

À L'ORIGINE DES MODÈLES INTÉGRÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ÉLODIE VIEILLE BLANCHARD *

Le rapport au Club de Rome des «limites à la croissance», publié en 1972, affirme la nécessité de stopper la croissance économique et démographique pour éviter un effondrement du système mondial. Il synthétise plusieurs approches hétérogènes du futur, entre catastrophisme écologique et approche gestionnaire typique de la prévision technologique. Ce rapport provoque de fortes réactions de rejet dans les milieux politique et académique. Il suscite également le développement de plusieurs démarches de modélisation qui recadrent la problématique initiale, de «pour ou contre la croissance» vers «quel type de croissance est souhaitable» et «comment aménager la croissance pour la poursuivre». Parmi ces démarches, l'approche coût-bénéfice de la pollution va devenir une méthode significative d'appréhension du changement climatique.

L'année 1972 apparaît souvent dans les histoires de l'écologie et de la modélisation comme la date de parution du rapport au Club de Rome, *The Limits to Growth*, qui provoque un impact considérable sur le monde académique et politique. Souvent traité comme un repoussoir méthodologique et idéologique par des travaux ultérieurs, qui appréhendent les questions environnementales dans un cadre plus classique de science économique, ce rapport n'en joue pas moins un rôle considérable dans l'établissement d'un cadre conceptuel qui permet de traiter les problèmes «globaux» dans le cadre de modèles mathématiques, et dans la reconfiguration des enjeux intellectuels autour de l'environnement et du développement, qui contribue au façonnement du concept de développement durable.

* AGRÉGÉE DE MATHÉMATIQUES ET DOCTORANTE EN HISTOIRE DES SCIENCES AU CENTRE ALEXANDRE KOYRÉ (PARIS)

Nous souhaitons analyser ici le rôle de ce rapport dans la catalyse d'un débat autour du futur du monde, qui débouche sur la formation d'un consensus assez fort autour du bien-fondé de la croissance économique et, dans le plus long terme, sur la légitimation d'un certain type de modélisation des enjeux climatiques planétaires, central aujourd'hui. Pour cela, nous allons montrer tout d'abord comment il survient dans un contexte où les enjeux du « modèle de développement » (démographie ; économie ; environnement ; technologie) sont déjà un objet de discussion, puis comment le débat qu'il provoque élargit le périmètre d'une controverse déjà ouverte, en intégrant des acteurs scientifiques et politiques majeurs. Nous évoquerons enfin la manière dont les questions qu'il soulève suscitent l'élaboration de nouveaux modèles et discours, qui viennent se renforcer mutuellement afin d'appuyer le développement d'un nouveau paradigme environnemental.

1945-1970, les approches du futur aux États-Unis et en Europe : entre catastrophisme écologique, prospective normative et utopisme technologique

Entre 1945 et la fin des années 1960 – période de formation du Club de Rome –, l'appréhension du futur dans ses multiples dimensions, à une échelle géographique globale, se profile dans des lieux hétérogènes, par le biais de préoccupations particulières. Il y a montée en puissance des discours autour du futur et des méthodes pour appréhender le futur.

Ces approches relèvent de deux grandes catégories bien cristallisées, qui s'opposent l'une à l'autre : d'une part une approche « catastrophiste », qui s'articule autour de l'annonce de plusieurs grands dangers (le danger atomique, la croissance démographique mondiale, l'épuisement des ressources et l'explosion des pollutions) et qui se développe autour de mobilisations et d'élaborations critiques diverses ; d'autre part une approche plus « professionnelle », qui émerge dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, avec ses grandes figures, ses lieux institutionnels et ses méthodes bien formalisées, qui éclot autour des problématiques militaires pour élargir considérablement son champ d'étude au cours des années 1960.

Le façonnage d'une approche catastrophiste du futur

C'est essentiellement aux États-Unis qu'émerge, dès l'après Seconde Guerre mondiale, une approche catastrophiste du futur

qui dénonce les transformations technologiques et politiques liées à l'industrialisation du monde et au processus de développement. Dans un premier temps, plusieurs thématiques émergent de manière distincte et sont le fait de groupes socialement minoritaires. Dans un second temps, ces thématiques sont agrégées et concourent à forger les discours sur la « crise globale » qui deviennent assez prégnants.

La thématique du danger atomique émerge la première. Selon plusieurs analystes ¹, elle se trouve à l'origine du développement de la pensée écologique. La concrétisation de la bombe atomique manifeste à la fois pour les acteurs du projet atomique et pour les observateurs du grand public l'accès à des moyens de destruction sans précédent. Suite à Hiroshima et Nagasaki, il est immédiatement question d'annihilation globale de l'espèce humaine, dans les journaux de toutes tendances politiques ².

Dans les mois qui suivent s'organise le premier mouvement de scientifiques critiques, principalement des physiciens qui ont été impliqués dans le Projet Manhattan. Il y a d'abord fondation d'associations locales, puis coordination nationale du mouvement en janvier 1946 ³. Le futur est au premier plan dans des discours structurés autour de l'idée que l'arme atomique bouscule complètement les règles de la guerre, et qu'elle risque d'entraîner les différentes nations dans un processus qui pourra conduire à l'extinction de l'humanité ⁴.

Ce mouvement décline dès la fin des années 1940, fragilisé par des investigations gouvernementales répétées, dans un contexte de suspicion propre à la Guerre Froide ⁵. Il renaît à la fin des années 1950, alors que les essais nucléaires dans le Pacifique occasionnent de graves conséquences sur les populations locales. Le « Committee for Nuclear Information », fondé par Barry Commoner, se mobilise contre ces essais. Il ne s'agit alors plus de se focaliser sur le spectre d'une annihilation lointaine de l'espèce humaine dans son ensemble, mais de s'appuyer sur des études médicales et biologiques précises pour pointer les effets des essais nucléaires sur les populations ⁶. La mobilisation agit efficacement sur l'opinion publique américaine,

¹ Par exemple Worster (1977); Le Bras (1994).

² Boyer (1998).

³ Wang (1999).

⁴ Masters et Way (1946).

⁵ Wang (1999).

⁶ Egan (2007).

et influe sur l'adoption du Test Ban Treaty en août 1963, qui interdit les essais nucléaires dans l'atmosphère.

La double thématique de la population et des ressources est la deuxième, chronologiquement, dans laquelle s'immisce la perspective d'un futur menaçant pour l'humanité. Dans les années 1940, la professionnalisation de la démographie, associée à la création de structures dédiées au sein de l'ONU, contribue à la production de bases de données démographiques, qui stimulent un intérêt pour la population des pays non occidentaux et éclairent leur situation, jusqu'alors très peu connue ⁷.

Les premiers cris d'alarme sur la gravité de l'évolution démographique, mise en relation avec les ressources alimentaires, émanent de « professionnels de la nature », à la fin des années 1940, qui posent l'« excès de peuplement » comme une menace aussi grave que celle de la guerre atomique, et appellent à un contrôle des populations. Julian Huxley (premier directeur de l'UNESCO), Fairfield Osborn et William Vogt (écologues) ⁸ sont alors contredits par les représentants des agences onusiennes qui croient en les promesses de la Révolution Verte pour nourrir la population mondiale, quelle que soit sa croissance ⁹.

Les démographes, qui dans un premier temps soutiennent que le développement économique doit être le principal moteur d'une réduction de la natalité, se mettent progressivement à manifester un véritable « activisme pro-planning familial », soutenu par les fondations industrielles (Ford, Rockefeller). À l'ONU, le lobbying mené par les représentants du « population movement », associé à l'accumulation de résultats de recensements et à l'évolution des méthodes de projection démographique, conduit à la mise en place des premiers programmes d'assistance au contrôle des naissances, autour de 1965 ¹⁰.

Ces programmes sont vigoureusement soutenus par l'administration américaine, alors qu'aux États-Unis, les discours sur les dangers de la croissance démographique sont réappropriés par un mouvement écologiste en plein essor, qui voit la croissance démographique comme un phénomène menaçant, non seulement au niveau des pays en développement, mais aussi au niveau global. Une telle conception, qui appréhende la démographie

⁷ Chasteland (2006).

⁸ Osborn (1948); Vogt (1948).

⁹ Symonds et Carder (1973).

¹⁰ Symonds et Carder (1973).

par le prisme de l'écologie, devient dominante dans les milieux scientifiques et politiques états-uniens ¹¹.

Troisième thématique à façonner des discours alarmistes sur le futur, la pollution. Elle se développe en réaction à un changement de matérialité très important de l'économie américaine après 1945 : industrialisation de l'agriculture avec l'utilisation massive de produits chimiques issus des recherches militaires (dont le DDT) ; « révolution technologique » qui voit l'explosion de nouveaux procédés et de matériaux dans l'industrie.

En 1962, *Silent Spring*, de la biologiste Rachel Carson, s'appuie sur un recensement très précis d'expériences de vaporisation d'insecticides aux États-Unis. Il présente la contamination de l'environnement par les produits chimiques comme « le problème central de l'époque », qui va de pair avec « la possible extinction de l'humanité par la guerre nucléaire »¹². La parution de l'ouvrage a un impact très fort sur le milieu industriel, le grand public et l'administration politique, qui adopte dans la foulée plusieurs lois de régulation environnementale.

La période qui suit voit la montée d'une critique de la société d'« opulence » et de progrès technologique, qui émerge au départ d'une classe moyenne de la « société de loisir », mais également de certains représentants du Parti Démocrate, ou bien de personnalités politiquement plus radicales. Les discours environnementalistes sont relayés par un mouvement associatif bourgeonnant. On assiste à la naissance d'un « nouvel environnementalisme », qui se focalise sur les impacts de la destruction de l'environnement sur l'humanité plutôt que sur la nature elle-même, et dont la portée est plus politique.

À la fin des années 1960, le discours sur la nécessité d'un contrôle de la population est consensuel aux États-Unis et dans les agences de l'ONU. C'est alors que se développe, essentiellement aux États-Unis, un discours qualifié de « prophétique » par ses critiques, qui annonce un devenir catastrophique pour l'humanité si des changements radicaux ne sont pas engagés.

Ces discours s'appuient sur plusieurs écrits rédigés entre 1966 et 1972, qui connaissent un très grand retentissement, et dont les auteurs s'expriment largement sur les campus dans les médias ¹³. Ces œuvres brassent entre autres les thématiques

¹¹ Commission on Population Growth and the American Future (1972).

¹² Carson (1962).

¹³ Les plus connus sont Ehrlich (1968) et Commoner (1971).

de la croissance démographique, des dégâts de l'agriculture intensive sur les écosystèmes, de la pollution et de l'épuisement des ressources. La rhétorique de l'urgence et de la catastrophe y est omniprésente. Elles reposent toutes sur une approche systémiste, qui se caractérise par une invocation fréquente de la complexité des écosystèmes. Elles mettent en avant les limites au développement humain, et appellent à une reconversion profonde des systèmes sociaux et économiques, vers un état de stabilité.

À la même période, plusieurs représentants d'un courant « hétérodoxe » en économie, qui apportent de l'eau au moulin de la pensée écologiste, proposent une représentation du processus économique inspirée par la thermodynamique, qui prend à bras-le-corps la question de la temporalité et de l'irréversibilité, avec en ligne de mire la perspective d'un futur menaçant, voire même inexistant pour l'espèce humaine ¹⁴.

La fin des années 1960 voit la montée en puissance d'un mouvement socialement significatif, avec la formation d'un grand nombre d'associations environnementales, et l'explosion des associations existantes. Ce mouvement culmine en avril 1970, avec le premier « Jour de la Terre », auquel 20 millions de personnes participent. Son idéologie influe sur la préparation de la Conférence de Stockholm, dont le rapport préparatoire énonce le postulat de la limitation de l'environnement, et la possibilité que l'expansion économique inconsidérée aboutisse « à la fin de toute vie » ¹⁵.

Le développement d'une futurologie professionnelle

Pendant cette même période se met en place un champ professionnel d'« études du futur ». Il se développe d'abord parallèlement, aux États-Unis autour de questions technologiques, et en Europe, dans une perspective plus philosophique et normative, avant que ces deux approches ne s'influencent mutuellement.

Aux États-Unis, la tradition de « prévision technologique » se met en place dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, avec notamment la fondation de la RAND Corporation, chargée tout d'abord d'analyser et de comparer les choix alternatifs en politique de défense, et qui progressivement élargit ses prérogatives

¹⁴ Georgescu-Roegen (1971); Boulding (1966); Daly (1971).

¹⁵ Ward et Dubos (1972), p.102.

afin de mener une investigation plus large sur l'avenir. Assez rapidement, la « prévision technologique » développée dans le contexte militaire est mobilisée par la sphère industrielle, où elle vient nourrir la planification économique. Les méthodes mobilisées sont formalisées de manière assez précise, dans la continuation des approches élaborées dans la sphère militaire (programmation linéaire, graphes, théorie des jeux...). Elles contribuent soit à extrapoler des évolutions technologiques, soit à aider à résoudre des problèmes donnés, dans le cadre de la réalisation de projets industriels ¹⁶.

En Europe, l'approche du futur germe d'abord en France, dans un contexte de reconstruction et non de nouvelle mobilisation comme aux États-Unis. Dans le cadre de la planification nationale instaurée au sortir de la guerre, cette investigation de l'avenir à court terme conduit souvent à une approche à plus long terme (« prospective ») ¹⁷. L'apport de Gaston Berger et Bertrand de Jouvenel vient structurer ce cadre. Chez eux, il s'agit d'appréhender le futur en cherchant à se fixer des fins porteuses de sens (une dimension normative très peu présente aux États-Unis), et d'envisager une multitude de futurs possibles (c'est le sens des « Futuribles » de Jouvenel) afin de pouvoir effectuer des choix, plutôt que de considérer le futur comme un pur produit des évolutions technologiques.

À partir du milieu des années 1960 se développent en Europe des approches du futur marquées par cet héritage : la technologie n'y occupe pas une place centrale, et la scientificité des méthodes d'approche n'est pas une préoccupation majeure comme aux États-Unis. Elles sont d'abord le fait d'individus particuliers, avant que se constitue un réseau social, stimulé par la Conférence Mankind 2000 (Oslo, 1967).

Ces approches critiquent la prédominance accordée aux États-Unis pour les aspects technologiques, et le désintérêt pour les questions plus sociales et politiques. Elles dénotent un intérêt marqué pour les problèmes politiques internationaux, la participation démocratique, ainsi que les évolutions culturelles. Elles portent un regard assez ambivalent sur la technologie (considérée comme menace autant que comme promesse), dénotent une réflexivité importante (avec des questionnements répétés sur l'utilité de la futurologie pour la société), et une forte dimension normative. Il s'agit de s'interroger sur les buts

¹⁶ Jantsch (1967).

¹⁷ Cazes (2008).

que la société doit poursuivre, plutôt que de projeter des futurs possibles ou probables ¹⁸.

Tandis que les approches européennes critiquent un premier modèle américain déterministe, centré sur la technologie, la prévision technologique américaine intègre de manière croissante des questions sociales. On parle alors de « technologie sociale » : les questions technologiques sont appréhendées dans le cadre de l'étude de la planification urbaine, des transports, des ressources naturelles, ou de la gestion politique des problèmes publics. Par exemple, le Hudson Institute, fondé par Herman Kahn en 1961, se spécialise dans la rédaction de scénarios et l'évaluation des futurs, dans un vaste contexte militaire, économique, social et politique. Il travaille essentiellement pour le gouvernement des États-Unis ¹⁹.

À la fin des années 1960, deux grandes entreprises de recherche menées de part et d'autre de l'Atlantique pour appréhender l'an 2000 témoignent de différences d'approches persistantes.

Aux États-Unis, la « Commission de l'An 2000 » est créée par l'Académie Américaine des Arts et des Sciences afin d'étudier les conséquences de la transformation d'une économie industrielle en une économie de services. Dans cette perspective, elle commissionne le Hudson Institute, qui réalise l'essentiel du travail, et dont le rapport témoigne d'une représentation particulièrement confiante de l'avenir. Son argument principal est l'avènement d'un âge « post-industriel », qui va marquer une émancipation de l'être humain par rapport à sa base naturelle : acheminement vers une société de loisirs dans lequel le travail occupera une place mineure ; évolution des techniques médicales qui permettront de surpasser les limites du corps humain ; contrôle possible du climat ; possibilité de produire de l'énergie sans épuiser de ressources et sans produire de pollution... Cet avenir radieux est annoncé comme la destinée naturelle des sociétés humaines, qui adviendra sans qu'il soit nécessaire de mettre en place des mesures particulières ²⁰.

Du côté européen, la Conférence Mankind 2000 a pour objectif explicite d'appliquer les méthodes mises en place aux États-Unis dans un cadre militaire afin de répondre à des problématiques civiles. Son rapport témoigne d'une ouverture

¹⁸ Moll (1991).

¹⁹ Jantsch (1967).

²⁰ Kahn et Wiener (1967).

aux problématiques sociales et politiques, d'une certaine normativité (une partie est consacrée aux « buts et implications humains ») et d'une certaine réflexivité. Il dénonce par ailleurs l'appropriation des ressources par les pays riches au détriment des pays pauvres, et énonce la nécessité de la transition vers une société de stabilité pour les pays riches (sur une base plus morale qu'écologique) ²¹.

L'impact scientifique et politique du rapport au Club de Rome

Au début des années 1970, les rapports *World Dynamics* puis *The Limits to Growth* mettent en scène, sous la forme de modèles mathématiques mondiaux ²², une dichotomie déjà amplement exprimée (sous forme de discours), dans des variantes différentes, par les promoteurs de la planification familiale et les écologistes : celle de la croissance (de la population et de la production) opposée à la limitation des ressources (minérales et agricoles).

Ces rapports sont élaborés afin de répondre à la demande d'une jeune organisation formée de futurologues et d'hommes d'affaires, le Club de Rome, qui souhaite disposer d'un outil efficace afin de communiquer sur les enjeux qu'il prétend traiter. Ces enjeux sont formalisés au sein du Club sous la forme de la « Problématique » : un réseau inextricable de problèmes d'envergure mondiale, qui menacent de manière croissante le devenir de l'humanité.

Dans une première phase d'élaboration, la Problématique n'apparaît pas comme une conception unifiée au sein du Club : si les futurologues Hasan Ozbekhan et Erich Jantsch, chargés des questions méthodologiques, l'envisagent essentiellement comme le déséquilibre écologique du système planétaire, et appellent à une stabilisation de ce système ²³, Aurelio Peccei, le fondateur de l'organisation, apparaît davantage préoccupé par le « fossé technologique » qui se creuse entre les États-Unis et l'Europe, qu'il s'agit pour lui de combler par davantage de développement industriel ²⁴.

²¹ Jungk et Galtung (1969).

²² Voir encadré.

²³ Ozbekhan (1969) et Ozbekhan (1970).

²⁴ Peccei (1969).

L'entreprise de modélisation tranche entre ces deux approches distinctes de la croissance (stabilisation du système versus croissance accélérée de certaines régions). Elle contribue par ailleurs à réduire drastiquement le nombre de problèmes qui entrent dans la Problématique: des domaines comme la faim et la malnutrition, la pauvreté, l'inadéquation des institutions politiques ou la course aux armements, qui sont envisagés dans un projet initial ²⁵, se trouvent évacués au profit des aspects purement matériels (production de nourriture, épuisement des ressources et pollution).

Qu'est-ce qu'un modèle mathématique mondial?

Dans les années 1970, plusieurs approches prétendent traiter des grands problèmes du monde en s'appuyant sur des modèles mathématiques. Les premiers modèles sont World 2 et World 3, créés pour le Club de Rome. Ils ouvrent le débat autour de la croissance. D'autres modèles, qui reposent sur différents questionnements (liés à l'énergie, à la production alimentaire, au développement des pays du Sud...), et différentes méthodologies, apportent ensuite leur contribution. Chacun de ces modèles possède :

- une structure, qui indique quelles variables (ou groupes de variables) sont étudiées, et quelles sont les relations principales entre elles. Parfois, cette structure est représentée sous forme schématique, à l'instar de celle des modèles World, avec ses boucles de rétroaction (voir Figure 1);
- des équations, qui détaillent plus précisément les relations entre les variables.

Chacun de ces modèles s'appuie sur un mode opératoire particulier. Deux grandes catégories se dégagent :

- les modèles « exploratoires », comme ceux du Club de Rome, examinent l'effet de certaines hypothèses initiales, ou « scénarios », qui correspondent à des évolutions projetées dans le futur. Lorsque le modèle « tourne » avec ces

²⁵ Ozbekhan (1970).

hypothèses ou scénarios, il permet d'obtenir des résultats quantifiés concernant l'évolution des variables. Les modèles exploratoires permettent de répondre à des questions du type « que se passera-t-il si... ? ».

- les modèles d'optimisation, comme celui de la Fondation Bariloche, ou de l'économiste William Nordhaus, cherchent à établir « la meilleure valeur » pour une certaine variable (par exemple, une taxe sur le carbone), ou « le meilleur chemin » à suivre, afin de répondre à un certain objectif (maximiser l'espérance de vie au cours d'une période, pour la Fondation Bariloche; maximiser la croissance économique pour Nordhaus). Ils permettent de répondre à des questions du type « quels sont les meilleurs choix pour que... ? ».

World 2 et World 3 : la Problématique reconfigurée par la Dynamique des Systèmes

La mise en modèle de la Problématique du Club de Rome est d'abord l'œuvre de Jay Forrester du Massachusetts Institute of Technology (MIT), une figure du complexe militaro-industriel, auteur d'une méthodologie de modélisation, la Dynamique des Systèmes. Élaborée dans une perspective industrielle, cette méthodologie représente les systèmes sous la forme d'un ensemble d'éléments reliés par des boucles de rétroaction qui composent la structure causale du système.

Ces éléments correspondent à des variables, dont les évolutions sont définies par des équations à temps discret, qui les mettent en relation les unes avec les autres. À cet arsenal technique, Forrester associe toute une épistémologie, dans laquelle la modélisation apparaît comme un moyen d'effectuer des expérimentations virtuelles sur des systèmes réels, et dans laquelle la volonté de dégager le comportement qualitatif d'un système (croissance puis déclin, ou variations cycliques, ou croissance puis stabilisation...) prime sur l'exigence de prévision quantifiée et datée ²⁶.

Le choix de la Dynamique des Systèmes survient dans un contexte où le Club de Rome peine à trouver un financement pour l'entreprise de modélisation qu'il envisage, et où les propositions

²⁶ Forrester (1961).

d'Ozbekhan et de Jantsch sont jugées trop complexes par les membres de l'organisation. À la réunion de Berne, en juin 1970, Jay Forrester propose sa méthodologie, et son adoption est validée quelques mois plus tard par le Comité Exécutif de l'organisation ²⁷.

Le premier modèle mondial de la Problématique, World 2, est conçu par Forrester seul. Il conduit à la publication du rapport *World Dynamics* en mars 1971. Le second modèle, World 3, est élaboré à partir de World 2 par une équipe de jeunes chercheurs du MIT, dirigée par Dennis Meadows. Il conduit à la publication de *The Limits to Growth* en mars 1972. Les différences essentielles entre les modèles résident dans le nombre d'équations (trois fois plus dans World 3 que dans World 2) et dans leur documentation (les paramètres sont assignés de manière presque arbitraire dans World 2, tandis que World 3 s'appuie sur un certain nombre de données officielles). Elles résident également dans l'argumentation qui accompagne les résultats, beaucoup plus détaillée dans le second rapport. Mais pour l'essentiel, la structuration des modèles et l'organisation des rapports sont les mêmes.

Dans chacun des deux modèles, les variables principales sont la population, le capital industriel, le capital agricole, la pollution et les ressources. Chacune de ces variables est supposée se rapporter à l'état de la planète entière. La natalité et la mortalité sont calculées à partir de la quantité de nourriture disponible, de la pollution, du niveau de vie matériel et de la population. Elles sont supposées dépendre fortement du niveau de vie matériel. En particulier, lorsque le niveau de vie diminue, la mortalité est supposée augmenter fortement. La production (« capital industriel ») est supposée s'auto-entretenir tout en dépendant des ressources naturelles (qui sont appréhendées comme un stock fini).

La conséquence de cette structure est que dans la simulation de base, World 2 et World 3 témoignent tous deux d'une croissance du système suivie d'un effondrement (« overshoot and collapse »), qui découle de la raréfaction des ressources. Cet effondrement apparaît sous la forme de courbes particulièrement éloquentes, qui jouent un rôle important dans la publicisation des résultats du modèle (voir Figure 2). Chacun des deux rapports examine les conséquences d'hypothèses « technologiques » supposées repousser ces premières limites à la croissance. Ces hypothèses

²⁷ Elichirigoity (1999).

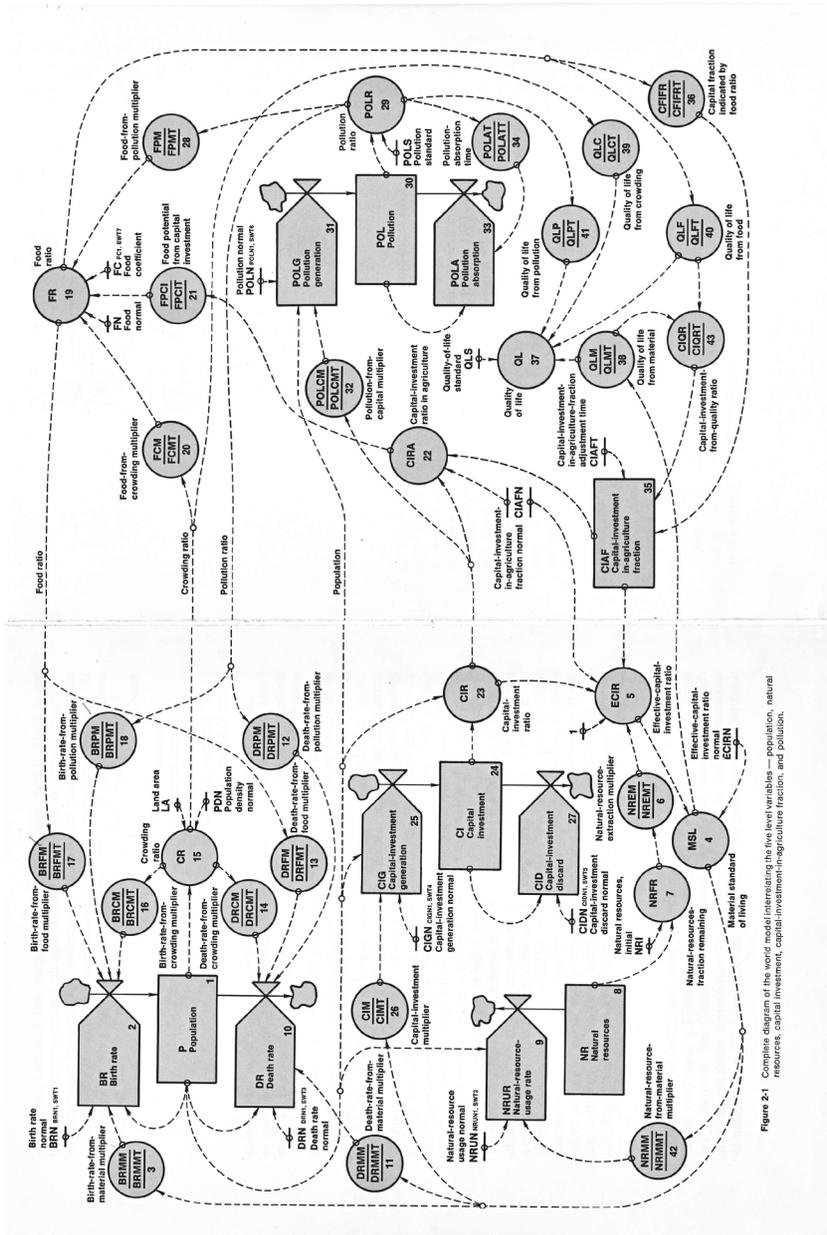


Figure 2-1. Complete diagram of the world model interrelating the five level variables — population, natural resources, capital investment, capital-investment-in-agriculture fraction, and pollution.

Figure 1: la structure du modèle World 2

se traduisent par la modification d'un paramètre : doublement du stock de ressources naturelles présent au départ. Elles permettent d'éviter l'effondrement par épuisement des ressources, mais débouchent sur un autre type de déclin, provoqué cette fois par l'explosion de la pollution.

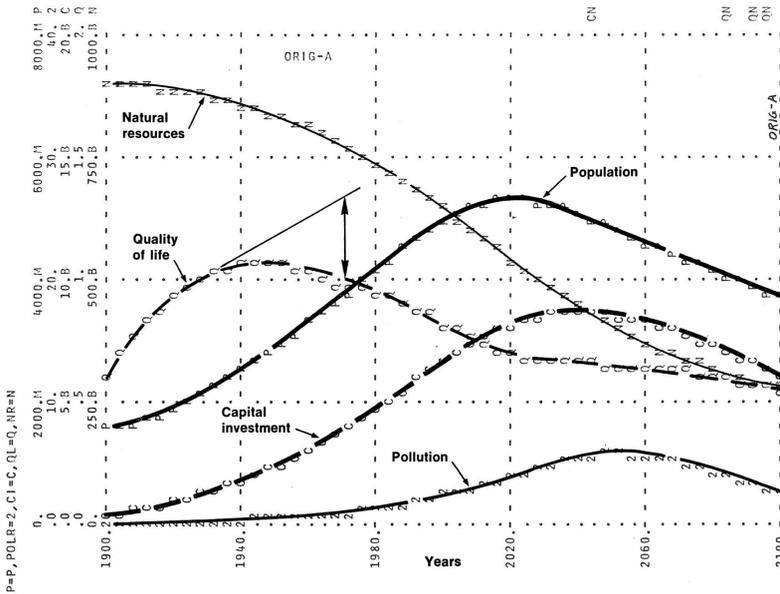


Figure 2 : le comportement « overshoot and collapse » de World 2 dans la simulation de base.

Dans *World Dynamics*, les hypothèses technologiques « les plus optimistes », qui supposent un accroissement des ressources naturelles et une diminution forte de la pollution par unité de production conduisent à une croissance du système suivie d'une stabilisation à un niveau élevé de population. Ce scénario est rejeté par Forrester, au motif que la population se stabilise à un niveau trop élevé, et le niveau de vie à un niveau trop faible. En revanche, dans *The Limits to Growth*, de telles hypothèses ne modifient pas le comportement du système mais se contentent de repousser l'effondrement à une date plus lointaine.

Les auteurs des deux rapports examinent donc l'effet d'une nouvelle hypothèse, plus drastique, sur l'évolution du modèle : celle de la stabilisation volontaire de la population et la production

industrielle. Dans *World Dynamics*, Forrester s'intéresse à l'effet de l'hypothèse supplémentaire d'une réduction volontaire de la production alimentaire mondiale, mais celle-ci n'est pas reprise dans *The Limits to Growth*. Avec ces hypothèses, le système global croît pour se stabiliser rapidement ²⁸. Cette dernière catégorie de scénarios est valorisée par les auteurs des rapports, qui préconisent des ruptures politiques profondes afin d'engager une transition vers la stabilité.

L'impact intellectuel du rapport des *Limites*

Si la parution de *World Dynamics* suscite quelques réactions critiques dans la presse scientifique, celle de *The Limits to Growth* soulève un véritable raz de marée intellectuel et politique. Le travail de « marketing » mené par Peccei afin de publiciser le travail du MIT joue assurément un rôle important : un certain nombre de personnalités scientifiques et politiques de premier plan reçoivent régulièrement des comptes-rendus du travail en cours ; par ailleurs, la sortie de l'ouvrage donne lieu à une importante cérémonie, relayée par les grands journaux de la côte Est des États-Unis ²⁹.

Dans le monde anglo-saxon, la préconisation de stabiliser la population mondiale ne suscite pratiquement aucune réaction. Cependant, la reprise de la revendication de la croissance économique zéro, portée jusque là par une frange radicale du mouvement écologiste, par un groupe élitiste issu des milieux des affaires et de la planification, associée à sa mise en modèle mathématique, suscite des réactions extrêmement vives de la part de personnalités qui prenaient peu au sérieux, jusque là, un tel discours.

Les mois qui suivent la parution du rapport voient donc un afflux de critiques, émanant essentiellement d'économistes et de politologues. Ces critiques s'attachent à la structure des modèles elle-même ³⁰. Elles dénoncent tout d'abord l'absence de la modélisation des processus économiques, et notamment des mécanismes de prix (qui sont censés pouvoir stimuler la recherche

²⁸ Seules les ressources déclinent doucement, mais les auteurs affirment que la lenteur de leur déclin laisse le temps de leur rechercher des substituts.

²⁹ Moll (1991).

³⁰ Essentiellement celle de World 2, dans la mesure où le rapport des Limites ne divulgue par la liste des équations de World 3.

de substituts lorsque certaines ressources s'épuisent)³¹. Elles critiquent également le « pessimisme technologique » qui se dégage des rapports : d'une part, le progrès technologique n'apparaît pas explicitement dans les modèles ; d'autre part, les scénarios qui sont supposés l'intégrer ne font que l'hypothèse d'un progrès technologique linéaire (certaines constantes, comme la quantité de ressources disponibles, sont augmentées, mais leur fixité est maintenue), alors qu'ils envisagent une croissance exponentielle de la population et la production.

Plusieurs de ces critiques s'approprient le modèle World 2 afin d'intégrer des hypothèses qu'elles jugent vraisemblables. William Nordhaus (économiste de la Cowles Commission) et Robert Boyd (ingénieur-zoologue de l'Université de Californie) supposent séparément qu'au-delà d'un certain stade de développement technologique, la production peut s'affranchir des ressources naturelles (ce qui correspond à l'hypothèse d'une fusion nucléaire permettant d'extraire des ressources de manière accrue et de les recycler autant que nécessaire) ; et qu'il est possible de supprimer complètement la pollution. Avec ces hypothèses, le système peut croître indéfiniment³². De leur côté, Hugh Cole et Raymond Curnow, de l'Université du Sussex, modifient la relation entre niveau de vie et mortalité dans le modèle. Ils concluent également à la possibilité d'éviter l'effondrement du système³³.

Une deuxième grande catégorie de critiques consiste à pointer la posture technocratique des modélisateurs, qui prétendent, au nom de l'élite qu'ils représentent, dicter la marche à suivre à l'ensemble du monde³⁴. L'agrégation des modèles est par ailleurs critiquée en ce qu'elle gomme les mécanismes de domination économique, et les inégalités de richesse entre les pays du monde³⁵. Enfin, le recours à la modélisation est désigné comme un paravent qui masque à la fois les présupposés du travail (ce sont les problèmes de pays riches qui sont l'objet d'étude) et le caractère profondément politique des recommandations qui en découlent³⁶.

³¹ Par exemple, Nordhaus (1973a).

³² Boyd (1972) ; Nordhaus (1973a).

³³ Cole et Curnow (1974).

³⁴ Simmons (1974).

³⁵ Ul Haq (1972) ; Galtung (1973).

³⁶ Kaysen (1972).

L'impact politique du rapport

Dans le monde politique, ce sont essentiellement les conclusions du rapport qui sont discutées, sans que la démarche les ayant produites soit examinée de près. Au sein du gouvernement américain, des agences de l'ONU ou des institutions européennes, le rapport au Club de Rome compte à la fois d'ardents défenseurs, qui préconisent des ruptures politiques radicales, et de farouches détracteurs, qui cherchent à défendre le bien-fondé de la croissance économique au niveau national comme international.

Si des études sont commandées par les gouvernements états-unien et britannique à propos du rapport des *Limites*, qui concluront que la préconisation de stabiliser l'économie mondiale n'est pas fondée, c'est au sein des institutions européennes que la conclusion du rapport suscite le débat le plus vif. Cette conclusion est reprise dans la lettre rédigée en février 1972 par le Commissaire néerlandais Sicco Mansholt, et adressée au Président de la Commission Européenne.

Dans sa lettre, qui anticipe la publication du rapport des *Limites*, Mansholt s'appuie sur ses grandes lignes pour préconiser des mesures politiques précises : stabilisation de la population mondiale ; priorité à la production alimentaire ; forte réduction de la consommation de biens matériels par habitant ; prolongation de la durée de vie de tous les biens d'équipement ; lutte contre la pollution et l'épuisement des matières premières. Il préconise le remplacement du produit national brut par l'« utilité nationale brute », dans le cadre d'une économie planifiée au niveau européen, qui privilégierait les investissements publics et s'occuperait d'un rétablissement de l'équilibre écologique ³⁷.

En mars, en France, dans le cadre du référendum portant sur l'entrée de quatre nouveaux pays dans la Communauté Européenne, les communistes, partisans du non, se saisissent de la lettre Mansholt. Georges Marchais, notamment, dénonce l'existence d'un plan au sein même de « la plus haute instance du Marché Commun », qui viserait à provoquer délibérément « un net recul du bien-être » ³⁸. Cette « doctrine Mansholt », telle qu'elle est cristallisée par le PCF, suscite début avril la prise de

³⁷ Mansholt (1972).

³⁸ Déclaration de Georges Marchais à l'Assemblée Nationale, le 4 avril 1972, in Thill (1972).

position officielle des partis de gauche comme de droite, qui s'y déclarent opposés.

Tandis que Marchais dénonce la manière dont les technocrates de Bruxelles prétendraient, dans un plan jusque là gardé secret, organiser un appauvrissement planifié de la population, Paul Huvelin, le président du CNPF, argumente de la nécessité d'une forte croissance économique pour « améliorer le niveau de vie des plus défavorisés », tandis que Raymond Barre reprend les arguments des optimistes technologiques afin de réfuter la nécessité d'une croissance zéro et que Valéry Giscard d'Estaing affirme que c'est la poursuite de la croissance qui doit régler le problème de la pauvreté, et pas la redistribution des richesses ³⁹.

La formation d'un consensus autour d'une « autre croissance » : modélisations et argumentations

Dans les années qui suivent la publication du rapport au Club de Rome, de nombreuses voix s'élèvent pour affirmer la possible coïncidence entre croissance économique et préservation de l'environnement. Un concept de croissance alternative, focalisé sur la qualité plutôt que la quantité, et s'attachant à minimiser les effets néfastes qu'elle génère, est progressivement élaboré. Ce concept est conforté par plusieurs entreprises de modélisation, qui font dévier la question initialement posée (croissance ou stabilité ?) vers celle du modèle de croissance (quel type de croissance est souhaitable ?). Quelles que soient les ruptures effectives accomplies avec des processus économiques délétères socialement et économiquement, ce nouveau concept imprègne profondément les discours politiques et économiques, et marginalise les discours qui prônent la croissance zéro ou de la décroissance.

L'émergence d'un concept de croissance durable

Dans les mois qui suivent la parution du rapport au Club de Rome, les milieux politiques élaborent en réaction aux menaces qu'il pointe le concept d'une autre croissance, supposée prendre acte de ces dangers sans rompre profondément avec le cadre antérieur. Cette perspective se dégage par exemple de la Conférence organisée par la Commission Européenne à

³⁹ Pour tous ces positionnements, voir Reichenbach et Urfer (1974).

Venise, en avril 1972. Les industriels, syndicalistes et experts qui y participent insistent tous sur la nécessité de rompre avec une croissance focalisée sur le quantitatif, et de rechercher un développement orienté vers la qualité de la vie, qui respecte l'environnement tout en développant l'innovation scientifique et technologique, et qui s'occupe de « répondre aux aspirations profondes des hommes »⁴⁰.

En juin, à la Conférence de Stockholm, un groupe de jeunes scientifiques des pays en développement publie un communiqué qui affirme rejeter « certains modèles de stagnation proposés par certains écologistes, économistes, industriels, et fans de l'ordinateur occidentaux ». Ils rejettent la condamnation de la croissance économique en elle-même pour incriminer dans la dégradation environnementale le système de profit capitaliste, et revendiquer un autre modèle de développement mondial, plus égalitaire⁴¹.

Deux ans plus tard, en décembre 1974, le Président des États-Unis, Gerald Ford, déclare dans une adresse au Congrès la possible coexistence entre conservation des ressources, préservation de l'environnement et croissance de la consommation d'énergie. « Notre engagement environnemental a mûri », déclare-t-il⁴². Même si quelques critiques l'accusent d'user d'un tel discours tout en affaiblissant les réglementations environnementales, de telles revendications confortent l'opinion publique.

Tous ces discours s'appuient sur les entreprises de réhabilitation de la croissance portés par plusieurs économistes. En 1973, Nordhaus et Tobin proposent la construction d'un nouvel indicateur, dit du « bien-être économique », dont seraient soustraites les dépenses considérées comme « regrettables » (défense ; police ; justice...) et dans lequel seraient intégrés les loisirs et les activités ménagères⁴³. Un an plus tard, le britannique Wilfred Beckerman rédige un volume consacré à la « défense de la croissance économique », qui accorde aux critiques l'absurdité de la poursuite de la croissance pour elle-même et ses effets indésirables, mais montre comment une bonne croissance, dans laquelle les ressources seraient bien réparties au sein de

⁴⁰ Commission des Communautés européennes (1972).

⁴¹ Rapporté par Galtung (1972), p.105.

⁴² Ford (1974).

⁴³ Nordhaus et Tobin (1973).

la population et au cours du temps, constituerait un objectif politique tout à fait souhaitable ⁴⁴.

La dissolution de la controverse stabilité/croissance dans la modélisation globale et l'économie de l'environnement

Au milieu des années 1970, la croissance économique zéro est très peu soutenue au sein des communautés scientifique et politique. En novembre 1975, une conférence financée par l'industriel Mitchell, co-organisée par le Club de Rome et l'Université de Houston, qui a pour but d'approfondir les réflexions ouvertes par le rapport de 1972, ne témoigne pas de développements pertinents sur le sujet. Alors que l'entreprise doit initialement être renouvelée à quatre reprises, la conférence de 1977 ne suscite de compte-rendu ni dans le *New York Times* ni dans *Science* (seulement une annonce), et les conférences ultérieures, si elles ont lieu, ne sont pas médiatisées.

À la même période, les questions autour de la production mondiale de nourriture suscitent une controverse à propos de la politique que les pays développés doivent adopter. Forrester s'y illustre en soutenant la position du « triage », selon laquelle les pays riches ne devraient apporter de la nourriture qu'aux pays en développement mettant en œuvre des politiques drastiques de planification familiale, et devraient cesser tout soutien aux autres pays.

Si on exclut ce positionnement radical, le Club de Rome, dans son ensemble, ne demeure pas fidèle aux conclusions du rapport des *Limites*. Dès 1972, en réaction aux critiques sur l'agrégation des modèles World, il lance un nouveau projet de modélisation, dirigé par Mihajlo Mesarovic (de Case Western University, à Cleveland) et d'Eduard Pestel (de l'Université Technique de Hanovre). En 1974, le rapport de ce travail, qui repose sur une méthodologie de modélisation extrêmement complexe (la « théorie des systèmes hiérarchiques multi-niveaux ») appliquée à une division du monde en dix régions, et dans lequel la structure du modèle n'apparaît pas, conclut à l'interdépendance des régions du monde, et à la nécessité de poursuivre une croissance « organique », qui viserait le développement des régions les moins

⁴⁴ Beckerman (1974).

défavorisées, plutôt qu'une croissance « indifférenciée », comme celle qui a eu lieu jusque là ⁴⁵.

En 1976, le rapport RIO (« Reshaping the International Order »), commandité par le Club de Rome à l'économiste Jan Tinbergen, recommande, afin de réduire le fossé entre Premier monde et Tiers monde, que les pays riches s'engagent dans des croissances nulles, voire négatives au cours des trente années à venir, afin que les pays en développement puissent adopter des taux de croissance de l'ordre de 5% ⁴⁶. À l'époque, Peccei évoque le rapport des Limites comme une étape ayant permis de soulever certains problèmes, mais il soutient les bénéfices de l'industrialisation, ainsi que des progrès scientifiques et technologiques.

La même année paraissent les conclusions tirées du modèle mondial conçu à la Fondation Bariloche, en Argentine, afin de répondre aux préoccupations des pays du Sud. Construit en vue d'examiner la possible réalisation d'objectifs de développement précis dans les différentes régions du monde, et reposant sur un processus d'optimisation intertemporelle de l'espérance de vie, il conclut à la possibilité pour l'Amérique Latine de parvenir rapidement à une situation acceptable, et à plus long terme pour l'Afrique et l'Asie, à condition que les investissements soient gérés de manière rationnelle dans ces régions. Il stipule par ailleurs que les pays développés devront accepter de stabiliser leur niveau de vie afin de permettre aux plus pauvres de sortir de la misère ⁴⁷.

Le modèle de Mesarovic et Pestel ainsi que celui de la Fondation Bariloche s'inscrivent dans une tradition dite de « modélisation globale », qui se développe en réaction au rapport au Club de Rome et qui donne lieu à la fabrication d'une dizaine de modèles focalisés sur diverses problématiques, traitant cependant tous de la question soulevée initialement par le rapport des Limites : celle du développement planétaire.

De ces approches diverses découlent des réponses variées, concernant la possibilité de la croissance et les priorités politiques à mettre en œuvre. Cependant, la notion de l'interdépendance du système planétaire, et la recommandation de traiter les problèmes à une échelle globale, en s'appuyant sur l'analyse et la planification, se dégagent de tous les rapports. Par ailleurs,

⁴⁵ Mesarovic et Pestel (1974).

⁴⁶ Tinbergen (1976).

⁴⁷ Herrera (1977).

la diversité des conclusions des études peut s'expliquer par la diversité des hypothèses et des méthodologies de modélisation adoptées, les conclusions positives concernant la poursuite de la croissance découlant souvent d'hypothèses technologiques particulièrement optimistes ⁴⁸.

Cette tradition perdure pendant une dizaine d'années en Europe, aux États-Unis, ainsi qu'en Amérique du Sud et au Japon. Elle mobilise un certain nombre d'acteurs déjà engagés dans le projet initial du Club de Rome, et se structure autour de l'International Institute for Applied Analysis, un organisme fondé par Peccei en 1972, dans les alentours de Vienne, qui effectue un travail continu de coordination et d'évaluation de ces diverses recherches. Au début des années 1980, cette tradition décline au profit de modélisations plus sectorielles, ou s'attachant à des entités géographiques plus restreintes.

La période des années 1970 voit également le développement d'une théorie économique de l'environnement, dont les premières pierres sont posées avant la publication du rapport au Club de Rome, mais qui se trouve stimulée par le débat autour des Limites.

Nordhaus, notamment, développe dans le prolongement de sa critique ⁴⁹ une première élaboration autour de la gestion des ressources énergétiques, dans un modèle mis en place en 1973. Ce modèle repose sur l'hypothèse de la mise en place puis de la généralisation d'une technologie permettant de produire de l'énergie à volonté sans utiliser de ressources, et sans polluer, laquelle serait définitivement mise en place en 2120. Sur cette base, il vise à minimiser sur une période de 150 ans le coût lié à l'extraction, au transport et au traitement des ressources. Il s'agit donc d'un modèle « d'optimisation intertemporelle » qui s'appuie sur des hypothèses concernant le coût d'extraction de différents types de ressources, à partir de différents gisements, et concernant la demande en énergie de cinq régions du monde « non communiste ». Les simulations menées avec ce modèle conduisent à l'élaboration d'un scénario pour la période 1970-2120, dans lequel, pour répondre à la demande en énergie, on commence à s'appuyer sur les réserves de pétrole, de gaz et de charbon, avant de se tourner progressivement vers la surgénération ⁵⁰.

⁴⁸ Vieille Blanchard (2010).

⁴⁹ Nordhaus (1973a).

⁵⁰ Nordhaus (1973b).

Dès l'année suivante, Nordhaus commence à évoquer la question du changement climatique : si, selon lui, et sur la base des résultats de ses modèles, l'approvisionnement en énergie ne devrait pas poser problème, en revanche l'impact de la combustion de fluides fossiles sur l'environnement devrait être pris au sérieux. Il calcule que le chemin optimal pour la période 1970-2120, calculé dans son article de 1973, contribuerait à accroître la concentration en CO₂ de l'atmosphère de 43 %⁵¹. En 1977, il commence à étudier la possibilité, par l'imposition d'une taxe sur le carbone, de « décarboniser » la production d'énergie. Pour cela, il adjoint à son modèle de 1973 certaines contraintes : il s'agit toujours de minimiser le coût total lié à l'énergie sur une période de 150 ans, mais on suppose en outre que certains seuils d'émissions de gaz à effet de serre ne doivent pas être dépassés, afin que la concentration en CO₂ dans l'atmosphère ne fasse pas plus que doubler⁵².

La modélisation intégrée du changement climatique

Ce travail constitue la première entreprise de modélisation à mettre en relation énergie, émissions et concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Au cours des années 1980, de tels travaux sont embryonnaires. Certes, on commence à développer une approche « d'évaluation intégrée » pour traiter des problèmes environnementaux, dans laquelle des groupes disciplinaires d'experts travaillent ensemble et échangent des informations quantitatives ; mais ce travail ne s'appuie pas sur des modèles formels, qui mettraient en relation les divers apports disciplinaires. Pendant cette période, les modèles mathématiques qui sont mis en place afin de mettre en relation économie et climat ne traitent que du CO₂ et ignorent les autres gaz à effet de serre. Par ailleurs, ils ne parviennent pas à aborder la question des impacts des émissions sur le climat et plus largement sur les écosystèmes et l'économie⁵³.

Il faut attendre 1990 environ pour que des modèles d'évaluation intégrée intègrent l'ensemble de la chaîne causale allant des politiques économiques et énergétiques aux émissions et aux impacts, et Nordhaus est cette fois encore le premier à proposer un travail achevé en la matière, sous la forme du modèle

⁵¹ Nordhaus (1974).

⁵² Nordhaus (1977).

⁵³ Bruce *et al.* (1996).

DICE («Dynamic Integrated Climate-Economy Model»). Ce modèle s'appuie sur la structure de base du modèle développé par Frank Ramsey dans les années 1920, qui vise à optimiser, sur une période de temps donnée, l'«utilité» liée à la consommation. Il s'agit avec le modèle de Ramsey de déterminer une trajectoire économique «optimale» (celle dans laquelle l'utilité liée à la consommation est la plus grande) dans laquelle année après année, un arbitrage est effectué, à partir de la production, entre consommation et investissement. Cette optimisation repose sur une «actualisation», c'est-à-dire que dans la somme des utilités annuelles à maximiser, plus une année est lointaine dans le futur, et moins elle est affectée d'un coefficient important. L'actualisation consiste donc à accorder plus de poids au présent qu'au futur.

Dans le modèle de Nordhaus, à cette structure de base sont adjointes des équations relatives au climat. Dans DICE, la production dépend à la fois de la population, du niveau technologique et du travail, mais également d'un «facteur climatique». Ce facteur est calculé pour diverses politiques climatiques, en combinant leurs coûts et leurs bénéfices. Au début des années 1990, ces coûts sont considérés comme bien connus; ils ont été estimés par des modèles de type «coût-efficacité» qui cherchaient à répondre à des questions du type «pour réduire de tel pourcentage les émissions (ou concentrations) de gaz à effet de serre, combien cela coûtera-t-il?». En revanche, l'estimation quantifiée des «bénéfices» de ces politiques, c'est-à-dire des dommages qu'elles ont permis d'éviter, est beaucoup plus complexe. Afin de la réaliser, Nordhaus s'appuie sur des travaux relevant de la climatologie, qu'il synthétise beaucoup et dont il extrait quelques relations ou paramètres significatifs. A partir d'une certaine activité économique, son modèle permet de calculer les émissions de gaz à effet de serre correspondantes; à partir de ces émissions, l'accumulation des gaz dans l'atmosphère; puis, de là, l'impact de ces gaz sur le climat. Pour ce dernier maillon, Nordhaus s'appuie sur un petit modèle représentant le climat comme un système à deux couches (atmosphère et océans supérieurs; océans profonds). À cet impact sur le climat, il attribue un coût, exprimé comme une perte fractionnaire de la production⁵⁴.

Dès son second rapport, en 1995, le troisième groupe de travail du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), consacré aux aspects socio-économiques du changement

⁵⁴ Nordhaus (1992).

climatique, accorde une attention toute particulière aux résultats des modèles « d'évaluation intégrée », comme DICE, dont il compile les résultats. Développés pour l'essentiel à partir de 1992, ces modèles explosent en nombre à partir de cette date : trois ans plus tard, le rapport du GIEC en recense 22 « en usage actif ou en cours de développement actif »⁵⁵.

Ils ont pour trait commun de représenter et de mettre en relation des catégories fondamentales (activités humaines ; composition atmosphérique ; climat et niveau de la mer ; écosystèmes), mais leur structure diffère. On peut retrouver les deux grandes familles qui étaient présentes dans le débat autour de la « modélisation globale » des années 1970 : d'une part des modèles d'optimisation comme celui de Nordhaus ; d'autre part des modèles d'évaluation comme le modèle IMAGE, qui est un descendant direct du modèle mis en place par l'équipe du MIT. Le débat des années 1970 autour de la croissance semble donc particulièrement structurant pour les élaborations théoriques des années 1990 autour du climat : d'une part parce qu'il pose la nécessité de mettre en relation, dans des structures mathématiques, des aspects très divers liés aux activités humaines ; d'autre part parce que les deux grandes familles de modèles qui apparaissent dans le débat autour de la croissance (exploration / optimisation) se retrouvent dans l'approche intégrée du changement climatique.

Ainsi, si DICE apparaît comme une élaboration plus poussée des premiers travaux de Nordhaus autour de l'énergie, le modèle IMAGE (Integrated Modelling of Global Environmental Change), développé au RIVM⁵⁶, aux Pays-Bas, opère d'une manière similaire aux modèles World. Il est constitué d'un certain nombre de modules reliés les uns aux autres par des processus de rétroaction, dont les principaux sont : un modèle régionalisé du climat (qui permet de rendre compte des phénomènes climatiques de manière beaucoup plus détaillée que DICE) ; un modèle technologique des systèmes mondiaux ; des modèles permettant de tenir compte de l'usage des sols et de leurs propriétés, ainsi que de l'évolution de l'agriculture ; un module socio-économique permettant d'encadrer la simulation par des scénarios détaillés. Ce modèle, qui est à la fois régionalisé et assez précis dans les phénomènes qu'il permet de modéliser (au contraire d'un modèle d'optimisation, qui, pour

⁵⁵ Bruce *et al.* (1996), p. 380.

⁵⁶ En néerlandais, le sigle signifie « Institut National des Pays-Bas pour la Santé Publique et l'Environnement ».

compenser le coût en calcul de la procédure d'optimisation, se doit de simplifier à l'extrême les phénomènes réels qu'il représente), nécessite, tout comme les modèles World, d'être « nourri » par des scénarios exogènes concernant l'évolution de la population, de la croissance économique ou de la demande en énergie, ce qui contraint fortement les conditions de son utilisation ⁵⁷.

Remarques conclusives

Les modèles élaborés dans le cadre du débat autour de la croissance, puis de l'appréhension du changement climatique global, constituent des « objets frontières » dans la mesure où ils permettent à différentes communautés (les biologistes ; les économistes ; les politiques...) de s'impliquer dans un débat et dans des négociations qui ont trait à de multiples composantes des activités humaines. Ces modèles constituent des supports permettant de représenter les systèmes climatique et économique dans leurs interactions, d'évaluer l'effet de politiques alternatives sur le climat, de déterminer, moyennant certaines hypothèses et certaines priorités, les « meilleurs » choix possibles, mais aussi de confronter des approches contradictoires concernant le fonctionnement du climat et de l'économie, ou la pertinence de certains choix politiques.

Dans le cadre du débat autour de la croissance, le modèle initial, qui avait ouvert une controverse sur le bien-fondé et la possibilité d'une poursuite de la croissance, a été vivement critiqué, ce qui a donné lieu ensuite au développement d'une variété de modèles alternatifs. Ces modèles mettaient en exergue d'autres problématiques que celle de la dichotomie croissance/stabilité, reposaient sur des méthodologies différentes de celle des modèles World, et concluaient en général à la possibilité de poursuivre la croissance économique, à condition que certains aménagements soient mis en place. Dans le cadre des négociations autour du changement climatique, plusieurs approches de la modélisation continuent à exister, mais les modèles semblent dotés d'une destinée beaucoup plus durable. C'est ainsi que le modèle DICE connaît une postérité remarquable depuis son achèvement au début des années 1990. Plusieurs dizaines d'équipes travaillent ou ont travaillé sur lui, et il donne lieu à de très nombreuses occurrences dans la littérature scientifique ⁵⁸.

⁵⁷ Matarasso (2003), p. 78.

⁵⁸ Matarasso (2007).

Cependant, cette postérité n'empêche pas de nombreux débats d'avoir lieu autour de paramètres et de choix internes aux modèles. En particulier, le taux d'actualisation choisi par Nordhaus est critiqué pour tenir trop peu de compte du futur, et ses hypothèses concernant les dégâts du changement climatique sont considérées comme beaucoup trop optimistes⁵⁹. En conséquence, la trajectoire « optimale » qu'il propose en termes d'émissions de gaz à effet de serre est très proche de la trajectoire « business as usual », dans laquelle aucun effort particulier n'est entrepris pour réduire les émissions.

De telles controverses témoignent du caractère profondément politique du travail de modélisation. S'il existe aujourd'hui un consensus assez large pour appréhender la question climatique avec des outils s'appuyant sur la science économique classique, ce qui n'était pas le cas dans les années 1970, en revanche, les critiques et les débats qui ont lieu concernant les choix internes aux modèles mettent à jour les choix particuliers effectués par leurs concepteurs et utilisateurs. Lorsqu'il s'agit de « synthétiser » des résultats de climatologie divers et complexes, de les traduire par quelques paramètres seulement ; lorsqu'il s'agit d'affecter une valeur particulière à un taux d'actualisation ; ou bien de quantifier les dégâts possibles de changements climatiques pour lesquels les modèles purement climatiques ne peuvent pas s'avérer affirmatifs, ce sont des systèmes de valeur qui entrent en jeu, des options politiques et économiques particulières. Ce qu'une approche historique de la modélisation devrait pouvoir apporter, c'est précisément la nécessité de prêter une attention fine et soutenue à la manière dont ces systèmes de valeur peuvent influencer sur les résultats des simulations, lesquelles jouent un rôle décisif pour façonner la décision politique.

Bibliographie

- BECKERMAN, Wilfred, *In Defense of Economic Growth*, Jonathan Cape, Londres (1974).
- BOULDING, Kenneth, « The economics of the coming spaceship earth », *Environmental Quality in a growing economy*, édité par Henry Jarrett, John Hopkins University Press, Baltimore (1966).

⁵⁹ Sterman et Booth Sweeney (2002).

- BOYD, Robert, «World Dynamics: a note», *Science*, volume 177, n° 4048, 516-19 (1972).
- BOYER, Paul, *Fallout—a historian reflects on America’s half-century encounter with nuclear weapons*, Ohio State University Press, Colombus (1998).
- BRUCE, James P., Lee Hoesung, et Haites Erik F. (éditeurs), *Climate change 1995—economic and social dimensions of climate change—contribution of working group III to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- CARSON, Rachel, *Silent Spring*, Riverside Press, Cambridge, Massachusetts, États-Unis d’Amérique (1962). Traduction française: *Printemps silencieux*, Plon, Paris (1963).
- CAZES, Bernard, *Histoire des futurs—Les figures de l’avenir de saint Augustin au xx^e siècle*, L’Harmattan, Paris (2008).
- CHASTELAND, Jean-Claude, «La croissance de la population mondiale et la communauté internationale de 1950 à nos jours», *Démographie, analyse et synthèse. VII, Histoire des idées et politiques de population*, édité par Graziella Caselli, Jacques Vallin et Guillaume Wunsch, INED, Paris (2006).
- COLE, Hugh, et Curnow Raymond, «Evaluation des modèles du monde», in *L’anti-Malthus*, édité par Hugh Cole, Seuil, Paris (1974).
- Commission des Communautés européennes, *Pour un autre modèle de développement*, La Librairie Européenne, Bruxelles (1972).
- Commission on Population Growth and the American Future, «Population and the American future—The report of the commission on population growth and the American future», consultable sur Internet à l’adresse : http://www.populationsecurity.org/rockefeller/001_population_growth_and_the_american_future.htm#TOC (1972).
- COMMONER, Barry, *The closing circle: nature, man, and technology*, Knopf, New York (1971). Traduction française: *L’encerclement*, Seuil, Paris (1972).
- DALY, Herman, «Toward a stationary-state economy», in *Patient Earth*, édité par John Harte et Robert Socolow, Holt, Rinehary and Winston, New York (1971).
- EGAN, Michael, *Barry Commoner and the science of survival—The remaking of American environmentalism*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (2007).

- EHRlich, Paul R., *The population bomb*, Ballantine Books, New York (1968). Traduction française: *La Bombe P*, Fayard, Paris (1972).
- ELICHIRIGOITY, Fernando, *Planet management—Limits to growth, computer simulation, and the emergence of global spaces*, Northwestern University Press, Evanston (1999).
- FORD, Gerald F., «Message to the Congress Transmitting Annual Report of the Council of Environmental Quality» (12 décembre 1974).
- FORRESTER, Jay W., *Industrial Dynamics*, MIT Press, Cambridge (1961).
- FORRESTER, Jay W., *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge (1971).
- GALTUNG, Johan, «The Limits to Growth'and class politics», *Journal of peace research*, n°16-17, 101-114 (1973)
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts (1971).
- HERRERA, Amilcar O., *Un monde pour tous*, Economie en liberté, PUF, Paris (1977).
- JANTSCH, Erich, *La prévision technologique*, OCDE, Paris (1967).
- JUNGK, Robert et Galtung Johan, *Mankind 2000*, Universitetforlaget, Oslo (1969).
- KAHN, Herman, et Wiener Anthony J., *The Year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years*, Macmillan, New York (1967). Traduction française: *L'an 2000*, Robert Laffont, Paris (1968).
- LE BRAS, Hervé, *Les limites de la planète*, Flammarion, Paris (1994).
- MANSHOLT, Sicco, Lettre à Franco Maria Malfatti, in *La Lettre Mansholt—Réactions et commentaires*, dossier dirigé par Jean-Claude Thill, Jean-Jacques Pauvert, Paris (1972).
- MASTERS, Dexter, et Way Katharine (éditeurs), *One world or none, A report to the public on the full meaning of the atomic bomb*, McGrawHill Book Co. (1946).
- MATARASSO, Pierre, «Evaluation intégrée et modélisation—Comment le changement climatique a transformé la conception que nous nous faisons des problèmes de décision», *Annales des Ponts et Chaussées*, n° 107-108, 73-83 (2003).
- MATARASSO, Pierre, «La construction historique des paradigmes de modélisation intégrée: William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission», in *Les modèles du futur*, édité par Amy Dahan-Dalmedico, La Découverte, Paris (2007).

- MEADOWS, Donella H. et Dennis L., Randers Jørgen, Behrens William W. III, *The limits to growth*, Universe Books, New York (1972). Traduction française complétée : *Halte à la croissance ?* Fayard, Paris (1972).
- MESAROVIC, Mihajlo, et Pestel Eduard, *Mankind at the Turning Point*, Hutchinson, Londres (1974). Traduction française : *Stratégie pour demain*, Seuil, Paris (1974).
- MOLL, Peter, *From Scarcity to Sustainability*, Peter Lang, Frankfurt am Main (1991).
- NORDHAUS, William D., «World Dynamics: Measurement without data», *The Economic Journal*, volume 83, n° 322 (1973a).
- NORDHAUS, William D., «The Allocation of energy resources», *Brookings Papers on Economic Activity*, n° 3, 529-76 (1973b).
- NORDHAUS, William D., et Tobin James, «Is growth obsolete?», in *The Measurement of Economic and Social Performance, Studies in income and wealth*, volume 38, édité par Milton Moss, NBER (1973).
- NORDHAUS, William D., «Resources as a constraint on growth», *The American Economic Review*, volume 64, n° 2, 22-26 (1974).
- NORDHAUS, William D., «Economic Growth and Climate, the Carbon Dioxide Problem», *The American Economic Review*, volume 67, n° 1, 341-46 (1977).
- NORDHAUS, William D., «An optimal transition path for controlling greenhouse gases», *Science*, vol.58, 1315-19 (1992).
- OSBORN, Fairfield, *Our plundered planet*, Little, Brown and Company, Boston (1948). Traduction française : *La planète au pillage*, Payot, Paris (1949).
- OZBEKHAN, Hasan, «Vers une théorie générale de la planification», in *Prospective et politique*, édité par Erich Jantsch, OCDE, Paris (1969).
- OZBEKHAN, Hasan, «The predicament of mankind—quest for structured responses to growing world-wide complexities and uncertainties», Club de Rome (1970). Consultable sur Internet à l'adresse <http://quergeist.net/Christakis/predicament.pdf>
- PECCEI, Aurelio, *The Chasm Ahead*, MacMillan Press, Toronto (1969).
- REICHENBACH, Raymond, et Urfer Sylvain, *La Croissance zéro*, PUF, Paris (1974).
- ROPKE, Inge, «The early history of modern ecological economics», *Ecological Economics* 5,0, 293-314 (2004).

- SIMMONS, Harvey, « Dynamique des Systèmes et technocratie », in *L'anti-Malthus*, édité par Hugh Cole, Seuil, Paris (1974).
- STAR, Susan L., Griesemer James R., « Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39 », *Social Studies of Science* 19 (4), 387-420. (1989).
- STERMAN, John D., et Booth Sweeney Linda, « Cloudy skies : assessing public understanding of global warming », *System Dynamics Review*, 18 (2) (2002).
- SYMONDS, Richard, et Carder Michael, *The United Nations and the population question*, Chatto & Windus, Londres (1973).
- SZRETER, Simon, « The idea of demographic transition and the study of fertility change : a critical intellectual story », *Population and development review* 19, n°4, 659-701 (décembre 1993).
- TINBERGEN, Ian (coordinateur), *Reshaping the International Order*, E.P. Dutton, New York (1976).
- UL HAQ, Mahbub, « The Limits to Growth—une critique », *Finances et Développement* 9, n°4, 2-8 (1972).
- VIEILLE BLANCHARD, Elodie, « Modelling the Future: an Overview of the 'Limits to Growth' Debate », *Centaurus* 52, 91-116 (2010).
- VOGT, William, *Road to survival*, William Sloane, New York (1948). Traduction française: *La faim du monde*, Hachette, Paris (1950).
- WANG, Jessica, *American science in an age of anxiety*, The University of North Carolina Press (1999).
- WARD, Barbara, et Dubos René, *Only one earth: the care and maintenance of a small planet*, A. Deutsch, Londres (1972). Traduction française: *Nous n'avons qu'une terre*, J'ai lu, Paris (1972).
- WORSTER, Donald, *Nature's economy: a history of ecological ideas*, Sierra Club Books, San Francisco (1977). Traduction française: *Les pionniers de l'écologie*, Sang de la Terre, Paris (1992).