



HAL
open science

Comment le modèle World3 a-t-il été conçu? Comment les limites sont-elles prises en compte dans le modèle?

Pierre-Yves Longaretti

► To cite this version:

Pierre-Yves Longaretti. Comment le modèle World3 a-t-il été conçu? Comment les limites sont-elles prises en compte dans le modèle?. World3 et le rapport Meadows, Les Limites à la Croissance. Questions raisonnées pour aujourd'hui, 2023. hal-04294286

HAL Id: hal-04294286

<https://hal.science/hal-04294286>

Submitted on 19 Nov 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 4.0 International License

Comment le modèle *World3* a-t-il été conçu ? Comment les limites sont-elles prises en compte dans le modèle ?

Pierre-Yves Longaretti

Introduction

L'approche systémique des problèmes sous-tend l'ensemble du modèle *World3*. Elle trouve son origine dans la « dynamique des systèmes », discipline d'analyse et de modélisation constituant le cœur de l'expertise des auteurs. Dans cette approche, la modélisation d'un système doit être suffisamment complète pour que les interactions entre ses différents éléments constituent les causes principales de son évolution future. Si ce n'est pas le cas, des interactions importantes n'ont pas été identifiées et doivent être incorporées dans le modèle pour atteindre cet objectif de complétude minimale.

On peut illustrer ce propos par un exemple simple de dynamique de population animale. Considérons la modélisation de l'évolution au cours du temps d'une population de cerfs sur une île¹. Si on ne prend en compte que le taux de fertilité naturel de la population et le taux de mortalité lié à l'espérance de vie moyenne des individus, la population va croître indéfiniment, ce qui n'est pas réaliste, même en l'absence de prédateurs, puisque l'île est isolée et ne dispose que de ressources vivrières finies et dont le taux de renouvellement est également fini. Il faut donc également incorporer dans le modèle les ressources vivrières de la population de cerfs, ainsi que les déterminants propres de l'évolution de ces ressources. Une fois étendu de cette façon, le modèle représentera donc à la fois la population et les ressources nécessaires à sa subsistance. Sans étendre le modèle, on est obligé d'introduire des hypothèses *ad hoc* sur ces ressources.

Ce genre de considération est en lien direct avec la question des conséquences de la croissance de la population humaine et de ses besoins dans un monde fini, dont l'étude constitue l'objet principal du rapport sur les limites de la croissance. Notre planète est une île pour toutes les espèces vivantes y compris l'espèce humaine. Sa *capacité de charge* (population que la planète peut supporter de façon durable) est limitée et évolutive. La difficulté de la question, par rapport à l'exemple du paragraphe précédent, est que l'humanité a la capacité d'agir sur elle-même (contrôler dans une certaine mesure ses taux de natalité et de mortalité, par exemple en limitant le nombre d'enfants par famille ou en développant des méthodes de soin augmentant l'espérance de vie) mais aussi d'agir sur la capacité de charge de la planète et notamment sur ses ressources vivrières. De fait, de nombreux processus naturels et artificiels (produits par l'action humaine) influent positivement et négativement sur la capacité de charge, et rendent le problème nettement plus complexe que dans l'exemple précédent. L'objectif du présent texte est d'explicitier comment les auteurs ont abordé ces questions dans leur modèle, tout en respectant la contrainte d'utilité décrite dans le texte sur les buts poursuivis dans leur étude.

La vision qualitative des enjeux de modélisation dynamique dans *World3*

L'exemple de l'évolution couplée de la population et de la capacité de charge du milieu permet de saisir la dimension qualitative de la construction du modèle.

L'expérience des auteurs en dynamique des systèmes et en écologie des populations leur a permis de formuler de façon simple et stylisée les différents types possibles d'évolution, et de mettre en

¹ Il s'agit d'un type de problème « canonique » en écologie des populations.

évidence qualitativement les conditions conduisant ou non à un effondrement. Ces points jouent un rôle essentiel dans la compréhension de la construction de leur modèle.

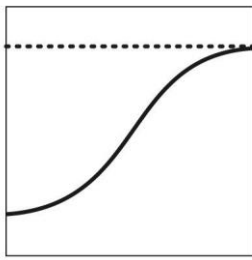


Figure 1-a

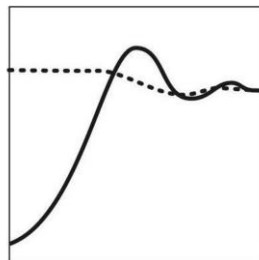


Figure 1-b

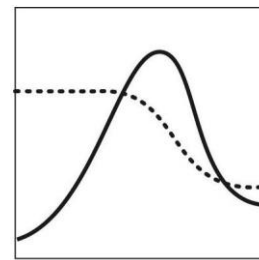


Figure 1-c

Figure 1. Evolutions qualitatives possibles de la population (trait plein) et de la capacité de charge du milieu (trait pointillé) au cours du temps².

Trois types d'évolution sont possibles (cf figure 1), sous l'hypothèse d'une croissance naturelle de la population tant qu'elle reste largement inférieure à la capacité de charge³ :

- La population croît et se stabilise de façon douce à la capacité de charge (fig. 1-a). Celle-ci est principalement contrôlée dans le modèle par la production agricole maximale.
- La population croît, dépasse la capacité de charge mais se stabilise assez rapidement vers celle-ci, éventuellement après quelques oscillations (fig. 1-b). « Assez rapidement » est défini par la dynamique de la capacité de charge elle-même. Un dépassement de capacité entraîne en général une érosion de cette capacité. Par exemple, la surexploitation des sols conduit à leur érosion, l'usage intensifs d'engrais et de pesticides conduit à leur pollution, etc, processus se traduisant à terme par une diminution des rendements des sols agricoles et donc *in fine* une diminution de production agricole. Le retour de la population à la capacité de charge est donc inévitable. La figure 1-b représente le cas de figure où la capacité de charge n'a pas le temps de s'éroder de façon significative durant la phase de dépassement de capacité.
- Si au contraire le délai de retour à cet équilibre entre population et capacité de charge est trop long, la capacité de charge s'érode plus ou moins largement pendant la période de dépassement de capacité. En fin de compte, la population ne peut que chuter au moins aussi fortement que la capacité de charge pour rejoindre l'équilibre (fig. 1-c). C'est à propos de cette troisième catégorie d'évolution que l'on parle d'effondrement dans le cadre du modèle *World3*⁴.

Dans les années 1970, la population humaine était encore assez largement inférieure à la capacité de charge de la planète, et les trois options étaient encore ouvertes. De nos jours, une variété

² D.H. Meadows, J. Randers et D.L. Meadows, *Limits to Growth – The 30-Year Update*, Chelsea Green Publishing (2004).

³ Cette hypothèse est pertinente pour l'espèce humaine, au moins sur les derniers siècles voire millénaires, ce qui est plus que largement suffisant pour la question discutée ici.

⁴ Un effondrement est donc caractérisé par une chute importante de la population, mais celle-ci peut s'étaler sur plusieurs décennies voire plusieurs siècles. D'autres définitions de la notion d'effondrement sont possibles, notamment du point de vue social et/ou civilisationnel. Voir par exemple le chapitre 1 de Middleton, G.D., *Understanding Collapse*, Cambridge University Press (2017).

d'indicateurs environnementaux témoigne du fait que nous sommes en train de dépasser – voire avons dépassé sous certains aspects – cette capacité de charge (voir plus bas la discussion de la question des limites) et seules les deux dernières possibilités (figs. 1-b et 1-c) sont pertinentes. Dans ces deux cas, le dépassement de capacité est dû aux retards de réaction : si la population réagit sans délai à l'approche de la capacité de charge, elle évolue en douceur vers celle-ci (fig. 1-a). Une fois en dépassement, la capacité de charge s'érode nécessairement sous l'effet de différentes tendances, toutes liées à l'existence de pollution et de surexploitation des ressources. Par ailleurs un retour à l'équilibre entre capacité de charge et population est inévitable : par définition, la notion de capacité de charge implique qu'un dépassement ne peut pas être durable.

On peut voir par dichotomies successives que ces trois types d'évolution couvrent l'éventail des possibilités (dépassement de la capacité de charge ou non ; dans le premier cas, érosion de la capacité de charge ou non). La différence entre l'évolution de la figure 1-a et les deux suivantes est due aux délais de réaction. Ceux-ci sont discutés dans la section suivante. On peut aussi s'interroger sur la possibilité même de dépassement de la capacité de charge. Ce point est directement lié à la nature des limites qui sous-tendent cette capacité.

De la vision qualitative au modèle

Le lien entre la structure du modèle et la vision qualitative de l'évolution couplée de la population et de la capacité de charge décrite précédemment se comprend plus facilement si on part des deux variables clés sous-tendant l'image qualitative de l'évolution : la population elle-même et la production agricole. La production agricole maximale, qui définit assez directement la capacité de charge du modèle, est liée à la façon dont les limites sont représentées dans le modèle (voir plus bas).

En remontant de proche en proche la chaîne des interactions, on peut reconstruire la logique d'élaboration du modèle. On aboutit de cette façon au cœur structurel du modèle, représenté sur la figure 2. Par exemple la production agricole totale (« denr. alim » sur la figure) est dépendante de la quantité de terres disponibles (« terres cultivées »), et des techniques agricoles (« capital agricole »), ces dernières étant liées à la part de production industrielle dévolue à l'agriculture (via la chaîne « capital industriel » - « reproduction industrielle » - « capital agricole ») et à la pollution (« pollution »), mais également de la population (via la chaîne « population » - « denrées alimentaires par tête » - « investissement agricole » - « capital agricole » - « denr. alim »). La population dépend de son côté de ses taux de natalité (« naissances par an ») et de mortalité (« décès par an »). Les taux de natalité, par exemple, sont liés au niveau de vie, donc à la production de biens (« production industrielle par tête ») et services (« services par tête »), etc. Notamment, le nombre d'enfants désiré par famille (« fécondité ») dépend en grande partie du niveau d'éducation des jeunes filles et des possibilités de contraception (« éducation et planning familial »).

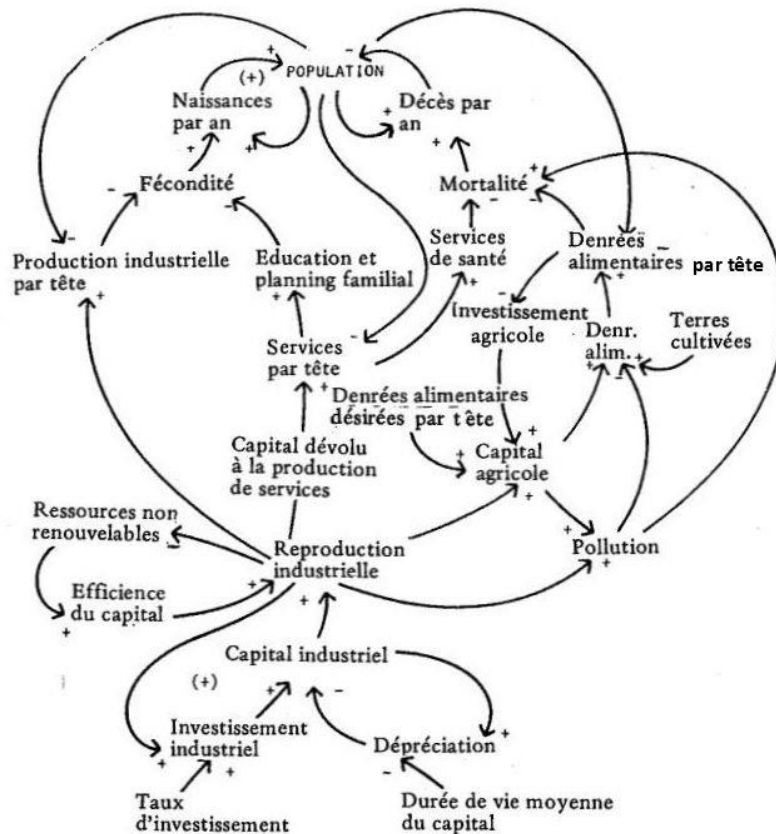


Figure 2. Structure des interactions principales dans World3⁵.

Dans ce schéma, toutes les interactions entre les quantités présentes dans le modèle ne sont pas représentées pour en faciliter la lisibilité ; de même, seule une partie des variables du modèle est incluse. Chaque flèche indique un lien causal. Les signes + et - au voisinage de la tête de chaque flèche précisent si le lien correspond à une amplification ou un amortissement : le signe + signifie que lorsque la cause (point de départ de la flèche) augmente, la conséquence (point d'arrivée de la flèche) augmente également, soit une amplification ; le signe - indique une interaction opposée (diminution de la conséquence pour une augmentation de la cause), soit un amortissement. Le sens et le signe de ces relations de causalité élémentaires contrôlent le comportement dynamique qualitatif du modèle. On peut repérer dans ce diagramme un certain nombre de « boucles de rétroaction », chacune matérialisée par une suite de flèches s'enchaînant dans le même sens et formant une boucle fermée. Parmi les plus courtes, on a, par exemple, la boucle « population – naissances par an – population ».

Le lien entre cette structure et l'image qualitative de l'évolution de la section précédente est que la structure contrôle l'évolution de la population et de la capacité de charge (pour cette dernière, via l'évolution de la capacité agricole maximale). La principale question dans ce processus est de savoir comment définir la frontière du modèle. En effet, si on n'arrête pas ce processus d'inclusion de

⁵ D.L. Meadows, W.W. Behrens III, D.H. Meadows, R.F. Naill, J. Randers, et E.K.O. Zahn, *Dynamique de la croissance dans un monde fini*, Paris : Economica (1977), p. 14. Traduit de l'anglais par François Bertault.

proche en proche, le modèle devient aussi compliqué que le monde réel, et donc inutile. Cette question de frontière du modèle est résolue : i/ en fonction de ce qui est modélisable ou non, ce qui n'est pas modélisable étant pris en compte via des scénarios ; ii/ par la contrainte de complétude systémique discutée en introduction, limitée de fait au minimum du point de vue dynamique, cette limite étant largement guidée par le choix du niveau d'agrégation du modèle.

Il manque à cette description du modèle les délais, qui jouent un rôle essentiel dans l'existence de scénarios conduisant à un effondrement. Parmi les délais importants pris en compte dans *World3*, on peut citer :

- Un certain nombre de délais structurels liés à la dynamique de la population. Par exemple, le délai d'impact des services de santé sur la population, ou encore les délais liés à l'impact de l'augmentation de la production de biens et de revenus sur la taille désirée des familles. Réciproquement, la population définit la force de travail disponible, et un délai existe entre la disponibilité de cette force de travail et son utilisation.
- Le délai entre la production de pollution persistante et l'effet de cette pollution.
- Le délai entre une possible réduction de production alimentaire et la perception de cette réduction.

Ces sources de délais existent aussi dans le monde réel mais de nombreuses autres sources du monde réel ne sont pas prises en compte dans *World3*, notamment toutes celles liées aux modalités de prise de décision de notre système institutionnel et politique. Celles-ci ne font qu'aggraver la question des délais de réaction, ce qui à son tour augmente la probabilité d'un scénario d'effondrement avec le temps qui passe. Un exemple emblématique de ce type de délai est le retard de réaction et de décision face aux émissions de gaz à effet de serre et au changement climatique.

Une des caractéristiques importantes du modèle, liée à la question de la complétude systémique évoquée en introduction, vient des choix des auteurs sur la frontière entre variables (calculées par le modèle) et paramètres (spécifiés de l'extérieur par les modélisateurs)⁶. Les paramètres sont souvent choisis pour spécifier des relations entre variables, d'où le très grand nombre de paramètres spécifiés sous forme de tables (relations graphiques entre variables du modèle).

La prise en compte des limites dans le modèle

La question des limites planétaires a d'abord été quantifiée et popularisée à travers l'empreinte écologique⁷, qui mesure le nombre d'hectares nécessaires à la production durable de ressources renouvelables et à l'absorption des émissions de gaz à effet de serre. Depuis la fin des années 2000, une version plus fine de la question des limites a été mise en avant à travers l'identification de neuf limites et la quantification d'une partie d'entre elles⁸. Ces limites entrent dans deux catégories : limites sur les ressources et limites liées aux diverses pollutions :

⁶ Par exemple, un modèle extrêmement simple de population va prendre la population comme variable, et les taux de natalité et mortalité comme paramètres, définis par le modélisateur. Un modèle plus complexe va faire dépendre les taux de natalité et mortalité de la population elle-même et donc incorporer ses taux dans la liste des variables du modèle ; les paramètres du modèle définiront alors les liens entre population et taux de natalité et de mortalité. Le modèle *World3* quant à lui propose une modélisation beaucoup plus complexe pour définir les taux de mortalité et de natalité.

⁷ Le *Global Footprint Network* est en charge des évolutions méthodologiques de calcul de l'empreinte écologique (<https://www.footprintnetwork.org/>). Le *WWF*, membre de ce réseau, publie chaque année un atlas de l'empreinte écologique des différents pays (<https://www.footprintnetwork.org/living-planet-report/>).

⁸ Rockström *et al*, A safe operating space for humanity, *Nature*, 461:472-475. Cet article a été complété par un article technique plus complet la même année, puis par deux autres articles en 2015 et 2018.

- Limites sur les ressources
 - Erosion de la biodiversité
 - Modification des usages et de la couverture des sols⁹
 - Utilisation d'eau douce
 - Perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore
- Limites liées aux pollutions
 - Changement climatique
 - Acidification des océans
 - Aérosols atmosphériques
 - Diminution de la couche d'ozone
 - Pollution chimique

Les limites sur les ressources sont très largement liées à l'agriculture et à l'élevage. Les limites sur les pollutions, à l'ensemble des activités économiques (agriculture et élevage, industrie et services, commerce, tourisme). Les pollutions sont de façon générale moins bien connues que les ressources.

Une seconde façon de catégoriser les limites est de distinguer les limites de *stock* et les limites de *flux*. Un stock est une quantité (matière, énergie) et un flux est une variation au cours du temps d'un stock. Si on considère par exemple la quantité de bois d'une forêt, il s'agit d'un stock¹⁰. Les flux sont, typiquement, le rythme annuel de croissance de la forêt (flux entrant) et le taux de mortalité naturelle de la forêt ou les coupes et prélèvements annuels effectués par l'activité humaine (pâte à papier, bois d'œuvre, bois de chauffage). De fait tout modèle dynamique vise aussi à modéliser les stocks et les flux d'un système donné, et *World3* ne fait pas exception.

La plupart des limites planétaires définies et citées précédemment sont des limites de flux. Il s'agit, par exemple dans le cas du changement climatique, de la quantité de gaz à effet de serre maximale que l'on peut relâcher dans l'atmosphère chaque année sans augmenter la température moyenne de la planète, ou, dans le cas de la biodiversité, le rythme de disparition des espèces.

World3 prend en compte des limites de stock et de flux, à un niveau moins détaillé que l'étude des limites planétaires, mais en incluant réciproquement des limites non prises en compte dans les limites planétaires. Les limites de stock sont les quantités maximales de terres arables et de ressources non renouvelables exploitables (telles que les énergies fossiles ou les métaux), les limites de flux sont la production agricole annuelle maximale et le taux maximal d'assimilation par l'environnement de la pollution persistante. Un autre phénomène que l'on peut associer aux limites est pris en compte dans *World3* : les rendements décroissants des ressources non renouvelables. Ceux-ci sont liés au fait que l'on exploite en priorité les ressources de meilleure qualité (minerais les plus concentrés en métaux par exemple), ce qui entraîne à terme un accroissement permanent de l'effort nécessaire pour maintenir la production annuelle de ces ressources. Au bout du compte, cet accroissement de l'effort peut devenir insoutenable pour l'ensemble de la société. Cette logique de rendements décroissants est à l'œuvre dans le monde réel, par exemple pour les ressources

⁹ La couverture des sols fait référence au type de couvert : forêt, prairies, déserts, glaces, etc. Les usages sont en lien avec l'activité humaine, principalement via les différents types de cultures pratiquées, mais incluent aussi toutes les surfaces artificialisées (habitat, zones commerciales, routes, aéroports, etc).

¹⁰ Une forêt n'est évidemment pas réductible à un stock de bois.

pétrolières¹¹, ou va commencer à se faire sentir dans le futur proche pour certains métaux, notamment le cuivre¹².

Cette distinction entre limites de stock et de flux permet de comprendre pourquoi certaines limites peuvent être dépassées, et il s'agit systématiquement de limites de flux. Pour reprendre l'exemple de la forêt, on peut dépasser la limite de flux de prélèvements annuels (définie par le rythme annuel de régénération de la forêt suite à une coupe), mais c'est au détriment du stock de bois dans la forêt, qui se met alors à diminuer. Cette situation de dépassement de la limite de flux est non durable, puisque la limite de stock ne peut pas être franchie : une fois toute la forêt coupée, on ne peut plus couper de bois, il faut attendre que la forêt se régénère, si c'est possible¹³. Dans le cas de *World3*, le dépassement de la capacité de charge se fait par dépassement de la production agricole maximale durable, ce qui se passe, par exemple, si la production est forcée au-delà du seuil permettant le maintien de la qualité des sols ; si le processus est poursuivi trop longtemps, la dégradation des sols devient trop sévère et entraîne l'arrêt de toute production agricole.

Adéquation entre niveau d'agrégation et objectifs du modèle

Le terme d'agrégation porte sur la précision sectorielle et géographique du modèle (plus le modèle est agrégé sur ces deux plans, moins il est quantitativement précis). Le premier déterminant du niveau d'agrégation est le type de question posée. Dans leur catégorisation des types de question possibles, *World3* vise une modélisation imprécise et conditionnelle : si tel scénario est adopté, quelles en sont les conséquences ? L'imprécision est dans la nature qualitative plutôt que quantitative de ces conséquences analysées et dans le fait que les variables sont représentées de façon semi-quantitative¹⁴.

Un autre facteur important dans le choix du niveau d'agrégation est l'horizon de temps exploré. L'horizon de projection de *World3* est de l'ordre de la centaine d'années, soit 2 ou 3 générations humaines (et donc de fait quelques temps caractéristiques du modèle). C'est un horizon en fait court, mais où le système a malgré tout le temps de s'éloigner de projections tendanciennes sans pour autant qu'il soit nécessaire de faire une modélisation précise pour obtenir un comportement qualitativement correct et réaliste. Par exemple, c'est un horizon de temps suffisamment court pour que les déterminants sociaux du taux de natalité (comme le niveau de vie) puissent être considéré comme constants, et correctement déterminés à partir des données historiques stylisées, sans avoir à modéliser les causes de ces déterminants ; la stylisation dégagera les tendances principales, et le système n'aura pas le temps de s'écarter de celles-ci de façon significative sur l'horizon de temps des simulations (la fin du XXI^{ème} siècle). Cette remarque vaut pour de nombreux éléments de modélisation adoptés dans *World3*.

Ce même point sur l'horizon de temps limite les phénomènes pertinents à incorporer, à savoir ceux se déroulant sur des temps caractéristiques de 20 à 200 ans. Outre l'argumentaire présenté plus haut sur le lien entre vision qualitative et structure du modèle, cette considération sur les échelles de temps définit la liste des éléments pertinents à inclure dans le modèle. Ces éléments importants sont de deux types :

¹¹ Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D., Prados, E. 2021. Peak oil and the low-carbon energy transition: a net-energy perspective. *Applied Energy*, 304:117643.

¹² Vidal, O. 2018. *Matières premières et énergie : les enjeux de demain*. ISTE Editions.

¹³ Une forêt ne se régénère pas nécessairement d'elle-même une fois complètement coupée, par exemple si les sols s'assèchent et/ou s'érodent sévèrement suite à la coupe, et avant que la forêt ne repousse.

¹⁴ Ce point est discuté plus en détail dans la notice sur les buts du modèle.

- Éléments structurels (à savoir ceux qui interviennent dans les boucles de rétroaction, et au premier chef ces boucles elles-mêmes)
- Paramètres qui permettent de calculer les effets de ces boucles de rétroaction et donc l'évolution de la totalité du système.

Ces considérations, conjuguées aux principes d'élaboration de proche en proche présenté dans la section précédente, permettent d'arriver aux cinq secteurs représentés dans le modèle (population, production industrielle, production agricole, ressources non renouvelables et pollution). La question de l'agrégation se transforme alors en deux sous-questions :

- Quel niveau de détail pour chacun de ces secteurs ?
- Quel niveau de détail sur d'autres plans, notamment géographique (régions du monde ?) ou sociaux (classes sociales ?)

Le principe directeur à ce stade est de ne désagréger que si ça apporte un comportement dynamique qualitativement différent. Par exemple, les ressources non renouvelables ne sont pas distinguées entre combustibles fossiles d'un côté et ressources minières de l'autre (ou en plusieurs types de ressources minières) parce que le comportement qualitatif de ces différents types de ressources est le même au cours du temps (épuisement et rendements décroissants de la ressource à terme même en tenant compte du progrès technologique). Désagréger géographiquement va multiplier le besoin en données sans pour autant introduire une différence qualitativement essentielle pour la question posée. De même distinguer les pays développés et en développement ne change pas la nature et les déterminants de la production industrielle et agricole, par exemple, ou les déterminants de l'évolution démographique, bien que pays industrialisés et en développement aient des dynamiques démographiques très différentes. Pour la même raison, le comportement d'un seul type de polluant est suffisant pour avoir une idée qualitative de l'influence de la pollution sur la capacité de charge et sur la santé humaine, etc.

En fait, deux considérations sous-jacentes sont essentielles ici : le fait que la question posée est conditionnelle à un scénario et que cette question est très qualitative ; et le fait que le modèle doit rester compréhensible, et donc utile au sens défini par les auteurs (cf notice sur les buts du modèle).

Conclusion

Le modèle *World3* est un exemple relativement unique de modélisation combinant un niveau conséquent de sophistication dans les choix de modélisation, tout en maintenant un niveau de complexité globale intermédiaire. Ce niveau de complexité fait que ce modèle reste compréhensible, avec certes un effort certain mais limité dans le temps pour un lecteur motivé. Par ailleurs, la sophistication de la réflexion mobilisée, qui relève tout autant de la pensée scientifique théorique que d'une forme d'empirisme dans les choix de modélisation nourrie par l'expérience des auteurs, a abouti à un modèle qui non seulement reste pertinent un demi-siècle après son élaboration, mais dont la pertinence et l'audience croissent au cours du temps après une (longue) période de critique mal motivée et de quasi-oubli. Peu de modèles peuvent prétendre à une telle longévité et un tel succès.