

Vivre les dynamiques planétaires avec Pydynamo

Achille BAUCHER, Romain COUILLET

INRIA POLARIS, Laboratoire d'Informatique de Grenoble

700 avenue centrale, 38400 Saint-Martin d'Hères

achille.baucher@inria.fr, romain.couillet@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé – Il y a 50 ans, les premiers débats sur la notion de limites planétaires à la croissance économique ont fait leur apparition sur la scène internationale, à travers le prisme de la publication des *Limits To Growth*. Nous en explorons ici les concepts les plus importants grâce à une implémentation pédagogique et conviviale du modèle World3.

Abstract – 50 years ago, the notion of global boundaries to economic growth emerged on international debates, through the publication of *The Limits To Growth*. Thanks to a convivial and pedagogic implementation we developed, we explore here some of the most important underlying concepts of the World3 model.

1 Introduction

Pourquoi la croissance économique aurait-elle besoin de limites ? Parce que croître, cela signifie croître matériellement, et que la planète est matériellement limitée: c'est la réponse que proposent en 1972 les auteur·e·s de [5]. Pour le prouver, iels s'appuient sur des multitudes d'études scientifiques pour condenser les dynamiques du monde industrialisé et de l'environnement en une 150aine d'équations. Celles-ci forment le modèle World3, qui est ensuite réécrit dans un langage informatique pour exécuter des simulations. Les résultats servent alors d'illustration au message principal: le monde industrialisé doit fixer lui-même des limites à sa croissance pour éviter un effondrement subi.

Les auteur·e·s ne remettent pas en question le bien-fondé de la croissance ou du capitalisme industriel en soit, qui sont considérés comme bénéfiques pour l'humanité. Le problème est réduit à ses enjeux environnementaux: une relation entre l'humanité, homogène, qui interagit en consommant et en dégradant, avec l'environnement, qui à son tour impacte l'activité humaine. Le modèle tente de reproduire les mécanismes que les auteur·e·s observent au long du développement du monde industriel au 20ème siècle. Pour élaborer différents *scénarios*, certains changements dans ces mécanismes sont introduits à partir d'une certaine date, marquant l'application immédiate et homogène d'une nouvelle politique.

Absence de considérations politiques et sociales, vision coloniale d'un développement bénéfique pour l'humanité entière, réduction de l'écologie à un problème environnemental, les critiques ne manquent pas au sujet des choix de modélisation. Cependant, tout en les gardant en tête, de nombreux concepts essentiels sont expliqués et soulignés par le modèle World3: la complexité d'un système holistique, la croissance et l'impact écologique, la

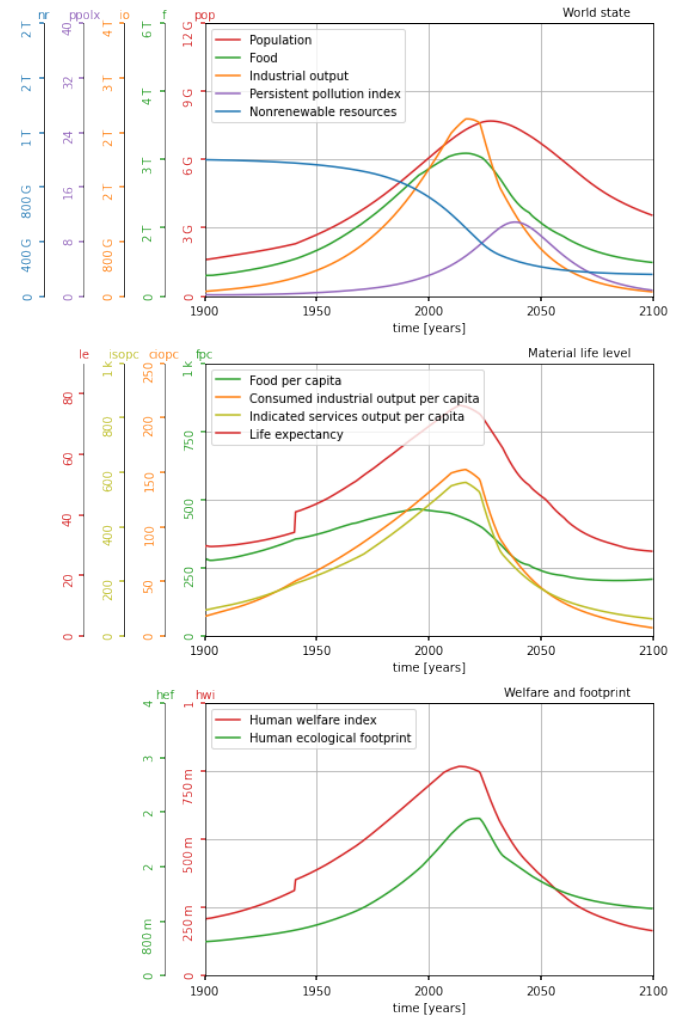


FIG. 1: Scénario par défaut du modèle World3.

diversité des limites planétaires. L’immense travail de rassemblement d’observations empiriques permet de les rendre concrets, et la possibilité d’effectuer des simulations informatiques permet à la fois d’illustrer ces concepts, d’explorer des alternatives et de sensibiliser.

Cependant, les implémentations existantes du modèle n’étaient pas assez accessibles et manipulables pour vivre par soi-même les dynamiques planétaires. Motivé par cet enjeu, nous avons développé un module Python, Pydynamo¹, qui permet de simuler, de modifier et de rendre graphiquement compte des résultats du modèle World3. Ce module se veut le plus accessible et transparent possible, et vise à servir de support pédagogique (tel que travaux pratiques) et de sensibilisation conviviale. Après avoir introduit les mécanismes les plus importants de World3, nous explorons dans cet article quelques enseignements que nous pouvons retirer des manipulations effectuées avec Pydynamo.

2 La croissance et l’effondrement

En modifiant de différentes manières les paramètres du modèle, les auteur·e·s de *Limits To Growth* ont produit diverses simulations, appelées *scénarios*. La plupart d’entre eux montrent, comme illustré sur la figure 1, d’abord une période de croissance, puis un effondrement. Le mécanisme dominant les principales dynamiques du système dans ces deux périodes provient en fait de la même boucle de rétroaction positive. Illustrée sur la figure 2, elle lie le capital, les investissements et la production industrielle. Le capital industriel **IC** croît avec les investissements **ICIR**, proportionnels au produit industriel **IO**, à son tour proportionnel au capital **IC**. Cette boucle de renforcement mutuel provoque une dynamique exponentielle.

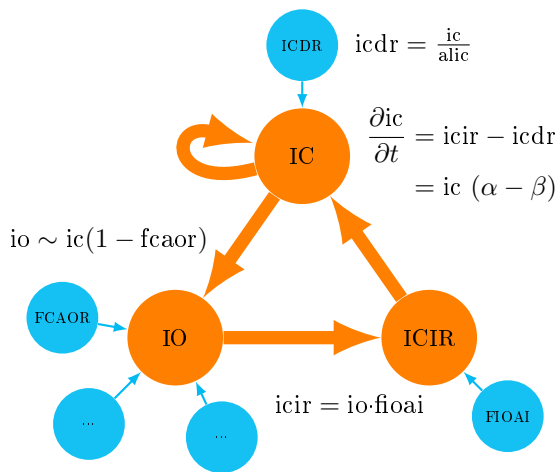


FIG. 2: Boucle de rétroaction positive de l’industrie en orange, avec ses influences extérieures en bleu.

¹gitlab.inria.fr/abaucher/pydynamo

En effet, si on réécrit la boucle au sein d’une même équation, on obtient $\frac{\partial ic}{\partial t} = ic(\alpha - \beta)$, avec α un terme de reproduction et β de dépréciation. La proportionnalité entre **IC** et sa dérivée induit le caractère exponentiel de la dynamique. Le terme α peut être ici fragilisé par des influences telles que la pollution, la difficulté d’obtenir des ressources, etc. Quant à β , constant, il est l’inverse de la durée de vie **alic** du capital industriel, et proportionnel au rythme **icdr** de la dépréciation du capital industriel.

Ainsi, lorsque la reproduction α est plus grande que la dépréciation β , la boucle industrielle croît exponentiellement. Quand cette différence s’inverse, l’industrie s’effondre au même rythme. Le basculement est provoqué lorsque l’une des limites planétaires, qui varie selon les scénarios, atteint un seuil critique.

3 Limites planétaires

Mais quelles sont alors les facteurs qui affaiblissent la reproduction du capital industriel ? Ils sont en fait diversifiés et se manifestent ou non selon le scénario choisi.

Ressources: La pénurie de ressources est la cause de l’effondrement du scénario par défaut. À mesure que les ressources non renouvelables se raréfient, la fraction **fcaor** de capital à allouer pour les obtenir augmente, avec un effet de seuil illustré sur la figure 3. La production devient alors insuffisante, ce qui enclenche la boucle d’effondrement.

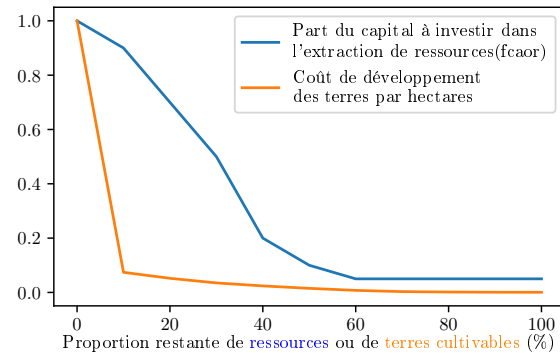


FIG. 3: Non linéarités pour deux variables de World3.

Pollution: Le deuxième scénario de [5] est obtenu en augmentant le stock de ressources disponibles et la facilité à les obtenir. Passée cette difficulté, c’est la pollution qui explose alors et réduit le rendement des terres agricoles. Les investissements sont alors redirigés vers l’agriculture, se substituant à la part auparavant allouée au capital industriel, **fioai**. Cette baisse des investissements industriels dépasse ainsi le point de bascule.

Terres cultivables: La difficulté de la pollution est évacuée dans le troisième scénario de [5] par des amélio-

rations technologiques réduisant la pollution. Les terres agricoles continuent alors de croître, jusqu'à ce que leur rareté provoque une explosion du coût de développement des terres. C'est cette puissante non-linéarité, observable dans la figure 3, qui absorbe comme précédemment les investissements du capital industriel.

Érosion: La solution pour le quatrième scénario consiste alors à augmenter drastiquement les rendements grâce à la technologie. La croissance des intrants agricoles renforce alors la pression sur les terres cultivées, qui s'érodent et finissent par entraver le rendement agricole.

Technologie: Le premier point sur lequel les auteur·e·s et critiques se sont focalisé·e·s pour espérer préserver la croissance est la technologie [1]. Les changements technologiques sont modélisés comme un progrès qui, démarré à une certaine date, s'améliore exponentiellement tant qu'il y en a besoin. Ce progrès a ensuite, avec un léger délai, une influence uniquement améliorative sur un certain aspect du système. Par exemple, tant que l'indice de pollution est plus grand qu'une valeur de référence, la technologie de dépollution s'améliore exponentiellement, et ce, indépendamment des autres circonstances. Cette technologie est convertie progressivement, avec un délai de 20 ans, en un facteur de dépollution, qui réduit gratuitement toute génération de pollution. Malgré cet optimisme technologique (la réalisabilité physique et socio-technique, les effets rebonds ne sont pas pris en compte), les scénarios ne parviennent pas à éviter un effondrement qui survient alors parfois encore plus brutalement.

Le problème commun: Ces multiples impasses sont en fait réductibles à une conclusion simple: la croissance de l'industrie est matérielle et la planète est matériellement limitée. Si l'existence de ces limites a fait débat dans le passé, elles font aujourd'hui consensus. De nombreuses ressources commencent à manifester leur rareté et un coût d'obtention en hausse; la baisse des taux de retour énergétique du pétrole en témoigne [8]. Les impacts de diverses pollutions sont depuis longtemps palpables, et ceux du changement climatique s'annoncent encore plus importants. Les rendements agricoles ont déjà saturé pour commencer à baisser [7]. Il est à présent reconnu que la croissance matérielle se heurte déjà à ses limites, et le rythme d'extraction et de pollution dépasse depuis quarante ans la capacité de charge de la planète [9].

Ainsi, malgré la confiance dans le bien-fondé de la croissance que manifestent les auteur·e·s (qui sont, en tant qu'élite intellectuelle et financière occidentale [1], les principales bénéficiaires d'un modèle de développement s'avérant destructeur pour d'autres [3]), le verdict est sans appel: le modèle de croissance que nous avons connu le long du 20ème siècle est voué à son effondrement.

Les solutions de stabilisation apportées par les auteur·e·s sont principalement d'ordre gestionnaire et technique. C'est entre autres pour y proposer d'autres analyses et imaginaires que nous avons développé Pydynamo.

4 La décroissance avec Pydynamo

Le modèle était originalement implémenté avec le langage DYNAMO, vieux de 50 ans et inutilisable aujourd'hui. Les autres implémentations sont soit payantes, soit insuffisamment personnalisables². Nous avons converti le code DYNAMO dans une syntaxe plus lisible et accessible à une habitué·e de Python. Ensuite, nous avons développé le module Pydynamo qui permet de manipuler et de modifier simplement le modèle, grâce à des fonctions qui ajoutent de nouvelles politiques ou équations afin de simuler des scénarios personnalisés. Cet outil, accompagné d'une documentation interactive, vise à permettre à des élèves ou curieux·ses d'explorer et de s'appropriier le modèle, comme avec l'expérience que nous présentons dans cette partie.

La décroissance n'est jamais envisagée par les auteur·e·s des *Limits To Growth*, mais iels concluent tout de même en 2005 que si des mesures drastiques ne sont pas prises assez tôt, une simple stabilisation de l'industrie ne sera plus suffisante pour éviter un effondrement. En effet, tout supplément d'augmentation de l'empreinte écologique (via la population et l'industrie) et d'accumulation de la pollution implique une compensation nécessaire. Par ailleurs, de nombreuses propositions d'une réduction progressive de la production et de la consommation énergétique [2] font aujourd'hui écho à ce constat vieux de 50 ans. Afin de mieux comprendre ce que signifierait une telle mesure via l'approche systémique globale de World3, nous avons conçu une séance de travaux pratiques pour amener les utilisateur·e·s à implémenter, analyser et compléter un scénario de décroissance avec le module Pydynamo.

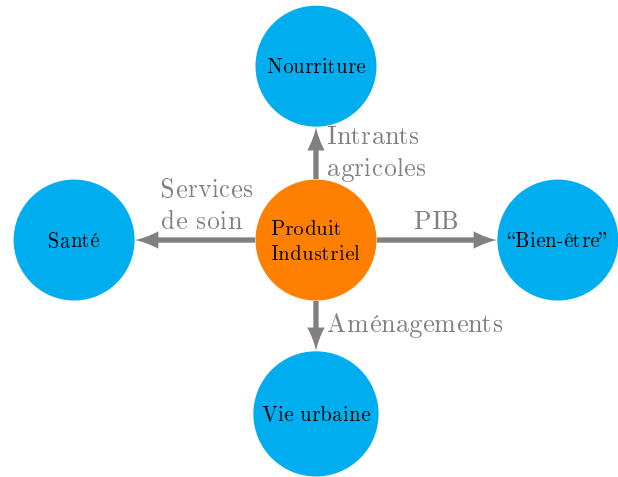


FIG. 4: Dépendances au produit industriel dans World3.

Sans autres hypothèses, une décroissance du produit industriel de 5% par an provoque dans le modèle un effondrement de l'espérance de vie, de la nourriture et du "bien-être". La cause de cette chute est la place cen-

²C'était le cas du module Pyworld3 (github.com/cvanwynsberghe/pyworld3), qui a servi de base à nos travaux

trale qu’occupe l’industrie dans le modèle, comme on le voit dans la figure 4. L’objectif de la séance est alors d’implémenter les alternatives adéquates pour éviter ces effets néfastes.

Agro-écologie: Dans le modèle original, les rendements agricoles sont dépendants des intrants agricoles, qui proviennent de l’industrie. Le premier exercice consiste à implémenter une politique d’agro-écologie, qui émancipe la production des intrants extérieurs, afin d’éviter la chute de nourriture lors de la décroissance de l’industrie. Cependant, cette modification seule ne suffit pas, car survient alors le problème de la disparition des terres cultivables à cause de l’érosion agricole. Pour remédier à cette autre limite, il est aussi demandé de retirer l’influence néfaste des cultures sur l’érosion. La nourriture ne semble alors plus poser de problème, mais cela ne suffit pas à faire remonter l’espérance de vie.

Santé autonome: En effet, l’espérance de vie est conditionnée dans le modèle aux services de santé, qui dépendent à leur tour directement de la production industrielle. En s’appuyant sur l’idée que des pratiques simples et autonomes peuvent être des points clés pour assurer à tou-te-s une bonne santé [4], les utilisateur-e-s sont amené-e-s à proposer une autre relation entre santé et production de services, qui réduirait leur dépendance.

Économie symbiotique: Mais persiste cependant une hausse de la mortalité que les utilisateur-e-s sont invité-e-s à investiguer. On découvre alors que le modèle suppose qu’il faut disposer d’une industrie suffisamment développée pour pouvoir aménager des espaces urbains vivables. Pour pallier cette dépendance, des solutions (désignées par exemple sous le terme d’économie symbiotique [6]) consistent à utiliser la capacité régénérative des écosystèmes naturels, qui peuvent assurer par exemple les fonctions de filtration et de dépollution. Ce type de proposition, implémenté en faisant disparaître la dépendance qui liait mortalité en ville et produit industriel, permet alors d’éviter à l’espérance de vie de chuter.

Bien-être: L’application conjointe de ces alternatives, auxquelles on ajoute une politique de natalité qui stabilise la population, conduit finalement la simulation à éviter un effondrement. Néanmoins, le “bien-être”, directement calculé dans le modèle à partir de mesures dépendantes de l’industrie (le PIB par exemple), chute toujours. Dans une perspective de décroissance, cette notion devrait être refondée sur d’autres critères, d’épanouissement, de justice, de convivialité, des aspects absents de World3.

L’aboutissement de l’exercice n’est pas de proposer un programme de solutions, ni une prédiction de ses effets. L’intérêt est qu’à travers la compréhension du modèle et la rencontre des différentes limites, l’utilisateur-e fait l’expérience concrète d’un système global où tous les secteurs interagissent ensemble. Ainsi, cette expérience nous enseigne que l’enjeu n’est pas de mettre en œuvre des solutions techniques isolées, mais de transformer en

profondeur les modes de production et de vie présents dans le modèle World3, qui reflètent les mécanismes du capitalisme industriel.

5 Conclusion

Nous avons développé un outil convivial qui redonne de la maîtrise aux utilisateur-e-s sur la compréhension et la manipulation des dynamiques de la planète. Par rapport à une lecture passive du livre *The Limits To Growth*, et des annexes techniques accessibles aux seul-es expert-e-s, le module Pydynamo rend facilement appropriables les concepts principaux du modèle. L’aspect interactif favorise l’intelligence collective et l’immersion. Enfin l’autonomie dont disposent les utilisateur-e-s leur permet d’implémenter leurs propres propositions et d’exercer leur esprit critique.

World3 ne reste qu’un modèle, grossier et discutable. L’exercice immersif proposé met néanmoins indirectement en exergue les limites de nos pratiques scientifiques *en silo* et la nécessité d’épouser une approche au contraire *systémique* pour penser les questions écologiques et sociales.

References

- [1] Élodie Vieille Blanchard. *Les limites à la croissance dans un monde global - Modélisations, prospectives, réfutations*. phdthesis, EHESS, June 2011.
- [2] François Briens. *La Décroissance au prisme de la modélisation prospective : Exploration macroéconomique d’une alternative paradigmatique*. phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2015.
- [3] Malcom Ferdinand. *Une écologie décoloniale: Penser l’écologie depuis le monde caribéen*. Éditions du Seuil, 2019.
- [4] Ivan Illich. *Némésis médicale. L’expropriation de la santé*. Points, 1975.
- [5] Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, Kaïm El Agnès, Jean-Marc Jancovici, and Donella H. Meadows. *Les Limites À la croissance (dans un monde fini): Le rapport meadows, 30 ans après*. L’écopoche, 2017.
- [6] Présages. *Présages #2 - Isabelle Delannoy : économie symbiotique et collapsologie*, 2018.
- [7] Reporterre. <https://reporterre.net/L-agriculture-mondiale-va-etre>.
- [8] Hugo Tremblay. Le rendement énergétique net : principe cardinal d’une politique québécoise à l’égard des hydrocarbures. *Globe : revue internationale d’études québécoises*, 16(2), 2013.
- [9] Mathis Wackernagel. Ecological footprint and appropriated carrying capacity : a tool for planning toward sustainability. In *University of British Columbia*, 1994.