



HAL
open science

L'intégration des ressources naturelles dans la modélisation macroéconomique : l'empreinte de Robert M. Solow

Marion Gaspard, Antoine Missemmer

► **To cite this version:**

Marion Gaspard, Antoine Missemmer. L'intégration des ressources naturelles dans la modélisation macroéconomique : l'empreinte de Robert M. Solow. *Revue Française d'Economie*, 2023, XXXVII (3), pp.147-184. 10.3917/rfe.231.0147. hal-04058375

HAL Id: hal-04058375

<https://enpc.hal.science/hal-04058375v1>

Submitted on 4 Apr 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**L'INTÉGRATION DES RESSOURCES NATURELLES
DANS LA MODÉLISATION MACROÉCONOMIQUE :
L'EMPREINTE DE ROBERT M. SOLOW**

-
Marion GASPARD*
Antoine MISSEMER†

Référence:

GASPARD, Marion & MISSEMER, Antoine. 2023. “L’intégration des ressources naturelles dans la modélisation macroéconomique : l’empreinte de Robert M. Solow”, *Revue française d’économie*, 3(XXXVII), 147-184. <https://doi.org/10.3917/rfe.231.0147>

La pagination de la version publiée est indiquée en marge.

-
Résumé

Dans les années 1970, choc pétrolier et rapport Meadows [1972] ont contraint les économistes d’inspiration néoclassique à réagir aux alertes sur les limites à la croissance et à s’interroger sur la place des ressources naturelles, en particulier épuisables, dans les processus de production. Très vite, ils ont dénoncé les scénarios apocalyptiques, soulignant l’existence de mécanismes d’ajustement (variations de prix, transformations techniques ou institutionnelles). Cet article revient sur le rôle tant théorique qu’institutionnel joué par Robert M. Solow et certains de ses collaborateurs (notamment Joseph E. Stiglitz et William D. Nordhaus) dans cette reconfiguration de la macroéconomie. Il apparaît que Solow a rapidement cherché à occuper le terrain, dans un contexte de luttes internes au MIT, invitant ses anciens étudiants à redonner une légitimité à la science économique, quitte à amener les débats sur des questions techniques – la forme des fonctions de production – plus que paradigmatiques. Mais, alors que la plupart des critiques adressées aujourd’hui aux travaux de l’époque portent sur ces questions techniques (substitution des facteurs, backstop technology, confiance dans le marché pour l’ajustement des prix), cet article souligne que ce sont davantage certains partis pris, comme la désirabilité de la croissance ou encore la traduction de tout enjeu environnemental en décision d’investissement, qui méritent d’être interrogés. L’histoire de l’intégration des ressources naturelles dans la modélisation macroéconomique apparaît ainsi plus riche et plus complexe que ce que l’on en dit habituellement.

* [En 2023] Université Lyon 2, Triangle (UMR 5206), ISH, 14 avenue Berthelot, F-69363 Lyon Cedex.
E-mail: marion.gaspard@univ-lyon2.fr

† [En 2023] CNRS, CIRED Paris – Centre international de recherche sur l’environnement et le développement (UMR 8568 CNRS/ENPC/EHESS/AgroParisTech-University-of-Paris-Saclay/CIRAD), 45 bis av. de la Belle Gabrielle, F-94736 Nogent-sur-Marne Cedex. E-mail: antoine.missemer@cnrs.fr

“The title of my Ely lecture “The Economics of Resources or the Resources of Economics” was not merely a pun: Hotelling was interested in the first half and I, in the second. My motive was to establish that there was a relevant body of economic thought as an alternative to Forrester et al.”

Robert M. Solow,
lettre du 22 juin 2020 aux auteurs

En 1972, la publication du rapport Meadows, *The Limits to Growth*, a contribué à porter dans les arènes scientifiques et auprès de l’opinion publique la question des limites planétaires (Rockström *et al.* [2009]), au premier rang desquelles la rareté des ressources naturelles et la recrudescence des pollutions locales. Rapidement, les économistes, alors partisans d’une croissance économique soutenue (Schmelzer [2016]), ont été amenés à réagir, voire à se défendre, jugeant peu crédibles certaines hypothèses du rapport, et voyant dans les fluctuations de marché et dans le progrès technique des mécanismes d’ajustement susceptibles d’éviter les scénarios apocalyptiques.

Il n’est pas rare aujourd’hui de lire que Meadows et ses co-auteurs avaient vu juste (Turner [2008]), et que les économistes, *a contrario*, ont pêché par excès d’orgueil, au risque de précipiter le système économique dans des périls plus grands encore, à commencer par le changement climatique (Pottier [2016]; Pestre [2020]; Acemoglu [2021]). Dennis L. Meadows [2022] lui-même a pu pointer du doigt la responsabilité, selon lui, des économistes « notamment aux États-Unis, qui ont construit toute leur carrière sur la notion de croissance infinie ». Certes, la discipline économique peine encore aujourd’hui à prendre pleinement en compte les enjeux environnementaux, comme en témoigne le peu de publications consacrées à ces sujets dans les revues les plus structurantes (Oswald et Stern [2019]), mais les contributions des années 1970 n’ont pas seulement été des réactions de circonstances, limitées à de sommaires critiques du rapport Meadows et de ses implications ; elles ont impulsé de nouveaux agendas de recherche ; elles ont indirectement conduit à la création de l’association des économistes de l’environnement et des ressources en 1979 ; et elles font

encore aujourd’hui partie des références les plus citées par toutes celles et ceux s’intéressant au croisement entre enjeux économiques et environnementaux. Il semble donc judicieux de revenir sur cette période des années 1970 pour mieux comprendre les termes du débat à l’époque, et éclairer ainsi avec davantage d’acuité l’état de la macroéconomie environnementale aujourd’hui.

Parmi les acteurs de ces débats américains opposant, au tournant des années 1970, « conservationnistes et économistes » (Koopmans [1973] p. 17), on compte en particulier, du côté des économistes, Robert M. Solow, Joseph E. Stiglitz, William D. Nordhaus, Milton C. Weinstein, Richard J. Zeckhauser, John M. Hartwick, Partha S. Dasgupta et Geoffrey Heal. Ce qui frappe rapidement à l’énonciation de cette liste, c’est que la plupart de ces auteurs ont en fait étudié, ou été en contact, avec Solow, soit au MIT dès la fin des années 1960, soit à l’occasion de conférences ou d’écoles d’été tout au long des années 1970. Ensemble, ils ont formé un groupe influent au-delà des États-Unis, structurant la discipline.

Jusqu’à présent, la littérature a eu tendance à présenter cette période d’effervescence au sein de la macroéconomie américaine à travers deux grilles d’analyse. Certains ont mis en évidence la fusion de deux modèles dynamiques de tradition néoclassique : le modèle de Ramsey [1928] dans sa version de croissance optimale (Koopmans [1963] ; Cass [1965]) et le modèle de Hotelling [1931] – une fusion pleinement réalisée par Dasgupta et Heal [1974, 1979]. C’est l’histoire retenue par Heal [2009], mais aussi par Pearce [2002], et plus globalement par la macroéconomie contemporaine (sur les rapprochements Ramsey-Hotelling, *cf.* aussi Gaspard et Missemer [2019]). D’autres ont insisté sur les propositions de Solow [1974a] et Stiglitz [1974a ; 1974b] de marier logique à la Hotelling de tarification optimale des ressources épuisables et analyse des conditions permettant le maintien à long terme de trajectoires de consommation par tête non décroissantes. En mettant en avant des conditions de substituabilité des facteurs (capital, travail et ressources naturelles), Solow et Stiglitz ont défini le cadre d’une approche environnementale en termes de soutenabilité dite faible (Neumayer [1999]). C’est l’histoire mise en avant par Hartwick [2009] ou Daly [1997], et

analysée par Erreygers [2009], Pottier [2014], ou encore Couix [2020].

Malgré un rôle différent attribué à Solow dans les deux récits, ces lectures se rejoignent en ce qu'elles conduisent à identifier la publication d'un numéro spécial de la *Review of Economic Studies* (vol. 41, [1974]) comme point de départ d'une macroéconomie néoclassique de l'environnement. Elles se rejoignent aussi par l'accent mis sur les innovations théoriques, voire techniques, apportées par les auteurs. Et c'est précisément sur ces points-là que les critiques ultérieures ont porté, accusant Solow et ses acolytes d'une confiance excessive dans le progrès technique et les ajustements de prix pour expliquer les mécanismes de substitution (e.g. Pearce et Turner [1990] ; Daly [1997]).

Pourtant, à y regarder de plus près, la macroéconomie environnementale n'a pas toujours pris, à l'époque, les traits caricaturaux qu'on lui attribue parfois. Si la substitution des facteurs a été structurante dans les débats, elle ne s'apparentait pas, par exemple, à un remplacement brutal (et quelque peu naïf) du facteur *R* (ressources naturelles agrégées) par d'autres facteurs (travail et capital). En lisant attentivement Solow, Stiglitz et Nordhaus, on se rend compte que l'analyse menée à l'époque ne pêchait pas tant que cela par des choix techniques (e.g. la forme des fonctions de production) que par des partis pris théoriques, voire idéologiques, plus subreptices : une désirabilité de la croissance, une compréhension des problèmes environnementaux comme se résumant à des décisions d'investissement, ou encore une tendance à expurger des modèles tous les sujets complexifiant à l'excès les équations.

Cette contribution vise à rendre compte des modalités d'émergence de la macroéconomie environnementale d'inspiration néoclassique autour de Solow dans les années 1970, en nuanciant les critiques techniques qui lui sont souvent adressées, mais en montrant que d'autres aspects, plus en arrière-plan, peuvent interroger, en particulier aujourd'hui face à l'ampleur des défis environnementaux qui se dressent devant nous.

La suite de cet article est organisée de la façon suivante. Dans la première section, nous retraçons les réactions de Solow à ce qu'il envisage alors comme des « *doomsday models* » – fondamentalement les divers scénarios du rap-

port Meadows. Dans la deuxième section, nous revenons sur les propositions théoriques (et programmatiques) alternatives formulées par Solow, Stiglitz et Nordhaus en termes de substitution des facteurs, de « *backstop technology* » et d'ajustements de prix par les marchés. Dans la troisième section, enfin, nous discutons les partis pris d'arrière-plan qui ont conduit Solow et ses anciens étudiants à emprunter la voie qu'ils ont choisie. La conclusion met en évidence les effets de résonance entre cet épisode et la recherche contemporaine en économie de l'environnement.

Robert M. Solow contre les *doomsday models*

The Limits to Growth [1972]

Rétrospectivement, le Club de Rome apparaît comme un objet singulier, animé initialement par des scientifiques, experts et personnalités issues du monde politique et de l'entreprise s'intéressant aux grands problèmes du monde. Les liens étroits entre le Club de Rome et l'OCDE – Alexander King en est le symbole le plus frappant – peuvent surprendre aujourd'hui, mais soulignent combien les premières interrogations sur l'avenir de la croissance prenaient place au sein de cercles internationaux combinant institutions établies et discours plus iconoclastes (Schmelzer [2016]). C'est la rencontre du Club de Rome avec les travaux de Jay W. Forrester [1971] sur la dynamique des systèmes qui va conduire à la préparation du rapport Meadows sur les limites à la croissance. Bien que le rapport soit présenté comme un travail pluridisciplinaire, il est rédigé par quatre membres du System Dynamics Group abrité par la MIT Sloan School of Management, où enseigne Forrester. Meadows, superviseur de l'équipe, vient d'y soutenir sa thèse sur la stabilité des cycles [1969], après une formation de chimiste. Donella H. Meadows, rédactrice du rapport, vient de rejoindre le groupe après une thèse en biochimie. Jorgen Randers, venu au MIT pour y poursuivre des études de physique, rejoint finalement le groupe à son arrivée pour débiter une thèse sur les dynamiques des émissions polluantes (Anker [2020] pp. 146-147). William W. Behrens III, ingénieur en électricité, amorce un travail sur les ressources naturelles.

Le rapport simule les conséquences à venir de la croissance économique et démographique en considérant les risques d'épuisement des ressources naturelles, en particulier énergétiques, d'une part, et ceux liés à des pollutions excessives d'autre part. Les variables en interaction sont les suivantes : population globale, superficie cultivable par personne, stock de ressources naturelles épuisables, portions alimentaires par personne, production industrielle par personne, capital accumulé, niveau de pollution, et espérance de vie. Est alors construite une série de scénarios à horizon 2000-2030, sur la base d'extrapolations de trajectoires passées pour chacune des variables. En sus du scénario tendanciel sont proposés des scénarios avec inflexions de trajectoire ou changements de comportements (démographie, recyclage, découverte de gisements, etc.). Dans le scénario tendanciel, l'humanité est appelée à buter sur l'épuisement des ressources (surtout les hydrocarbures), faisant chuter le PIB/tête, exploser la pollution, et conduisant à un effondrement démographique. En cas de stock de ressources naturelles bien plus important que prévu, la pollution s'en trouverait renforcée à un point tel qu'un effondrement se produirait également, *via* une baisse de la production agricole et un déclin démographique concomitant. En cas de contrôle de la pollution, c'est la quantité de terres arables qui viendrait à manquer. Et en cas de contrôle démographique strict, la croissance économique pourrait se poursuivre plus longtemps, mais avec là aussi une issue fatale, en raison d'une pollution industrielle devenant peu à peu insoutenable.

Le rapport, on le voit, ne pouvait qu'interroger sur l'opportunité de construire le futur sur la croissance industrielle. Son succès médiatique (*cf.* Vieille Blanchard [2011]) ne pouvait qu'interpeller les économistes de la croissance et, le premier d'entre eux, Solow : comment le département voisin du MIT – Forrester et Solow se connaissaient et étaient à proprement parler voisins – pouvait-il ainsi intituler un rapport « The Limits to Growth » sans même accueillir un économiste dans l'équipe ? Très vite, Solow [1973] s'est montré agacé que le rapport soit associé au MIT, dont le département d'économie, initialement modeste au sein de la prestigieuse institution, devenait un lieu

incontournable d'enseignement et de recherche aux États-Unis (Cherrier [2014]).

MIT contre MIT

En 1972, Solow est une figure respectée de la science économique. Recruté au MIT en 1951 par Paul A. Samuelson, après avoir soutenu sa thèse à Harvard sous la direction de Wassily Leontief, il n'a jamais souhaité quitter cette institution, conscient de contribuer à l'originalité d'un département qu'il décrit comme un petit groupe d'amis travaillant avec passion (« *a small high morale group doing a job* » – Solow [2007] p. 5).

Les travaux de Solow en économie de la croissance plongent leurs racines dans ses premières discussions avec Samuelson sur les fonctions de production à rendements d'échelle constants (Solow et Samuelson [1953]). Ils se déploient en travaux théoriques (Solow [1956]) explorant l'hypothèse d'un *continuum* de techniques sur les profils de croissance, et en travaux empiriques (Solow [1957]) sur les contributions respectives des facteurs de production à la croissance de longue période. Ils se complètent d'un plaidoyer méthodologique sur le potentiel de l'introduction de la programmation linéaire en économie – dans le but, entre autres, de dynamiser les blocs production des modèles *input-output* de Leontief (Dorfman *et al.* [1958]) – et de plusieurs prolongements – étude des bifurcations dans les trajectoires de croissance, mesures avancées du progrès technique, incorporation du progrès technique dans différentes générations de capital (*e.g.* Solow [1960]).

Ces travaux lui permettent d'être en 1961 récipiendaire de la John Bates Clark Medal, et de participer à l'attractivité d'un département qui compte également Charles Kindleberger (entré en 1948), Harold Freeman (en 1944), Cary Brown (en 1947), Robert Bishop (en 1942), et qui s'étoffe avec les recrutements de Franco Modigliani (en 1961), Peter Diamond (en 1965) ou encore Karl Shell (1964-1968). Au tournant des années 1970, il vient d'encadrer les thèses de Stiglitz (soutenue en 1967), George A. Akerlof (en 1967), Martin L. Weitzman (en 1967), Nordhaus (en 1967) et Avinash K. Dixit (en 1968).

Face au succès du rapport Meadows, et à la réputation entachée du MIT selon lui, Solow

lance rapidement une contreoffensive contre ce qu'il appelle les « *doomsday models* », ou modèles apocalyptiques, de Forrester (Solow [1972 ; 1974c]). Affirmant que ces modélisations sont « sans valeur, à la fois comme science et comme guides pour la politique publique » ([1972] p. 3832), il multiplie alors les interventions dans des conférences (e.g. à l'université de Lehigh en octobre 1972, à l'université du Nebraska en mai 1973) et dans la presse (Solow [1973]). Au MIT, il introduit dès la rentrée 1973 un nouveau cours consacré à l'économie des ressources naturelles. Il y consacre enfin sa « Ely Lecture » au congrès de l'American Economic Association, en décembre 1973 (Solow [1974b]), avant la sortie de sa seule véritable publication scientifique sur le sujet (Solow [1974a]), dont on peut trouver trace de versions préliminaires dès février 1973 dans les *working papers* du MIT.

Au fil de ces communications, Solow étoffe progressivement un argumentaire qui se construit sur trois critiques fondamentales, laissant transparaître, par contraposée, tout ce que la science économique pourrait apporter au débat sur l'épuisement des ressources naturelles. Tout d'abord, Solow [1972] identifie un défaut structurel de la modélisation Forrester-Meadows en ce qu'elle repose sur un socle erroné d'hypothèses, déterminant mécaniquement les conclusions : un ensemble fini de ressources ou de capacités de stockage des déchets, une utilisation croissante et extensive de ces stocks dans le temps, sans gain de productivité et sans formalisation de mécanismes de freinage à l'approche de l'épuisement. Il note ensuite que le rapport Meadows ne contient aucun système de prix, « dispositif principal proposé par le capitalisme (et même le socialisme) » ([1972] p. 3832) pour tenir compte des raretés relatives des biens. Le renchérissement d'une ressource naturelle serait évidemment la source d'incitations à une recherche active de solutions techniques pour limiter son usage. Il conduirait également à la recherche de facteurs de production substituables et/ou à la recherche de substituts moins gourmands en ressources. L'ensemble de ces substitutions (effectives ou potentielles) permettrait d'envisager l'hypothèse de la réalisation de gains de productivité sur les ressources épuisables. Enfin, Solow note que, pour le moment, le prix des ressources naturelles ne semble pas signifi-

cativement augmenter, laissant supposer que personne n'anticipe encore de réelles pénuries, et que ces jeux de substitutions sont déjà probablement à l'œuvre.

Dès 1972-1973, Solow double ses réactions scientifiques de stratégies institutionnelles pour ne pas laisser au rapport Meadows le champ libre. Il soutient l'organisation de plusieurs séminaires, colloques et symposiums, y contribuant parfois, définissant la question de la gestion des ressources épuisables (notamment énergétiques) comme prioritaire. Nordhaus et James Tobin [1972] animent ainsi une conférence sur le caractère obsolète (ou non) de la croissance au NBER ; Michael Macrakis [1974] organise une grande conférence pluridisciplinaire sur l'énergie, au MIT, en février 1973¹ ; Kermit Gordon lance une série de séminaires à la Brookings Institution de Washington, tout comme Thomas Schelling à Harvard, pendant que McGeorge Bundy s'attèle à un programme de recherche sur la politique énergétique, financé par la Ford Foundation.

Ces manifestations scientifiques ne sont que quelques unes parmi d'autres organisées en réaction au rapport Meadows (Vieille Blanchard [2011]). Solow n'en a pas toujours été l'initiateur mais son nom apparaît partout, dans les remerciements et dans les comptes rendus, comme s'il avait suivi, de près ou de loin, tout ce qui se passait sur la côte Est des États-Unis. Sa proximité avec les organisateurs de ces événements a pu favoriser son intérêt². La discussion

¹ La conférence est organisée par le tout jeune Energy Laboratory du MIT et la National Research Foundation et s'intéresse globalement aux conditions (économiques et techniques) d'exploitation de ressources énergétiques autorisant le maintien de certaines conditions de croissance économique. Elle comprend plus de quarante communications, et accueille les premières versions des articles de Koopmans [1973], [1974], Nordhaus [1974] et Manne [1974], publiés ultérieurement dans la *Review of Economic Studies*.

² Solow, Tobin et Schelling étaient tous les trois doctorants à Harvard à leur retour de la guerre. Tobin quitta Harvard pour Yale en 1950. Schelling quitta Harvard en 1951 pour une carrière de conseiller économique, avant d'y revenir en 1959 (après un bref passage à Yale). Solow et Tobin étaient, par ailleurs, avec Arthur Okun et Kermit Gordon, membres du Walter Heller's Council of Economic Advisers entre 1961 et 1964 auprès du président Kennedy. McGeorge Bundy était un peu plus âgé, professeur à Harvard avant de présider la Ford Foundation (1966-1979).

qu'il propose de ces travaux, dans son Ely Lecture de décembre 1973, apparaît comme une synthèse organisée de ce qu'il a lui-même largement impulsé : une critique acerbe des modèles de Forrester, et la mise en avant des ressources de l'économie pour s'emparer sérieusement de la question des limites à la croissance.

La naissance d'une macroéconomie environnementale

Sur la substituabilité des facteurs

Dès 1972-1973, il apparaît chez Solow presque une question d'honneur à dénoncer la méthodologie du rapport Meadows et plus globalement la dynamique des systèmes proposée par Forrester [1971] : cela fait plusieurs années que Forrester s'aventure sur des sujets économiques, opposant aux modélisations des économistes sa propre méthodologie³. Les arguments de Solow sont marqués par l'ironie mordante dont il sait parfois faire preuve. Il parle de « mauvaise science » ([1973] p. 43), d'une modélisation sans valeur aucune, tant du point de vue scientifique que du point de vue de l'accompagnement de la politique publique. Moquant une panique perpétuelle – a « *Chicken Little syndrome* » ([1972] p. 3833) – et comparant Forrester au « docteur Folamour » ([1973] p. 39), il présente le rapport comme une lapalissade (supposer des relations globalement extensives dans un monde fini implique que cela va s'arrêter), animée par une ancestrale (comprendre primitive) crainte du jugement dernier ([1973] pp. 48-49). On trouve les mêmes saillies du côté de Nordhaus [1973a ; 1973b] accusant Forrester, Meadows *et al.* d'opérer un retour en fanfare – avec des ordinateurs – aux thèses malthusiennes, promettant à l'humanité un niveau de vie digne de Néandertal.

L'ironie sert ici à dénoncer une hypothèse centrale du rapport Meadows : l'absence de considération de possibles gains de productivité dans l'usage des ressources épuisables et, en corolaire, l'absence de mécanismes de substitution entre les facteurs. Il s'agit pour Solow d'une

³ La thèse de Meadows [1969], sous la direction de Forrester, était par exemple très explicitement une critique des tentatives de dynamisation des modèles *input-output* proposées par Samuelson et Solow ([1953], [1956]).

« hypothèse cruciale » ([1956] p. 65), *i.e.* une hypothèse dont dépendent entièrement les conclusions de la modélisation. L'histoire, nous dit-il, aiguille vers l'hypothèse inverse. Nordhaus ([1973b] p. 1167) ne manque pas non plus de se référer au remplacement du charbon de bois par la houille à partir du XVIII^{ème} siècle, ou encore à l'émergence de l'énergie nucléaire au détriment des fossiles⁴. Solow [1973] propose de considérer une productivité moyenne agrégée pour différents types de ressources, un rapport Y/R_i dont il calcule le taux de croissance moyen sur la période 1951-1970. Il met en évidence, par exemple, une croissance continue de l'ordre de 2-2,5 % par an pour le fer, le manganèse ou le cuivre ; une croissance nulle de la productivité du nickel ou du pétrole, une chute moyenne de la productivité du gaz naturel, de l'aluminium ou du columbium, sans que ces chutes ne menacent la civilisation⁵. Chaque ressource naturelle prise séparément, indique Solow, peut connaître un cycle de vie de productivité qui lui est propre, en fonction de l'apparition de substituts⁶. À l'échelle macroéconomique, il semble raisonnable de supposer que, à l'instar de la productivité du travail, une productivité moyenne des ressources naturelles prises globalement connaît une croissance constante. Solow ([1973] p. 45) ne voit en tout cas pas de raison de faire l'hypothèse inverse.

Le raisonnement est traduit formellement dans un modèle de croissance intégrant trois facteurs de production (Solow [1974a]) : la quantité de travail L (supposée constante), le stock de capital K (accumulable) et un flux d'usage des ressources R supposé épuisable (disponible en quantité limitée). La fonction de pro-

⁴ Remarquons que cette lecture de l'histoire des transitions énergétiques peut prêter à discussion (Fressoz [2022]).

⁵ Solow s'inspire ici vraisemblablement des exercices rétrospectifs de mesure des effets de substitution entre ressources, menés à Resources for the Future par Harold J. Barnett et Chandler Morse [1963].

⁶ Quand une nouvelle ressource devient disponible, ou que l'évolution de la technologie lui confère des usages plus larges, elle peut se substituer à d'autres ressources plus anciennes. Elle voit un temps sa productivité (Y/R_i) diminuer, alors que la substitution augmente mécaniquement la productivité moyenne des ressources plus anciennes. Le pétrole, progressivement remplacé par d'autres sources d'énergie (gaz naturel, puis fission nucléaire), verra ainsi, tôt ou tard, sa productivité augmenter, à mesure que son usage relatif diminuera ([1973] p. 45).

duction à facteurs substituables suppose l'existence d'un *continuum* de techniques permettant des substitutions entre K et R pour le maintien d'une croissance constante de la productivité moyenne de R . Les rendements d'échelle sont supposés constants et les rendements factoriels décroissants. L'accumulation du capital est permise par une épargne dégagée sur la période précédente, au détriment de la consommation. La contrainte de production et la contrainte d'accumulation viennent conditionner un programme rawlsien d'optimisation visant à maximiser la consommation par tête des individus les moins bien lotis. Il s'agit alors d'étudier à quelles conditions cette consommation par tête peut être maintenue constante à l'état régulier. Logiquement, ces conditions dépendent du degré de substituabilité des facteurs (l'élasticité de substitution entre R et la combinaison capital-travail doit être supérieure ou égale à 1) mais aussi de l'impact respectif du capital (disponible en quantité croissante) et des ressources (dont le flux s'épuise peu à peu) sur la production⁷.

Il apparaît ici que les critiques parfois formulées envers les propositions de Solow quant à la substituabilité des facteurs ne rendent pas pleinement justice aux mécanismes décrits à l'époque. Nulle question pour Solow de considérer que les ressources sont pleinement remplaçables par du capital physique. L'idée n'est pas de dire que le fer ou le cuivre, ou le charbon ou le pétrole, sont remplaçables par du travail ou des machines, mais qu'au sein du facteur agrégé R s'opèrent des substitutions entre ressources (par exemple entre charbon et pétrole) *via* la médiation de l'accumulation du capital, de telle sorte que R continue d'alimenter la croissance, *via* des combinaisons productives possiblement évolutives.

Ainsi, un simple modèle intégrant les ressources naturelles semble montrer que, certes,

⁷ Deux remarques doivent être faites. Dans ce modèle sans progrès technique, la possibilité d'obtenir divers niveaux de production avec diverses combinaisons capital/ressources suppose que l'économie considérée est à un stade de développement suffisamment avancé offrant déjà un panel de techniques alternatives. La fonction de production suppose également une diversité de biens capitaux hétérogènes, qu'à la manière de Solow et Samuelson [1953] et de Solow [1956] il est formellement possible, et « heuristiquement utile » (Samuelson et Solow ([1956] p. 537), de représenter par un agrégat homogène K .

l'effondrement n'est pas totalement exclu, mais il apparaît hautement improbable. Les conditions de croissance constante de la consommation par tête paraissent peu restrictives. Elles sont en accord avec les résultats empiriques de Nordhaus et Tobin [1972]⁸. Et comme le précise Nordhaus ([1973b] p. 1167), « il est possible que notre capacité historique à trouver des substituts aux ressources rares s'estompe comme le suggèrent les modélisations à la Forrester, mais cela signifierait un futur très différent du passé ».

D'après Nordhaus [1973b], c'est plus largement l'ensemble des hypothèses sous-jacentes aux équations de comportements du modèle de dynamique des systèmes qui repose sur des pré-supposés invalidés par les données historiques recueillies par les sciences sociales : ignorance du phénomène de transition démographique ; hypothèses en contradiction avec les tendances historiques révélées par la comptabilité de la croissance ; non-distinction des types de ressources naturelles (leurs usages, la quantité disponible, leur ratio entre la consommation et la quantité disponible) ; non-distinction du secteur extractif des autres secteurs de production industrielle ; confusion, enfin, entre stocks et flux. Ces confusions, suggère-t-il, auraient été évitées si Meadows et Forrester avaient étudié les fonctions de production, la comptabilité de la croissance et les modèles multifactoriels, s'ils avaient, du moins, intégré des économistes à leur équipe.

Progrès technique et backstop technology

Dans les mécanismes de substitution entre ressources, la question du progrès technique, notamment *via* la réduction des coûts d'extraction mais aussi *via* l'émergence de nouvelles combinaisons productives, joue un rôle central. Solow [1974a] ne l'introduit pas formellement, mais on devine que la productivité globale des facteurs pourra élargir, au cours du temps, le spectre des combinaisons productives

⁸ Utilisant des données empiriques rassemblées par Denison [1967] sur la période 1909-1958 – où les ressources naturelles sont limitées à la terre (!) –, Nordhaus et Tobin [1972] notent les faits stylisés suivants : augmentation de la productivité du travail et de l'intensité capitalistique, baisse de la part des revenus tirés des ressources naturelles dans la valeur ajoutée, légère baisse du coefficient de capital (K/Y).

disponibles. Les contributions de Stiglitz [1974a] et Nordhaus [1973a ; 1974] complètent l'analyse avec une formalisation plus explicite du progrès technique.

Initialement destinée à étudier les possibilités d'une taxation optimale de l'industrie pétrolière, la contribution de Stiglitz [1974a] se présente finalement, elle aussi, comme une réponse au renouveau des théories de Malthus prédisant à tort une apocalypse imminente. Stiglitz propose un modèle de Solow augmenté et un modèle de croissance optimale. Il opte pour une fonction de production reliant capital, travail et ressources naturelles *via* une fonction Cobb-Douglas à rendements constants, avec une productivité globale des facteurs, exogène. Il étudie, dans ce cadre, les conditions de possibilité d'une croissance constante de la consommation par tête, avec, cette fois, une population croissante à taux constant. L'état régulier de ce modèle augmenté se caractérise alors par un rythme constant de prélèvement sur la ressource. Stiglitz met tout d'abord en avant une série de résultats liés à la substituabilité entre ressources et capital. À la différence du modèle de Solow [1956] traditionnel, la valeur du taux d'épargne devient déterminante, non seulement pour le niveau du PIB et de la consommation par tête à l'état régulier, mais aussi pour le rythme de croissance de ces variables à l'état régulier, l'accumulation du capital permettant de réduire la pression sur l'usage des ressources. Des taux élevés de prélèvement sont, à l'inverse, associés à des taux de croissance et des niveaux de PIB par tête plus faibles. Le progrès technique intervient alors de façon décisive, en soutenant la croissance par tête en dépit de la croissance de la population et de la pression sur les ressources. Une condition est à respecter : que le taux de croissance du progrès technique, relativement au taux de croissance de la population, soit suffisamment élevé pour compenser l'élasticité de la production au flux d'usage de la ressource épuisable ([1974a] p. 128). Enfin, Stiglitz complète l'analyse par une endogénéisation du taux d'épargne et du taux de prélèvement de la ressource, ce qui ne modifie pas profondément la nature de ses conclusions : la croissance soutenue de la consommation par tête est possible ; en outre, le taux optimal d'utilisation de la ressource obtenu, pour des valeurs raisonnables des paramètres du modèle, est de l'ordre d'une

magnitude observée pour la plupart des ressources naturelles ([1974b] p. 136).

Le parti pris de l'optimisme semble confirmé par les travaux que Nordhaus [1973a ; 1974] consacre au même moment aux conditions de soutenabilité des rythmes de croissance d'une économie dépendant des ressources énergétiques. Pour lui, nul doute que la finitude des réserves n'est pas un sujet en soi : ses calculs le conduisent à dire que, dans le cadre d'un mix énergétique fondé sur les seules techniques connues d'extraction et de production de pétrole et d'énergie nucléaire, l'épuisement des réserves de pétrole et d'uranium ne se produira pas avant 8400 ans ([1974] p. 24). Les coûts d'extraction, en revanche, pourraient fortement augmenter, devenant le moteur de substitutions entre ressources énergétiques.

Nordhaus [1973a] étudie la question de la substituabilité entre ressources énergétiques et capital dans un modèle d'équilibre général intertemporel (supposant des demandes inélastiques et exogènes). Son analyse illustre particulièrement le fond de l'argumentaire des économistes du MIT, en ce qu'elle désagrège partiellement la fonction de production, rendant de fait explicites les mécanismes de substitution à l'œuvre de façon sous-jacente dans les modélisations de Solow et Stiglitz. Nordhaus simule les trajectoires de prix et de production de différentes ressources énergétiques qui permettraient de satisfaire la demande, tout en minimisant les coûts de production actualisés, dans divers sous-secteurs emblématiques des usages de ressources énergétiques (industries, transport, secteur résidentiel, etc.). Le caractère soutenu (non borné) de la productivité des ressources énergétiques repose alors sur l'utilisation rationnelle par les producteurs d'une succession de ressources épuisables, classées par ordre croissant de coûts d'exploitation. Les ressources les moins coûteuses, au rendement énergétique faible mais générant de fortes rentes, sont tout d'abord exploitées. Leur épuisement progressif renchérit leur prix, mais aussi les coûts d'extraction. Des ressources auparavant trop coûteuses et/ou nécessitant des investissements importants (voire des années d'investissement en recherche-développement), mais au rendement énergétique important – affaiblissant du même mouvement la rente de l'exploitant – prennent le relais. Au fur

et à mesure de leur épuisement, ces ressources se trouvent remplacées les unes par les autres, le long d'un *continuum* de techniques de production.

Chez Nordhaus [1973a], ces trajectoires ne sont perçues cependant que comme des trajectoires transitoires vers l'avènement futur de la production d'une énergie ultime, fortement demandeuse en investissements préalables, mais au rendement énergétique quasiment infini et, de fait, libérée de la contrainte de rareté : une énergie produite par une *backstop technology*. Supposer l'existence de cette *backstop technology* est « crucial » (p. 532), au sens de Solow [1956] : sans cette hypothèse, le problème d'optimisation n'a pas de solution viable, il faudrait se résoudre à théoriser « l'extinction » (Nordhaus [1973a] p. 549).

Nordhaus choisit alors un horizon de planification de 150 ans, date à laquelle est fixée arbitrairement la mise en place de la *backstop technology* (p. 549), et conclut que, pour des valeurs raisonnables du rythme de croissance du progrès technique dans l'ensemble de l'économie, l'augmentation des prix de l'énergie consécutive à la graduelle disparition des énergies fossiles ne freinera pas la consommation ([1974] p. 25).

Rétrospectivement, la contribution de Nordhaus a eu un rôle important dans la consolidation de la réponse des économistes au rapport Meadows [1972], appelée de ses vœux par Solow – une économie incitant à la substitution des facteurs de production et rendant compte de la réactivité et de l'inventivité humaines. Le réalisme de l'hypothèse de *backstop technology* continue néanmoins aujourd'hui d'animer les débats, à juste titre (e.g. van der Meijden [2014]).

Marché et ajustements de prix

L'étude de la dynamique des prix des ressources épuisables est un élément essentiel de l'argumentation conduite par Solow et ses jeunes collègues, susceptible à la fois de contester les conclusions du rapport Meadows [1972] d'une croissance bridée par les ressources et de montrer la pertinence de l'analyse économique pour comprendre les mécanismes d'adaptation à la rareté. Si le prix d'une ressource augmente, les producteurs chercheront à lui substituer d'autres

ressources, ou à économiser cette ressource grâce à l'introduction d'un capital *resource saving*, fruit du progrès technique.

La dynamique supposée des prix – leur augmentation à mesure qu'une ressource s'épuise – implique que l'on ne considère pas uniquement les ressources comme facteurs de production mais aussi comme produits d'un secteur particulier de l'économie, celui des industries extractives. Les propriétaires de mines sont possesseurs d'un actif qu'ils peuvent conserver, en attente de prix futurs plus élevés, ou porter au marché – selon les mots de Solow ([1973] p. 47), « conserver un gisement minier est autant un investissement que construire une usine » (« *conserving a mineral deposit is just as much as an investment as building a factory* »). Il n'est rationnel de conserver l'actif en terre que si la valeur actualisée du stock de ressources est supérieure ou égale à la valeur actualisée des revenus attendus de la vente immédiate. Le point d'équilibre du producteur se situe à l'égalisation des deux rémunérations potentielles, quand l'intérêt issu du placement est identique à l'accroissement du prix de la ressource. Solow invoque ici, dès 1972 mais plus encore dans ses contributions suivantes, ce qu'il finira par nommer « principe » ou « règle de Hotelling » (Solow [1974b]), en référence à l'article fondateur de Harold Hotelling [1931] sur l'économie des ressources épuisables⁹. Remarquons toutefois que c'est initialement Irving Fisher, et non Hotelling, qui a servi d'inspiration à Solow. C'est en tout cas ce que lui relate dans ses souvenirs de la période : « *As you notice, my first comments on the issue were directed in the PNAS against that sort of model. I think that I did not know of Hotelling's work at that time. If I had known of it I would certainly have mentioned it. You also notice that I mention explicitly the standard Hotelling result about the price of remaining deposits rising at a rate given by the interest rate. I think I know where that came from. In thinking about price behavior I would have turned immediately to the theory of capital and one of its central results the (Irving) Fisher equation, which I had thought about for years. The Fisher*

⁹ Sur la contribution de Hotelling, cf. Franco, Gaspard et Mueller [2019] ; Gaspard et Missemmer [2022] ; Missemmer, Gaspard et Ferreira da Cunha [2022].

equation states that in a full-information competitive capital market equilibrium the rates of return on all assets actually held would have to be equal and equal to the rate of interest. The rate of return is the sum of the current rental (earnings) rate and the rate of capital gain or loss associated with holding the asset (i.e. the rate of change of its price). For a deposit held in the ground the rental rate is zero. I think it is this reasoning, which would have been automatic for me, [that] led to the statement in the PNAS. » (Solow, lettre du 22 juin 2020 aux auteurs).

Cette règle de Fisher-Hotelling est mobilisée à deux niveaux dans la littérature étudiée ici. C'est celle que Solow utilise pour affirmer, en 1972-1973, que si une hausse des prix des ressources naturelles (prises comme un tout, l'agrégat R du modèle de 1974) était réellement anticipée, les prix auraient déjà enclenché une dynamique de croissance au niveau du taux d'intérêt. C'est cette règle également qui se trouve appliquée, implicitement chez Solow et Stiglitz, explicitement chez Nordhaus [1973a], pour représenter la dynamique des prix de chaque ressource prise individuellement. Nordhaus pose, lui aussi, formellement la condition d'équilibre du propriétaire de ressources, tout d'abord sans coût d'extraction, le prix de la ressource augmentant au rythme du taux d'intérêt, puis avec coûts croissants – ce sont alors les rentes perçues qui doivent augmenter au rythme donné par le taux d'intérêt (pp. 531-532). Les prix optimaux ainsi déduits sont ensuite au fondement de la combinaison productive retenue par les producteurs de l'économie, définissant un mix énergétique macroéconomique. Nordhaus ne cite ni Hotelling ni Fisher. Il traite cependant clairement, à la manière de Solow, les ressources naturelles comme un actif, comme une forme de capital naturel ou énergétique – activé le moment venu par les besoins d'une économie en croissance.

Pour Solow, le fait que ces fonctions de production agrégées à facteurs substituables, éventuellement augmentées de progrès technique, puissent décrire de façon simple les mécanismes d'ajustements sous-jacents aux raretés relatives des facteurs, *via* des mécanismes de prix, est un résultat robuste patiemment établi par les économistes du MIT depuis le milieu des années 1950, par lui-même (*e.g.* Solow et Samuelson

[1953]; Solow [1956] ; [1962]) et par ses docteurs (Shell et Stiglitz [1967]), pour les économies de marché mais aussi, au moins partiellement, pour les régimes socialistes (*e.g.* Weitzman [1967] ; [1970] ; [1971]). Pourquoi en serait-il autrement avec l'intégration des ressources naturelles ? À l'époque se déploie par ailleurs tout un corpus permettant de connecter ces représentations agrégées avec des modèles décentralisés d'économies concurrentielles, voire des modèles d'équilibre général intertemporel (Arrow et Debreu [1954] ; Negishi [1960] ; Shell et Stiglitz [1967]). Si Solow ne s'engage pas lui-même dans ce type de contribution analytique, l'intégration des ressources naturelles dans ce corpus fait partie du programme qui est assigné à la jeune génération.

Nordhaus [1973a], on l'a vu, propose un modèle d'équilibre général à fonctions de demandes données. Weinstein et Zeckhauser [1975] travaillent au même moment, à vrai dire dès 1973, sur les conditions dans lesquelles des marchés libres peuvent allouer efficacement des ressources épuisables, en optant pour un critère de maximisation d'un surplus actualisé (surplus des consommateurs, plus profits des producteurs de ressources). Après avoir concentré son attention sur les conditions d'existence de sentiers pérennes de croissance de la consommation par tête, Stiglitz [1974b] complète son analyse pour savoir à quelles conditions ces modélisations peuvent figurer des économies concurrentielles. Il propose de décentraliser l'équilibre intertemporel du modèle de croissance optimale, ce qui le conduit à utiliser une condition d'équilibre simultané sur les marchés des ressources et du capital et une règle de Fisher-Hotelling. Stiglitz [1974b], comme Weinstein et Zeckhauser [1974, 1975], contribuent alors à déplacer le débat de la question de l'épuisement des ressources naturelles vers celui des conditions d'existence et de stabilité des sentiers d'équilibre intertemporel de croissance avec ressources épuisables, un programme qui rejoint alors celui de Dasgupta et Heal [1974].

Tous notent cependant que les économies de marché réelles dérogent aux hypothèses de leurs modèles de départ. D'abord, il n'existe pas de système complet de marchés futurs pour les ressources naturelles (Nordhaus [1973a], Stiglitz [1974b]), ce qui crée des risques d'instabilité

(notamment des risques de bulles spéculatives) liés aux anticipations, un problème similaire, quoique peut-être plus problématique, à ceux que l'on rencontre dans les modélisations intertemporelles à plusieurs biens capitaux. Ensuite, des externalités et des structures non concurrentielles peuvent faire dévier les trajectoires réelles des trajectoires efficientes (Weinstein et Zeckhauser [1974]). Le problème fondamental n'est ainsi plus l'épuisement des ressources, mais les dysfonctionnements des marchés concrets et les risques liés à l'absence de systèmes complets de marché pour l'atteinte de sentiers optimaux. Ce faisant, l'introduction de ressources épuisables dans les modèles de croissance se mêle au déploiement d'un autre agenda de recherche, celui des défaillances de marché. Quant à la question de la finitude des ressources et de l'arrêt éventuel de la croissance, elle n'est plus vraiment à l'ordre du jour. À l'économie se trouve assigné un rôle nouveau : fournir des analyses aidant à identifier les politiques publiques ou les transformations institutionnelles les plus à même de rationaliser l'usage des ressources, d'organiser la transparence de l'information, de faciliter les transitions technologiques et de compléter les systèmes de marché.

Quels partis pris sous-jacents ?

La désirabilité de la croissance

La mobilisation grand public de Solow [1972 ; 1973] visait avant tout à montrer combien il était dommageable qu'aucun économiste n'ait participé à l'étude commandée par le Club de Rome. Face aux simulations et aux projections du rapport, il s'agissait notamment de mettre en avant trois qualités humaines susceptibles de laisser penser que les sinistres prédictions ne se réaliseraient pas : la raison, les capacités d'adaptation et l'ingéniosité – trois qualités précisément au fondement de l'analyse économique, à travers ses concepts de rationalité, de flexibilité des prix et de productivité globale des facteurs. Dans les démonstrations de Solow, de Nordhaus ou de Stiglitz, comme chez Weinstein et Zeckhauser, l'économie n'est plus cette science lugubre qu'elle était chez Malthus. Elle est, au contraire, devenue un socle sur lequel

fonder les remèdes à la pensée de l'apocalypse.

Entre le discours tenu par les économistes auprès du grand public et les travaux académiques en tant que tels, il y a cependant souvent un écart rhétorique trahissant parfois des approximations, tout au moins passant sous silence certaines conditions de réalisation des énoncés théoriques (McCloskey [1998]). Les modèles de Solow [1974a] et de Stiglitz [1974a ; 1974b] n'échappent pas à la règle. Nous pouvons, en effet, observer un hiatus entre les premières critiques formulées par Solow en 1972 et 1973 à l'encontre du rapport Meadows et leurs traductions formelles, analytiques, dans les modélisations du milieu des années 1970. Là, le phénomène complexe d'ingéniosité et d'adaptation ou, plus directement, le processus de remplacement et d'élargissement progressif d'accès aux ressources *via* les innovations techniques et les investissements, évoqué initialement par Solow, est ramené à la seule accumulation du capital, source des gains de productivité sur les ressources permettant de prolonger l'horizon d'épuisement de l'agrégat R . Quant à la composition de R , elle se transforme au fur et à mesure des substitutions opérées là encore par l'accumulation du capital. Ainsi, la croissance se trouve aux deux extrémités du raisonnement de Solow : finalité du modèle (*i.e.* une croissance durable est possible), elle sous-tend aussi la définition même de l'agrégat R . Ce n'est qu'à l'aune de cette analyse que l'on voit émerger le réel statut de la croissance dans la macroéconomie environnementale naissante des années 1970. En arrière-plan des travaux menés s'exprime une conviction de la désirabilité de la croissance, *i.e.* de l'accumulation du capital, ne serait-ce que comme condition de possibilité de la pérennité de l'usage des ressources naturelles. La modélisation de Nordhaus explicite, en sus, le techno-solutionnisme sous-jacent à l'intégration des ressources épuisables dans le corpus macroéconomique néoclassique : sans technologie de secours, l'économiste serait contraint de réfléchir à l'extinction de l'humanité.

Solow se garde de défendre une vision trop matérialiste de la croissance, comme ensemble de choses produites ou accumulées pour elles-mêmes : il n'hésite pas à rappeler que ce qui doit être visé pour tous est un « niveau de vie raisonnable [...], ni plus, ni moins » car, après tout,

« certains d'entre nous mangent trop de toutes façons » ([1974c] p. 7). Il n'en demeure pas moins qu'il s'agit bien chez Solow de montrer que la notion de croissance, telle que forgée par les économistes, reste la notion pertinente pour penser le développement humain et, plus encore, le lien entre les générations.

Le processus même de croissance, nous dit-il, suppose qu'une partie des revenus n'est pas consommée par les générations présentes mais, qu'au contraire, *via* l'investissement elle est dédiée à la consommation et/ou au bien-être des générations futures. Par un jeu rhétorique, Solow [1973] affirme alors que les partisans de la croissance sont par définition conservationnistes, car soucieux de conserver des revenus et des ressources pour les générations futures. Réciproquement, le vrai conservationniste, lorsqu'il recommande de limiter l'exploitation présente des ressources épuisables, n'est pas fondamentalement contre la croissance, car il « troque une satisfaction présente contre une satisfaction future, promouvant ainsi la croissance économique » ([1973] p. 42) en se souciant du niveau des richesses futures. Pour Solow, les sociétés ont, de fait, une préférence pour la non-extinction et les générations présentes doivent donc garantir aux générations futures les ressources nécessaires à leur bien-être. Ces ressources, cependant, ne sont pas proprement dites des ressources naturelles – à l'exception peut-être de certains espaces remarquables – mais des capacités productives (Solow [1974c] p. 11). Ce que nous devons aux générations futures, c'est une combinaison de capitaux (naturel, physique et humain) à même d'assurer la pérennité et/ou le maintien d'un certain niveau de consommation par habitant. L'accumulation du capital physique joue ici un double rôle : elle participe à la constitution de ces capacités productives futures, et elle peut également permettre d'économiser des ressources naturelles *via* le progrès technique.

Rétrospectivement, la confiance affichée par Solow dans la croissance interroge cependant. D'abord, il apparaît que les modèles bâtis à l'époque ne faisaient pas grand cas des temporalités. L'horizon d'épuisement de R , dans les modèles de Solow ou Stiglitz, se trouve repoussé très loin dans le temps, quand toutes les ressources naturelles imaginables seront épuisées.

D'où l'idée d'une croissance robuste sur longue période. Mais dans le même temps, les paramètres d'élasticités, mobilisés pour juger du caractère raisonnable des conditions de soutenabilité de la consommation par tête, sont choisis à l'aune d'évaluations empiriques de courte période, ancrées au début des années 1970 – les estimations de Barnett et Morse [1963], celles de Nordhaus et Tobin [1972]. Peut-on réellement déduire le comportement du système économique à très long terme à partir de paramètres possiblement conjoncturels ? Par ailleurs, il semble que l'argumentation de Solow, comme celles de Stiglitz et de Nordhaus, reposent sur l'idée que les innovations techniques pouvaient se poursuivre au même rythme que celui en vigueur au cœur du vingtième siècle. Avec le ralentissement structurel des gains de productivité depuis plusieurs décennies, et les craintes renouvelées sur la stagnation séculaire (Gordon [2012] ; Eggertsson *et al.* [2016]), ce pari semble aujourd'hui avoir été hardi.

Une lecture capitaliste et allocative des enjeux environnementaux

En réduisant la question des conséquences de l'épuisement des ressources naturelles pour la dynamique économique à des enjeux d'accumulation du capital, Solow offre un schéma conceptuel où la préservation des ressources est ontologiquement assimilée à un investissement. Le rôle de l'économiste est alors d'identifier clairement le bien-fondé de cet investissement, et d'objectiver les arbitrages à réaliser : quelle part du revenu courant – y compris le revenu potentiellement extrait de la vente massive des stocks de ressources – faut-il dédier à cet investissement ? Dans la tradition du mouvement initié par Lewis C. Gray [1913], [1914] et Hotelling [1931] dans les premières décennies du vingtième siècle, la question de l'épuisement des ressources naturelles se trouve ainsi pleinement traduite en question d'allocation intertemporelle, entre générations, de capacités productives (Missemer [2017]).

C'est, dans cette optique, presque naturellement, que la question de l'épuisement des ressources naturelles intègre, dès 1973 (Koopmans [1973], [1974]), les représentations de la croissance en termes de croissance optimale. De

même qu'il y a un partage optimal du revenu entre consommation et investissement, il est possible de chercher à définir un rythme optimal d'épuisement des ressources naturelles. Le cadre de référence devient celui de la maximisation d'une fonction d'utilité intertemporelle sous contrainte d'accumulation. Se trouvent traités simultanément deux problèmes initialement séparés chez Solow : montrer à quelles conditions la productivité des ressources peut être non bornée (grâce aux substitutions des facteurs) et identifier un critère d'optimisation ou d'équité intertemporelle, définissant un rythme d'investissement. C'est dans ce cadre que réfléchit Stiglitz [1974a], [1974b], lorsqu'il étudie les conditions de soutenabilité de la croissance, en étroite connexion avec Dasgupta et Heal [1974]. Stiglitz inaugure alors une pratique qui devient générale dans le courant des années 1970 : utiliser le modèle de croissance optimale, non seulement pour représenter un problème de planification optimale de l'usage des ressources, mais aussi pour représenter les trajectoires optimales de consommation et d'exploitation des ressources d'une économie concurrentielle décentralisée.

Solow [1974c] se montre réticent face à cette pratique. Au cœur de la question du paramétrage de la fonction de bien-être retenue apparaît le choix du taux d'escompte, ou taux d'intérêt, conditionnant la pondération des niveaux de vie futurs dans les décisions d'investissement. Solow s'avère d'abord sceptique sur le choix d'un critère utilitariste strict, égalitariste, où le taux d'escompte serait nul, ne serait-ce que parce que les générations futures bénéficieront, selon toute probabilité, d'un revenu et d'un niveau de vie supérieurs à ceux des générations présentes. Il y a certes un risque de ralentissement de la croissance mais il convient tout autant de répartir les revenus que ces risques de ralentissement. Il avertit également qu'opter pour un critère de Fisher-Hotelling en fixant le taux d'escompte au niveau du taux d'intérêt est sans doute également inapproprié ([1974c] p. 8) ; cela suppose que le marché fasse une place aux générations futures, ce qu'il n'est pas forcément en mesure de faire, ne serait-ce qu'en raison de son incomplétude. Il est par ailleurs possible que chaque individu puisse lui-même concevoir la possibilité d'escompter à des taux différents ce qui relève de ses propres profits, revenus ou utilités futurs

et ce qui relève de l'utilité sociale future de certains projets liés au bien commun (ou collectif). Cette situation suggère que le taux d'actualisation social (*i.e.* désirable socialement) puisse être inférieur au taux d'actualisation proposé par le marché¹⁰. Solow se montre ici favorable à une position de fort altruisme intergénérationnel (taux d'escompte de référence proche de 0) tout en demandant une discussion plus complète des tenants et aboutissants de ce choix, au risque que la conclusion soit une très forte sensibilité des résultats du modèle aux préférences d'escompte de la société. Il en appelle alors à nouveau à son idée de préférence de fait pour la non-extinction, pour contrecarrer toute velléité de tracer des trajectoires apocalyptiques.

En dépit de ces réserves vis-à-vis des représentations en termes de croissance optimale, Solow a toujours encouragé cette appréhension allocative des biens environnementaux, quitte à exclure du champ de l'analyse toute question qui viendrait perturber le raisonnement. Dès ses premières réactions aux *doomsday models*, il décide [1971] de séparer sa critique principale, qui donnera naissance à la macroéconomie des ressources, du traitement des questions démographiques et de pollution. Les premières sont jugées en dehors du périmètre d'analyse de l'économie – on retrouve là le caractère exogène de la croissance de la population déjà mis en évidence par Solow [1956]. Les secondes sont rapportées à un problème de tragédie des communs, dans la tradition de Garret Hardin ([1968], *cf.* Locher [2013]) ou encore de John H. Dales ([1968], *cf.* Berta [2021]) : de meilleures délimitations des droits de propriété devraient résoudre la plupart des difficultés. Apparaissent ainsi mis en marge du cœur de la macroéconomie environnementale naissante des enjeux pourtant de premier plan et soulignés par le rapport Meadows.

Au sujet de la question des ressources, Solow ([1974a] p. 34) et Nordhaus excluent par principe les situations qui ne sont pas « intéressantes », dans lesquelles la production est possible sans ressources naturelles, ou dans lesquelles les gains de productivité sur les ressources sont « bornés » (la production de longue

¹⁰ Hotelling lui-même avait eu cette intuition (*cf.* Franco, Gaspard et Mueller [2019], Gaspard et Missemmer [2022]).

période se trouvant elle aussi bornée). Toute son attention est donc portée sur les situations où ces deux configurations ne se produisent pas. Or, nous pouvons nous interroger sur le sens donné à l'exclusion de la deuxième situation. Certes, en raisonnant en termes de *continuum* de ressources et de techniques de production, Solow propose un schéma où des gains de productivité semblent toujours possibles. Mais *quid* d'une situation où les ressources, notamment énergétiques, buteraient dans leur ensemble sur des limites de productivité ? La littérature sur l'Energy Return on Investment (EROI) s'est penchée sur ce sujet dès le tournant des années 1980 (e.g. Cleveland *et al.* [1984]). Même si certaines de ses conclusions peuvent être discutées, il apparaît assez nettement que l'exploitation d'énergie utile a accompagné le processus de croissance sur longue période, et que la capacité du capital physique à extraire toujours plus de ressources fossiles, quelles qu'elles soient, n'est pas garantie (Court [2016]). On est donc en droit de s'interroger sur la légitimité de l'exclusion opérée par Solow, d'autant plus aujourd'hui dans un contexte de pressions environnementales plus vastes.

D'autres exemples d'exclusion analytique pourraient être pris. Comme le raconte Couix [2019], Solow [1997] et Stiglitz [1997] ont continué à défendre leurs modélisations macroéconomiques plusieurs décennies après les controverses des années 1970, notamment face aux critiques issues de l'économie écologique (Daly [1997]). À la question de la prise en compte de la loi de l'entropie, et plus largement des principes de la thermodynamique stipulant la finitude des ressources énergétiques, Solow ([1997] p. 268) répondait que cela n'était « d'aucune importance pratique et immédiate pour la modélisation », cantonnée à l'exploration « d'un bref instant dans un petit endroit de l'univers ». Stiglitz, lui, profitait de l'occasion pour préciser son horizon temporel : 50-60 ans au maximum. Certes son modèle pouvait donner l'illusion d'être « étendu à l'infini », mais « personne ne prend cet horizon au sérieux » ([1997] p. 269). La remarque peut sembler compréhensible quand on se souvient que Solow et Stiglitz cherchaient avant tout, au début des années 1970, à répondre au rapport Meadows, dont l'horizon d'effondrement était justement de 50-60 ans. Mais pourquoi alors parler de croissance de très longue période, de

possibilités *quasi* infinies de progrès technique et de substitution des facteurs ? Cela conduit à brouiller les pistes, et à donner l'illusion d'une macroéconomie environnementale aux énoncés génériques absolus, alors que son horizon de validité était originellement limité à 50 ans.

Ainsi, et bien que l'on concède aisément à Solow que les hypothèses comportementales au fondement du rapport Meadows [1972] ne laissaient que peu de chance à l'humanité de réagir aux raretés ou aux limites planétaires, il semble qu'au tournant des années 1970, le risque d'une contrainte forte sur les ressources n'a jamais été pleinement envisagée. En proposant des modèles de croissance avec ressources, dans l'urgence de la confrontation avec les méthodes et conclusions du rapport, Solow raisonnait fondamentalement par analogie : les ressources naturelles sont, comme le travail, un facteur non accumuleable dont la productivité est soutenue par l'accumulation du capital ; elles sont également, comme le capital lui-même, un actif spécifique support d'un investissement. Ces analogies ont permis que les ressources naturelles entrent dans l'agenda de la science normale – celui de la croissance optimale et celui de l'analyse des défaillances de marché – sans que cet agenda ne soit profondément dévié. Ce qui échappe à ces analogies est à l'époque simplement exclu de l'analyse (e.g. la pertinence d'espaces naturels préservés, la possibilité d'un ralentissement du progrès technique tel que l'extinction devienne possible, la matérialité de la croissance elle-même).

Considérer la question de l'épuisement des ressources comme un enjeu d'investissement et d'allocation intergénérationnelle de capital (productif) a cependant profondément structuré le champ de l'économie de l'environnement à partir des années 1970, et jusqu'à aujourd'hui, bien au-delà de la question des ressources. De la formulation, par Hartwick [1977], alors étudiant de Solow, d'une règle de soutenabilité définissant des seuils autorisés de prélèvement sur les ressources en fonction de la vitesse de progrès technique aux modèles intégrés de Nordhaus ([1992], cf. Masini [2021]) définissant les politiques de lutte contre le réchauffement climatique comme des investissements, c'est toute la macroéconomie environnementale néoclassique qui s'est structurée à partir de l'approche promue

par Solow. En témoigne également la notion de budget carbone qui réduit la complexité du changement climatique, comme externalité globale, à un problème d'allocation de ressources (Lahn [2020], Gaspard et Missemmer [2022]) : il ne resterait que x tonnes de gaz à effet de serre à émettre pour respecter un objectif de $+1,5^{\circ}\text{C}$ ou $+2^{\circ}\text{C}$ de réchauffement, x tonnes à allouer de façon optimale sur un horizon temporel donné. Face à la diversité des enjeux environnementaux mis en évidence par la notion de limites planétaires (Rockström *et al.* [2009]), incluant l'épuisement des ressources et le changement climatique mais aussi le cycle de l'eau, l'érosion des sols ou les pertes de biodiversité, est-il toujours judicieux de cantonner le raisonnement économique à des décisions d'investissement, d'allocations et de capacités productives ?

Cinquante ans après la publication du rapport Meadows [1972] sur les limites à la croissance et après l'émergence progressive d'une macroéconomie environnementale d'inspiration néoclassique sous l'impulsion de Robert M. Solow et de ses anciens étudiants, force est de constater que les contraintes écologiques sur les systèmes économiques ne se sont pas distendues. Le changement climatique et l'érosion de la biodiversité promettent d'ailleurs des difficultés que la discipline économique peine encore à prendre en considération, malgré la reconnaissance des travaux de William D. Nordhaus *via* l'octroi du prix de la Banque de Suède en mémoire d'Alfred Nobel en 2018, et malgré la prise en compte croissante des enjeux de biodiversité par des économistes de premier plan (Dasgupta [2021]). Face aux accusations réciproques entre partisans de la dynamique des systèmes d'un côté, et partisans des ajustements de marché et du progrès technique de l'autre, revenir sur le moment charnière des années 1970 s'avère riche en enseignements.

Tout d'abord, comme la citation mise en épigraphe l'indique, il n'est pas inutile de rappeler les ambitions de Solow à l'époque : recenser les ressources de l'économie pour répondre aux *doomsday models* plus que bâtir une véritable économie des ressources naturelles. Ce n'est finalement que tardivement que Solow a décou-

vert l'article de Hotelling [1931], en marge de la formulation de ce qui deviendra en quelque sorte le credo des macroéconomistes : hypothèse de non-décroissance de la productivité des ressources, mise en exergue des opportunités de substitution entre facteurs, recommandations pour la gestion optimale des ressources considérées comme des actifs allouables dans le temps.

Les principales discussions techniques menées par Solow, Stiglitz ou encore Nordhaus visaient à mettre en musique ce credo, en analysant les conditions de la substituabilité des facteurs, en insistant sur le rôle du progrès technique et de la *backstop technology* dans la croissance à long terme, et en montrant comment une économie concurrentielle pouvait, par le jeu du marché, envoyer les signaux adéquats pour la prise en compte des problèmes de rareté. Ce sont ces discussions qui ont fait l'objet du plus grand nombre de commentaires, en particulier de la part des économistes écologiques sensibles aux raccourcis opérés par la modélisation néoclassique. Il ressort toutefois de notre examen que certaines critiques ont parfois été excessives. Jamais Solow n'a considéré, par exemple, qu'il était possible de remplacer les ressources naturelles par du capital physique sans précaution aucune. L'accumulation du capital physique n'était pour lui qu'un levier permettant de déplacer la combinaison productive le long d'un *continuum* de ressources et de techniques, sans que les ressources naturelles dans leur ensemble disparaissent.

Cela signifie-t-il pour autant qu'il faudrait réhabiliter sans crier gare les exercices de modélisation des années 1970, et ceux qui ont suivi dans la tradition néoclassique ? Ce serait excessif là aussi car, en réalité, derrière les discussions techniques, Solow et ses étudiants ont adopté des partis pris larvés pouvant prêter à débat. Dans les travaux de l'époque, à chaque instant la croissance semble désirable, non pas pour des raisons idéologiques ou politiques – même si ce n'est pas à exclure (Schmelzer [2016]) – mais parce qu'elle est à la fois le résultat de l'analyse – la croissance à long terme est possible – et la condition de réalisation de ce résultat – car l'accumulation du capital doit permettre la substitution des ressources. Sans croissance, pas de solidarité intergénérationnelle semble dire Solow, et pas d'horizon de long terme compatible

avec la préférence de non-extinction. Pour résoudre les problèmes environnementaux, il faudrait donc plus de croissance – une perspective radicalement renversée par rapport à celle de Forrester et Meadows. Après cinquante ans de croissance mondiale supplémentaire soutenue, le résultat a-t-il été à la hauteur des attentes ? Ce n'est pas certain. L'équation entre croissance et préservation de l'environnement n'est donc pas si simple.

De la même façon, la traduction chère aux économistes de tous les enjeux environnementaux en choix d'investissement et en allocations d'actifs peut aussi interroger, à une époque où, désormais, les limites planétaires prennent des traits nombreux, complexes, évolutifs (Levrel et Missemmer [2023]). On comprend aisément que Solow ait choisi cette voie au début des années 1970, trouvant dans la littérature économique des outils propices à une telle lecture des sujets environnementaux. Mais si l'ambition pour la discipline n'est pas seulement d'identifier dans un corpus existant les ressources les plus adéquates, mais d'inventer un champ nouveau, une véritable macroéconomie de l'environnement adaptée à toutes les contingences matérielles et énergétiques de l'activité économique, alors est-il sans doute nécessaire d'élargir le regard et d'opter pour des modélisations parfois concurrentes, en tout cas de prendre au sérieux la question des limites, avant qu'elles ne soient irrémédiablement dépassées.

Remerciements

Les auteurs remercient les participants au workshop sur l'histoire de la macroéconomie tenu au laboratoire d'économie d'Orléans le 5 juillet 2022, ainsi que la *Revue française d'économie*.

Références

D. Acemoglu [2021] : *What Climate Change Requires of Economics*, **Project Syndicate**,

URL: <https://www.project-syndicate.org/magazine/what-climate-change-requires-of-economics-by-daronacemoglu-2021-09>.

P. Anker [2020] : **The Power of the Periphery: How Norway Became an Environmental Pioneer for the World**, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

K. J. Arrow et G. Debreu [1954] : *Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy*, **Econometrica** 22, pp. 265-290, doi:10.2307/1907353.

H. J. Barnett et C. Morse [1963] : **Scarcity and Growth. The Economics of Natural Resource Availability**, John Hopkins Press, Baltimore.

N. Berta [2021] : *A Note on John Dales and the Early History of Emissions Trading: Mixing Standards and Markets for Rights*, **Cahiers d'économie politique** 79, pp. 61-84.

D. Cass [1965] : *Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation*, **Review of Economic Studies** 32, pp. 233-240, doi:10.2307/2295827.

H. Chauvin et D. L. Meadows [2022] : *Le déclin de notre civilisation est inévitable*, **Reporterre**, URL : <https://reporterre.net/Dennis-Meadows-II-y-a-deux-manieres-d-etre-heureux-avoir-plus-ou-vouloir-moins>.

B. Cherrier [2014] : *Toward a History of Economics at MIT, 1940-1972*, **History of Political Economy** 46, pp. 15-44, doi:10.1215/00182702-2716100.

C. J. Cleveland, R. Costanza, C. A. S. Hall et R. Kaufmann [1984] : *Energy and the U.S. Economy: A Biophysical Perspective*, **Science** 225, pp. 890-897.

Q. Couix [2019] : *Natural Resources in the Theory of Production: The Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Controversy*, **European Journal of the History of Economic Thought** 26, pp. 1341-1378.

Q. Couix [2020] : *Ressources naturelles, thermodynamique et théorie économique de la production. Une perspective historique et méthodologique*, PhD Thesis, University of Paris 1.

V. Court [2016] : *Énergie, EROI et croissance*

économique dans une perspective de long terme, PhD Thesis, Université Paris Nanterre.

J. H. Dales [1968] : **Pollution, Property and Prices. An Essay in Policy-Making and Economics**, Univ. Toronto Press, Toronto.

H. E. Daly [1997] : *Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz*, **Ecological Economics** 22, pp. 261-266.

P. S. Dasgupta [2021] : **The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review**, HM Treasury, London.

P. S. Dasgupta et G. Heal [1974] : *The Optimal Depletion of Exhaustible Resources*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 3-28.

P. S. Dasgupta et G. Heal [1979] : **Economic Theory and Exhaustible Resources**, James Nisbet Co. and Cambridge University Press, London.

E. F. Denison [1967] : *Sources of Postwar Growth in Nine Western Countries*, **American Economic Review** 57, pp.325-332.

R. Dorfman, P. A. Samuelson et R. M. Solow [1958] : **Linear Programming and Economic Analysis**, McGraw-Hill, New York.

G. B. Eggertsson, N. R. Mehrotra et L. H. Summers [2016] : *Secular Stagnation in the Open Economy*, **American Economic Review** 106, pp. 503-507, doi:10.1257/aer.p20161106.

G. Erreygers [2009] : *Hotelling, Rawls, Solow: How Exhaustible Resources Came to Be Integrated into the Neoclassical Growth Model*, **History of Political Economy** 41, pp. 263-281, doi:10.1215/00182702-2009-027.

J. W. Forrester [1971] : **World Dynamics**, Wright-Allen Press, Cambridge, MA.

M. P. V. Franco, M. Gaspard et T. M. Mueller [2019] : *Time Discounting in Harold Hotelling's Approach to Natural Resource Economics: The Unsolved Ethical Question*, **Ecological Economics** 163, pp. 52-60, doi:10.1016/j.ecolecon.2019.05.005.

J.-B. Fressoz [2022] : *La « transition énergétique », de l'utopie atomique au déni climatique : États-Unis, 1945-1980*, **Revue d'histoire moderne et contemporaine** 69, pp. 114-146,

doi:10.3917/rhmc.692.0115.

M. Gaspard et A. Missemmer [2019] : *An Inquiry into the Ramsey-Hotelling Connection*, **European Journal of the History of Economic Thought** 26, pp. 352-379, doi:10.1080/09672567.2019.1576059.

M. Gaspard et A. Missemmer [2022] : *Optimalité, équité et prix du carbone : à propos de Harold Hotelling et de sa règle en économie du climat*, **Revue de l'OFCE** 176, pp. 203-228, doi:10.3917/reof.176.0203.

R. J. Gordon [2012] : *Is U.S. Economic Growth Over ? Faltering Innovation Confronts the Six Headwinds*, NBER working paper 18315, Cambridge, MA.

L. C. Gray [1913] : *The Economic Possibilities of Conservation*, **Quarterly Journal of Economics** 27, pp. 497-519, doi:10.2307/1883375.

L. C. Gray [1914] : *Rent under the Assumption of Exhaustibility*, **Quarterly Journal of Economics** 28, pp. 466-489, doi:10.2307/1884984.

G. Hardin [1968] : *The Tragedy of the Commons*, **Science** 162, pp. 1243-1248.

J. M. Hartwick [1977] : *Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources*, **American Economic Review** 67, pp. 972-974.

J. M. Hartwick [2009] : *What Would Solow Say ?*, **Journal of Natural Resources Policy Research** 1, pp. 91-96, doi :10.1080/19390450802504451.

G. Heal [2009] : *The Economics of Renewable Energy*, NBER working paper 15081, Cambridge, MA.

H. Hotelling [1931] : *The Economics of Exhaustible Resources*, **Journal of Political Economy** 39, pp. 137-175, doi:10.1086/254195.

T. J. Koopmans [1963] : *On the Concept of Optimal Economic Growth*, Cowles Foundation discussion paper n°163, New Haven.

T. J. Koopmans [1973] : *Some Observations on « Optimal » Economic Growth and Exhaustible Resources*, Cowles Foundation discussion paper n°356, New Haven.

T. J. Koopmans [1974] : *Proof for a Case where Discounting Advances the Doomsday*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 117-120, doi:10.2307/2296375.

B. Lahn [2020] : *A History of the Global Carbon Budget*, **WIREs Climate Change** 11, pp. 1-9, doi:10.1002/wcc.636.

H. Levrel et A. Missemer [2023] : **L'économie face à la nature : de la prédation à la coévolution**, Petits Matins & Institut Veblen, Paris.

F. Locher [2013] : *Les pâturages de la guerre froide : Garrett Hardin et la « tragédie des communs »*, **Revue d'histoire moderne et contemporaine** 60, pp. 7-36.

A. S. Manne [1974] : *Waiting for the Breeder*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 47-65, doi:10.2307/2296371.

F. Masini [2021] : *William Nordhaus : A Disputable Nobel [prize]? Externalities, Climate Change, and Governmental Action*, **European Journal of the History of Economic Thought** 28, pp. 985-1004, doi:10.1080/09672567.2021.1963798.

D. N. McCloskey [1998] : **The Rhetoric of Economics**, 2e éd., University of Wisconsin Press, Madison.

M. S. Mckrakis (éd.) [1974] : **Energy: Demand, Conservation and Institutional Problems**, Proceedings of a Conference Held at the Massachusetts Institute of Technology, MIT Press, Cambridge, MA.

D. L. Meadows [1969] : *The Dynamics of Commodity Production Cycles : A Dynamic Cobweb Theorem*, PhD Thesis. MIT, Cambridge, MA.

D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers et W. W. Behrens III [1972] : **The Limits to Growth, A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind**, Potomac Associates, London.

A. Missemer [2017] : **Les économistes et la fin des énergies fossiles (1865-1931)**, Classiques Garnier, Paris.

A. Missemer, M. Gaspard et R. P. Ferreira da Cunha [2022] : *From Depreciation to Exhaustible Resources: On Harold Hotelling's First*

Steps in Economics, History of Political Economy 54, pp. 109-135, doi:10.1215/00182702-9548337.

T. Negishi [1960] : *Welfare Economics and Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy*, **Metroeconomica** 12, pp. 92-97, doi:10.1111/j.1467-999X.1960.tb00275.x.

E. Neumayer [1999] : **Weak versus Strong Sustainability. Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms**, Edward Elgar Publishing, Cheltenham & Northampton.

W. D. Nordhaus [1973a] : *The Allocation of Energy Resources*, **Brookings Papers on Economic Activity** 1973, pp. 529-576.

W. D. Nordhaus [1973b] : *World Dynamics : Measurement without Data*, **Economic Journal** 83, pp. 1156-1183, doi:10.2307/2230846.

W. D. Nordhaus [1974] : *Resources as a Constraint on Growth*, **American Economic Review** 64, pp. 22-26.

W. D. Nordhaus [1992] : *The « Dice » Model : Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming*, Cowles Foundation discussion paper n°1009, New Haven.

W. D. Nordhaus et J. Tobin [1972] : *Is Growth Obsolete?*, in **Economic Research : Retrospect and Prospect**, vol. n°5, Economic Growth, éd. Nordhaus, W. D. et Tobin, J. NBER, New Haven, pp. 1-80.

A. J. Oswald et N. Stern [2019] : *Why Does the Economics of Climate Change Matter so much, and why Has the Engagement of Economists Been so Weak?* **Royal Economic Society Newsletter**.

D. W. Pearce [2002] : *An Intellectual History of Environmental Economics*, **Annual Review of Energy and the Environment** 27, pp. 57-81, doi:10.1146/annurev.energy.27.122001.083429.

D. W. Pearce et R. K. Turner [1990] : **Economics of Natural Resources and the Environment**, John Hopkins University Press, Baltimore.

D. Pestre [2020] : *Comment l'environnement a été géré depuis 50 ans. Anatomie d'un échec*, in

Faire l'économie de l'environnement, éd. E. Chiapello, A. Missemer et A. Pottier, Presses des Mines, Paris, pp. 17-36.

A. Pottier [2014] : *L'économie dans l'impasse climatique. Développement matériel, théorie immatérielle et utopie auto-stabilisatrice*, PhD Thesis. EHESS.

A. Pottier [2016] : **Comment les économistes réchauffent la planète**, éd. du Seuil, Paris.

F. P. Ramsey [1928] : *A Mathematical Theory of Saving*, **Economic Journal** 38, pp. 543-559, doi:10.2307/2224098.

J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. I. Chapin, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. J. Crutzen et J. Foley [2009] : *Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, **Ecology and Society** 14, p. 32.

P. A. Samuelson et R. M. Solow [1956] : *A Complete Capital Model involving Heterogeneous Capital Goods*, **Quarterly Journal of Economics** 70, pp. 537-562, doi:10.2307/1881864.

M. Schmelzer [2016] : **The Hegemony of Growth. The OECD and the Making of the Economic Growth Paradigm**, Cambridge University Press, Cambridge (UK).

K. Shell et J. E. Stiglitz [1967] : *The Allocation of Investment in a Dynamic Economy*, **Quarterly Journal of Economics** 81, pp. 592-609.

R. M. Solow [1956] : *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, **Quarterly Journal of Economics** 70, pp. 65-94, doi:10.2307/1884513.

R. M. Solow [1957] : *Technical Change and the Aggregate Production Function*, **Review of Economics and Statistics** 39, pp. 312-320, doi:10.2307/1926047.

R. M. Solow [1960] : *Investment and Technical Progress, in Mathematical Methods in the Social Sciences, 1959: Proceedings of the First*

Stanford Symposium, éd. K. J. Arrow, S. Karlin, et P. Suppes, Stanford University Press, Stanford, pp. 89-104.

R. M. Solow [1962] : *Substitution and Fixed Proportions in the Theory of Capital*, **Review of Economic Studies** 29, pp. 207-218, doi:10.2307/2295955.

R. M. Solow [1971] : *The Economist's Approach to Pollution and Its Control*, **Science** 173, pp. 498-503, doi:10.1126/science.173.3996.498.

R. M. Solow [1972] : *Notes on « Doomsday Models »*, **Proceedings of the National Academy of Sciences** 69, pp. 3832-3833, doi:10.1073/pnas.69.12.3832.

R. M. Solow [1973] : *Is the End of the World at Hand?*, **Challenge** 16, pp. 39-50.

R. M. Solow [1974a] : *Intergenerational Equity and Exhaustible Resources*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 29-45, doi:10.2307/2296370.

R. M. Solow [1974b] : *The Economics of Resources or the Resources of Economics*, **American Economic Review** 64, pp. 1-14.

R. M. Solow [1974c] : *What Do we Owe to the Future?*, **Nebraska Journal of Economics and Business** 13, pp. 3-16.

R. M. Solow [1997] : *Reply : Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz*, **Ecological Economics** 22, pp. 267-268, doi:10.1016/S0921-8009(97)00081-5.

R. M. Solow [2007] : *Interview by Brian Keegan*, MIT150 Oral History Project, URL: <https://infinite-mit-edu.inshs.bib.cnrs.fr/video/robert-m-solow>

R. M. Solow, R. M. et P. A. Samuelson [1953] : *Balanced Growth under Constant Returns to Scale*, **Econometrica** 21, pp. 412-424, doi:10.2307/1905447.

J. E. Stiglitz [1974a] : *Growth with Exhaustible Natural Resources : Efficient and Optimal Growth Paths*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 123-137.

J. E. Stiglitz [1974b] : *Growth with Exhaustible Natural Resources : The Competitive Economy*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 139-152.

J. E. Stiglitz [1997] : *Reply : Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz*, **Ecological Economics** 22, pp. 269-270.

G. M. Turner [2008] : *A Comparison of the Limits to Growth with 30 Years of Reality*, **Global Environmental Change** 18, pp. 397-411, doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.05.001.

G. van der Meijden [2014] : *Fossil Fuels, Backstop Technologies, and Imperfect Substitution*, in **Climate Policy and Nonrenewable Resources: The Green Paradox and Beyond**, éd. K. Pittel,

F. van der Ploeg, et C. Withagen, MIT Press, Cambridge, MA & London, pp. 87-120.

É. Vieille Blanchard [2011] : **Les limites à la croissance dans un monde global – Modélisations, prospectives, réfutations**, EHESS.

M. C. Weinstein et R. J. Zeckhauser [1974] : *Use Patterns for Depletable and Recycleable Resources*, **Review of Economic Studies** 41, pp. 67-88.

M. C. Weinstein et R. J. Zeckhauser [1975] : *The Optimal Consumption of Depletable Natural Resources*, **Quarterly Journal of Economics** 89, pp. 371-392, doi:10.2307/1885258.

M. L. Weitzman [1967] : *On Choosing an Optimal Technology*, **Management Science** 13, pp. 413-428, doi:10.1287/mnsc.13.5.413.

M. L. Weitzman [1970] : *Soviet Postwar Economic Growth and Capital-Labor Substitution*, **American Economic Review** 60, pp. 676-692.

M. L. Weitzman [1971] : *Shiftable versus Non-Shiftable Capital: A Synthesis*, **Econometrica** 39, pp. 511-529.