mondiale de 1992 à 2017 dans l'ordre. Les tableaux 8 et 9 présentent l'ensemble des résultats de la révision pour les années 2015 et 2100.

Le tableau 8 nous montre l'impact des différentes révisions sur chaque variable pour le niveau projeté de 2100. Par exemple, la colonne en haut et à gauche, intitulée « *Émissions industrielles* » indique l'impact du changement de la variable intitulée « *Variable modifiée* ». C'est-à-dire que le passage de v6 à v7 apportait une correction pour la sortie initiale (2015). Cela a augmenté les émissions prévues pour 2100 de 7%.

Tableau 8 : Décomposition des modifications apportées aux variables importantes, 2100

For year 2100											
From	To	Changed variable	Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	Atmospheric concentration C (ppm)	Atmospheric Temperature (°C)	Output (trillions 2010\$)	Climate Damages (% output)	Consumption per capita (2020\$)	Carbon Price (per t CO ₂)	Emissions Control Rate(%)	Social cost of carbon (\$/tCO ₂ 2010\$)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	100%
v6	v7	Initial output	7%	4%	4%	35%	7%	25%	34%	3%	34%
v7	v9	Initial Emissand Conc	-20%	-12%	-10%	0%	-19%	0%	-93%	-80%	4%
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	-1%	58%	-1%	0%	0%	56%
v10	v11	TFP	51%	13%	8%	217%	17%	216%	7952%	682%	252%
v11	v12	CO ₂ /GDP	-28%	-8%	-4%	-15%	-8%	-15%	-61%	-48%	-19%
v12	v13	Utility function	3%	1%	1%	3%	2%	1%	0%	0%	48%
v13	v14	Climate model	0%	0%	4%	0%	9%	0%	0%	0%	8%
v14	v18	Carbon cycle	0%	34%	22%	-2%	48%	-1%	0%	0%	43%
v18	v20	Climate params	0%	2%	-3%	0%	-6%	0%	0%	0%	6%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%
v21	v22	All others	-5%	-3%	11%	2%	28%	-9%	-67%	0%	52%

For year 2100											
From	To	Changed variable	Interest Rate(% per year)	Population (billions)	Per capita GDP growth, difference (% per year)	Capital stock (trillions 2010\$)	Savings rate (%)	Investment (trillions, 2010\$)	CO ₂ /output ratio (tCO ₂ /000 2010\$)	Total forcings (W/m ²)	Other Forcings (W/m ²)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	-50%	0%	0%
v6	v7	Initial output	0%	8%	0%	35%	0%	35%	-21%	4%	0%
v7	v9	Initial Emissand Conc	0%	0%	1%	0%	0%	1%	-21%	-11%	0%
v9	v10	Damage function	0%	0%	-1%	-1%	0%	-1%	1%	0%	0%
v10	v11	TFP	41%	0%	154%	166%	1%	220%	-52%	12%	0%
v11	v12	CO ₂ /GDP	-3%	0%	-4%	-14%	0%	-15%	-15%	-7%	0%
v12	v13	Utility function	-16%	0%	1%	13%	10%	13%	0%	1%	0%
v13	v14	Climate model	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v14	v18	Carbon cycle	-1%	0%	-1%	-1%	0%	-2%	1%	27%	0%
v18	v20	Climate params	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-4%	-30%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v21	v22	All others	-9%	5%	1%	13%	29%	31%	-7%	-11%	0%

Source : Nordhaus (2017)

Le tableau 9 nous montre l'impact de différentes révisions sur chaque variable pour le niveau projeté pour 2015. Par exemple, la colonne en haut à gauche intitulée « *Émissions industrielles* » indique l'impact du changement de la variable intitulée « *Variable modifiée* ». En d'autres termes, le passage de v6 à v7 a corrigé la sortie initiale (2015). Cela a augmenté les émissions prévues pour 2015 de 7%.

Tableau 9 : Décomposition de l'évolution des variables importantes, 2015

For year 2015											
From	To	Changed variable	Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	Atmospheric concentration C (ppm)	Atmospheric Temperature (°C)	Output (trillions 2010\$)	Climate Damages (% output)	Consumption per capita (2020\$)	Carbon Price (per t CO ₂)	Emissions Control Rate(%)	Social cost of carbon (\$/tCO ₂ 2010\$)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	100%
v6	v7	Initial output	7%	2%	2%	35%	5%	26%	36%	4%	36%
v7	v9	Initial Emission and Conc	-23%	-2%	4%	0%	7%	0%	-94%	-82%	-1%
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	0%	59%	0%	0%	0%	59%
v10	v11	TFP	15%	1%	1%	13%	1%	13%	-2%	0%	15%
v11	v12	CO ₂ /GDP	-7%	1%	3%	-9%	5%	-9%	107%	49%	-9%
v12	v13	Utility function	2%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	47%
v13	v14	Climate model	0%	0%	3%	0%	7%	0%	0%	0%	8%
v14	v18	Carbon cycle	0%	-2%	-24%	0%	-42%	0%	0%	0%	66%
v18	v20	Climate params	0%	2%	11%	0%	22%	0%	0%	0%	2%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v21	v22	All others	-6%	-2%	-24%	-5%	-42%	-100%	171%	0%	13%

For year 2015											
From	To	Changed variable	Interest Rate(% per year)	Population (billions)	Capital stock (trillions, 2010\$)	Savings rate (%)	Investment (trillions, 2010\$)	CO ₂ /output ratio (tCO ₂ /000 2010\$)	Total forcings (W/m ²)	Other Forcings (W/m ²)	
v4*	v6	Price level	0%	0%	100%	0%	100%	-50%	0%	0%	
v6	v7	Initial output	0%	8%	35%	0%	35%	-21%	3%	0%	
v7	v9	Initial Emission and Conc	0%	0%	0%	0%	0%	-23%	-5%	0%	
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
v10	v11	TFP	22%	0%	2%	0%	14%	2%	2%	0%	
v11	v12	CO ₂ /GDP	-1%	0%	-9%	0%	-9%	2%	2%	0%	
v12	v13	Utility function	-11%	0%	9%	7%	10%	0%	1%	0%	
v13	v14	Climate model	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
v14	v18	Carbon cycle	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-3%	0%	
v18	v20	Climate params	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-7%	-44%	
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
v21	v22	All others	12%	0%	0%	31%	24%	-2%	-12%	0%	

Source : Nordhaus (2017)

3. Conclusion

Au cours des trois dernières décennies, les modèles d'évaluation intégrée (IAM) du changement climatique ont accompli des avancées notables. Ces progrès ont été rendus possibles par des investigations théoriques en science fondamentale et en économie (incluant le développement de l'économie publique, de la théorie des jeux et de l'économie environnementale). Cependant, la technologie a aussi joué un rôle considérable dans le développement des modèles actuels avec une amélioration du matériel informatique, des logiciels, des algorithmes et la disponibilité et l'accès à de meilleures données. Parmi les résultats les plus importants des IAM, figurent sans doute l'estimation des mesures de réduction des émissions de CO₂ et de tarification du carbone nécessaires pour atténuer le changement climatique. Il y a encore cinq décennies, cette prise de conscience et les débats autour de la tarification du carbone, ne figuraient pas dans la littérature scientifique. Aujourd'hui, avec l'évolution des IAM, les prix du carbone et les estimations du coût social du carbone ont été intégrés

dans les décisions réglementaires des principaux pays de l'OCDE et de plusieurs pays en développement.

Parmi ces IAMs, le modèle DICE a rencontré un énorme succès. Quatre raisons peuvent être avancées ici. La première réside dans les multiples révisions proposées par Nordhaus : une version intermédiaire (Nordhaus, 2008) et une version réactualisée (Nordhaus 2017). Au final, le modèle DICE a fait l'objet de nombreuses itérations, incorporant des résultats économiques et scientifiques récents et des données économiques et environnementales mises à jour. La seconde repose sur une description détaillée du modèle (Nordhaus, Sztorc, 2013) avec la mise à disposition du public du manuel DICE et la possibilité de faire des simulations. La troisième concerne la médiatisation de DICE via les publications et travaux du GIEC (dès 1995) et de nombreuses agences de l'énergie (dont l'agence américaine). La quatrième renvoie à la manière d'appréhender les *Integrated Assessment Models*. Le modèle DICE a initié une manière de penser l'intégration, que l'on peut résumer par le processus suivant : intégration des émissions de CO₂, impacts sur les activités économiques, mesures de politiques économiques. De ce fait, le triptyque (Climat, Energie, Economie) constitue aujourd'hui la trame principale des modèles d'assignation intégrée.

Bien entendu, les travaux en matière de modèles intégrés ne se limitent pas au modèle DICE, d'autres modèles ont vu le jour dans les années 90, ICAM (Dowlatabadi, Morgan, 1993), IMAGE (Alcamo, 1994), MERGE (Manne et al., 1993)... Certains comme IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environmental) revendiquent même le statut de modèles globaux, complexes et interdisciplinaires.

Dans les discussions autour des IAM et de leur capacité à décrire des systèmes de plus en plus complexes, les regards sont aujourd'hui tournés dans deux directions.

(1) Si les projections de la plupart des variables environnementales (telles que les émissions de CO₂, les concentrations de CO₂ et les changements de température) ont connu des révisions relativement mineures, celles relatives aux variables économiques, notamment celles qui étaient prévues pour 1992 et qui se réalisent maintenant en 2017, ont considérablement évolué. Le modèle DICE et la communauté des modélisateurs doivent désormais relever plusieurs défis : la prise en compte de l'incertitude, l'intégration des changements technologiques et la nécessité de penser les mécanismes d'une gouvernance mondiale du climat, plus équitable et plus démocratique.

(2) Au-delà de la structure des modèles proprement dite, il convient d'assigner aux IAM, une véritable dynamique sociale (Dierickx, Diemer, Gladkykh, Spittler, 2018). Cette dynamique pourrait s'appuyer sur les récents travaux du Consortium des IAMs visant à concevoir des récits (Narratives for Shared Socioeconomic Pathways, NSSP) décrivant les grandes tendances socioéconomiques qui pourraient façonner la société de demain (O'Neill, 2017) ou intégrer un champ d'études relatif aux normes sociales nécessaires pour atténuer les effets du changement climatique ou s'y adapter.

Ces défis n'épuisent pas pour autant les discussions sur les IAMs, ils leur donnent au contraire une dimension prédictive et réflexive en matière de responsabilités individuelles et collectives. L'amélioration de ces modèles constituerait une sorte de leitmotiv pour les chercheurs et les décideurs politiques, visant à agir en faveur de notre climat.

Références bibliographiques

Alcamo, J. 1994. IMAGE 2.0, Integrated Modelling of Global Climate Change. Kluwer Academic Publishers.

Alcamo, J., Shaw, R., Hordijk, L. 1990. The RAINS model of acidification: Science and strategies in Europe, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands

Cass D. 1965. Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation. Review of Economic Studies, 32(3), 233-240.

Clark, D. L. 1982. Origin, nature and world climate effect of Arctic Ocean ice-cover. Nature, 300, (5890), 321.

Diemer, A. 2015. Le développement durable et les économistes. Editions Oeconomia.

Diemer, A., Figuière, C, Pradel, M. 2013. Ecologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable. Editions Oeconomia.

Diemer, A. 2004. Le développement durable et la dynamique des systèmes. Document de travail, 2004-05, HERMES. Université de Reims, 24 mai, 12 p.

Dierickx, F., Diemer, A., Gladkhyk, G., Spittler, N. 2018. Integrated Assessment Models : Challenges and Prospects. Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium, november 13th – 15th, Seville, Spain.

Dowlatabadi, H., Morgan, M.G. 1993., Integrated Assessment of Climate Change. Science, 259, (5103).

Easterling, W. E., Crosson, P. R., Rosenberg, N. J., McKenney, M. S., Katz, L. A., Lemon, K. M. 1993. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region. Climatic Change, 24 (1-2), 23-61.

Edmonds, J. A., Reilly, J. M. 1985. Future global energy and carbon dioxide emissions. Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle, 215-246.

Grobecker, A.J., Coronili, S.C, Cannon R.H. 1974. The report of findings: The effects of stratospheric pollution by aircraft, DOT-TST-75-50. U.S. Department of Transportation. Climatic Impact Assessment Program. National Technical Information Service. Springfield, VA.

Häfele, W., Anderer, J., Macdonald, A. 1981. *Energy in a finite world*. Ballinger Publishing Company.

- Hulme, M., Raper, S. C., Wigley, T. M. 1995. An integrated framework to address climate change (ESCAPE) and further developments of the global and regional climate modules (MAGICC). *Energy policy*, 23(4-5), 347-355.
- Kelly, D. L., Kolstad C.D. 1999. Integrated Assessment Models For Climate Change Control. In Folmer H., Tietenberg T. (eds). *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Kolstad, C. D. 1996. Learning and Stock Effects In Environmental Regulation: The Case Of Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 1-18.
- Koopmans, T. C. 1965. On the Concept of Optimal Economic Growth. *Academiae Scientiarum Scripta Varia*, 28(1), 1-75.
- Lashof, D. A., Tirpak, D. A. 1989. Policy Options for Stabilizing Global Climate: Executive summary. United States Environmental Protection Agency. Office of Policy, Planning, and Evaluation.
- Manne, A.S, Mendelsohn, R., Richels, R.G. 1993. MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GhG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23, 17 – 34.
- Matarasso, P. 2007. La construction historique des paradigmes de modélisation intégrés : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission » in Dalmedico A.D (ed). *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.
- Matarasso, P. 2003. Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique. *Annales des Ponts et Chaussées*, 71 – 79.
- Meadows, D.H, Randers, J., Meadows; D. 2004. *Limits to Growth, The 30-year Update*. Chelsea Green Publishing.
- Meadows, D.H, Meadows D.L, Randers, J. 1992. *Beyond the Limits*. Earthscan Publications Limited.
- Meadows, D. H., Meadows, D. H., Randers, J., Behrens III, W. W. 1972. The limits to growth. Report to the club of Rome.
- Meadows, D., Richardson, J., Bruckmann, G. 1982. *Groping in the dark: the first decade of global modelling*. John Wiley & Sons.
- Mesarovic, M., Pestel, E. 1974. *Mankind at the turning point*. The second report to the Club of Rome.
- Mintzer, I. M. 1987. *A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect*. World Resources Institute.
- Nakicenovic, N., Nordhaus, W. D., Richels, R., Toth, F. L. 1994. Integrative assessment of mitigation, impacts, and adaptation to climate change.

- Ndiaye, A., Diemer, A., Gladkykh, G. (2017), Le Climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée (IAM). *Revue Francophone du Développement Durable*, 9, mars, 7 – 56.
- Negishi, T. 1961. On the formation of prices. *International Economic Review*, 2 (1), 122-126.
- Negishi, T. 1962. The Stability of a Competitive Economy: A Survey Article. *Econometrica*, 30 (4): 635-639.
- Nordhaus, W. D. 2017. Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992–2017. National Bureau of Economic Research.
- Nordhaus, W. D. 2011a. Estimates of the Social Cost of Carbon: Background and Results from the RICE-2011 Model. New Haven, CT. USA. Cowles Foundation Discussion Paper.
- Nordhaus, W. D. 2010. Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment. *Proceedings of the U.S. National Academy of Sciences*, 107 (26), 11721-1172.
- Nordhaus, W.D. 2007. The Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45, 3, 686–687.
- Nordhaus, W. D., Boyer J. 2000. *Warming the World: Economic Modeling of Global Warming*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Nordhaus, W. D. 1994. *Managing the global commons: the economics of climate change*. Cambridge, MA: MIT press.
- Nordhaus, W. D., Yohe, G. W. 1983. Future paths of energy and carbon dioxide emissions. *Changing climate. Report of the carbon dioxide assessment committee*, 87.
- Nordhaus, W. D. 1979. *Efficient use of energy resources*. Yale University Press, New Haven, CT, USA.
- Nordhaus, W. D. 1977. Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. *The American Economic Review*, 67, 1, 341 – 346.
- Nordhaus, W. D. 1974. Resources as a Constraint on Growth. *American Economic Review*, 64, 2, May, 22 – 26.
- Nordhaus, W. D. 1973. The allocation of energy resources. *Cowles Foundation Papers*, 401.
- Nordhaus, W. D. 1973. World Dynamics, Measurement Without Data. *The Economic Journal*, 83, 332, 1156 – 1183.
- Nordhaus, W. D., Tobin, J. 1972. IS Growth Obsolete?, in Nordhaus W., Tobin J. (eds), *Economic Research, Retrospect and Prospect*, 5, Economic Growth, NBER, 1 – 80.

O'Neill, B.C et ali. 2017. The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways describing world futures in the 21st Century. *Global Environmental Change*, 42, 169 – 180.

Pindyck, R. S. 2013. Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 51 (3): 860-72.

Ramsey, F. 1928. A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*, 38(152): 543–559.

Rogelj, J. et al. 2010. Copenhagen Accord pledges are paltry. *Nature*, 464, 1126–1128.

Rosenberg, N. J., Crosson, P. R. 1991. Processes for identifying regional influences of and responses to increasing atmospheric CO₂ and climate change-the MINK project: An overview (No. DOE/RL-01830T-H5 (TRO52A); TRO-52A). Battelle Memorial Inst., Columbus, OH (United States). Office of Nuclear Waste Isolation.

Rotmans, J., De Boois, H., Swart, R. J. 1990. An integrated model for the assessment of the greenhouse effect: the Dutch approach. *Climatic Change*, 16(3), 331-356.

United Nations N. 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. *New York*, 9.

United Nations – DPI. 2005. ONU Info-PNUE : le stockage du CO₂ pourrait être à terme une arme efficace contre le changement climatique.

Weyant, J., Davidson, O., Dowlabathi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E. A., & Cline, W. 1996. *Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results* (367-396). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.