



Comment modéliser l'avenir de notre planète ?

Guide de l'enseignant

Kilian Rouge, Julia Péré, Gabriele Dabbaghian
Défis de Sciences

Mai 2025

Ce guide de l'enseignant vise à vous présenter les éléments essentiels du fonctionnement du modèle World3 et de l'implémentation qui en a été faite dans la version mise à disposition des élèves. Nous insistons en particulier sur les interprétations pouvant être faites de chacun des scénarios et des conclusions à tirer de l'activité.

Lien vers le modèle

Table des matières

A Présentation de World3	2
A.1 Limites physiques	2
A.2 Fonctionnement de World3	2
B Analyse des scénarios	3
B.1 Scénario 1 : Business as usual	3
B.2 Scénario 2 : Doublons le stock de ressources fossiles	3
B.3 Scénario 3 : Technologies de dépollution	4
B.4 Scénario 4 : Amélioration des rendements agricoles	4
B.5 Scénario 5 : Mieux préserver les sols	5
B.6 Scénario 6 : Efficacité technologique	5
B.7 Scénario 7 : Sobriété	6
B.8 Scénario 8 : Efficacité technologique + Sobriété	7
B.9 Scénarios 9 & 10 : Agir plus ou moins vite	7
C Quelques éléments d'analyse	8
C.1 Quelles conclusions tirées pour l'action environnementale	8
C.2 Quelques remarques	8
C.3 Ressources pour aller plus loin	9

A Présentation de World3

A.1 Limites physiques

Dans un environnement fini, une économie en croissance exponentielle se heurtant à des limites du système physique ne peut plus répondre normalement. La croissance exponentielle signifie que les quantités (population, consommation, production) doublent à intervalle régulier, ce qui devient rapidement insoutenable face à des ressources limitées.

Dans World3 ces limites sont les suivantes :

- **Surface agricole cultivable** : Limitée par l'érosion des sols (intensifiée par les pratiques agricoles intensives) et l'urbanisation (expansion des villes et infrastructures). Ces deux phénomènes réduisent irréversiblement la surface disponible pour l'agriculture.
- **Fertilité des sols** : Dégradée par la pollution (pesticides, métaux lourds, acidification), par le labour intensif et la monoculture. Une fois dégradée, la régénération peut prendre des décennies.
- **Rendements agricoles** : Augmentés par l'utilisation de fertilisants, de l'irrigation et des technologies agricoles, mais ces améliorations suivent une courbe de rendements décroissants et atteignent des limites biophysiques.
- **Ressources fossiles** : Elles existent en quantité limitée et suivent une courbe d'extraction où les gisements les plus accessibles sont exploités en premier. Les ressources restantes nécessitent un investissement énergétique et financier croissant (pétrole de schiste, sables bitumineux, etc.).
- **Capacité de séquestration de pollution** : Elle dépend grandement des substances considérées - certaines comme le CO₂ ont des cycles longs, d'autres comme les plastiques peuvent persister des centaines d'années. Les écosystèmes peuvent absorber une certaine quantité de polluants avant d'être saturés.

Ce modèle ne prend pas en compte de nombreuses limites sociales comme les inégalités économiques, les conflits pour les ressources, les migrations climatiques ou les résistances au changement qui pourraient également contraindre le développement humain.

A.2 Fonctionnement de World3

World3 est un modèle informatique développé dans les années 1970 pour le rapport "Limits to Growth" (Les Limites à la croissance) du Club de Rome. Il permet de calculer l'interaction entre des centaines de variables interdépendantes à travers de nombreuses boucles de rétroaction, positives et négatives.

À intervalle de six mois entre 1900 et 2100, le modèle recalcule l'interaction entre ces variables à partir de leur état initial en début de période. Pour faciliter la compréhension, nous ne représentons qu'une toute petite partie de ces variables que nous avons regroupées en trois groupes :

1. **État du monde** - Ces variables décrivent l'état physique de notre planète :
 - Population mondiale et sa structure par âge
 - Niveau de pollution persistante
 - Surface de terres arables disponibles
 - Ressources non-renouvelables restantes
 - Part du capital utilisé pour l'extraction de ressources

- Terres arables
2. **Niveau de vie matériel** - Ces variables mesurent l'activité économique :
 - Production industrielle par personne
 - Production agricole par personne
 - Services par personne
 - Biens de consommation par personne
 3. **Bien être humain et empreinte écologique** - Ces variables tentent de saisir le bien être des populations et l'impact sur l'environnement :
 - Indice de développement humain (IDH)
 - Empreinte écologique par habitant
 - Taux de mortalité par famine
 - Taux de mortalité par pollution

B Analyse des scénarios

B.1 Scénario 1 : Business as usual

Dans ce scénario tous les paramètres sont calibrés sur des valeurs réalistes de l'évolution de notre monde au cours du 20e siècle.

Ce monde simulé tente de faire passer tous les peuples par la transition démographique et de les faire entrer dans une économie industrielle prospère. Le monde du scénario 1 se dote de soins de santé et d'un contrôle des naissances généralisés à mesure que le secteur des services se développe ; il applique davantage d'intrants agricoles et obtient des rendements plus élevés à mesure que le secteur agricole se développe ; il émet davantage de polluants, demande davantage de ressources non renouvelables et devient capable d'une production plus importante à mesure que le secteur industriel se développe.

Dans ce scénario on observe autour des années 2020 un pic de production industrielle avant une forte baisse de tous les paramètres clés (population, consommation, IDH, ...). Ceci est dû à une augmentation du coût des ressources fossiles quand celles-ci se raréfient (au rythme de croissance à ce moment il ne reste en fait que 30 années de ressources). L'ensemble du capital est redirigé vers l'extraction de ressources (*Voir courbe part du capital dans l'obtention de ressources*) ne laissant plus d'investissements pour les secteurs agricoles et industriels. Celui-ci se déprécie plus vite qu'il n'est remplacé si bien qu'on ne peut plus produire. Le problème ici est donc clairement les **ressources disponibles** pour l'économie.

B.2 Scénario 2 : Doublons le stock de ressources fossiles

- ✓ Cocher "Doubler le stock de ressources fossiles"

Le scénario est calibré de la même manière que précédemment mais pour résoudre le problème de disponibilité des ressources **on essaye de voir ce qu'il se passerait si le stock initial était**

doublé et que nous disposions de technologies d'extraction plus efficaces. Ceci n'est pas complètement irréaliste car des incertitudes (bien que pas de cet ordre) subsistent. Cela pourrait également revenir à dire que l'on arrive finalement à avoir accès aux ressources plus facilement que prévu.

Cette fois ci la dépletion des ressources se produit plus tard ce qui permet de soutenir une croissance exponentielle plus longtemps. On observe une production industrielle bien plus importante. Cependant la croissance accélérée entraîne avec elle une pollution énorme (*Voir courbe pollution*) (du fait d'une augmentation de la production et d'une capacité de séquestration affaiblie). La pollution impacte considérablement la fertilité des sols (malgré des investissements importants pour y remédier). Les rendements et la production agricole chutent autour de 2030 entraînant une famine importante (*Voir courbe production alimentaire et Alimentation par personne*). La réallocation des capitaux vers le secteur agricole cause la fin de la production industrielle. Le problème ici est donc un problème de **pollution**.

→ *Comment cela pourrait-il se produire dans le monde réel ? : Polluants éternels, couche d'ozone, métaux lourds, ...*

B.3 Scénario 3 : Technologies de dépollution

Manipulation

- ✓ Cocher “Doubler le stock de ressources fossiles”
- ✓ Cocher “Investir dans une technologie de dépollution industrielle”

Année d'application des politiques : 2025

Nous gardons l'hypothèse de plus de ressources disponibles plus facilement (En pratique 150 années de ressources fossiles au rythme de 2000). Le scénario 2 est donc le nouveau scénario de référence.

Pour contrer les problématiques de pollution du scénario 2 nous décidons en 2025 d'**investir dans des technologies de dépollution industrielle** (pour 20% de notre capital nous pouvons réduire 95% des émissions d'ici 2100).

La dépollution n'est pas immédiate car nous continuons notre croissance exponentielle de la production et les polluants persistent pour quelques années. Nous arrivons néanmoins à contenir la pollution aux alentour des années 2060 (*Voir courbe pollution*).

Malgré les efforts de dépollution, la pollution accumulée jusqu'en 2025 (date à laquelle nous commençons les efforts) impacte la fertilité des sols. Au début cela ne pose pas problème car nous allouons simplement plus de capitaux pour la même production agricole mais avec l'augmentation de la population cela ne suffit plus. Nous avons donc ici une **crise alimentaire**. La production alimentaire chute aux alentours de 2030 tout comme l'alimentation par personne (*Voir courbes correspondantes*).

B.4 Scénario 4 : Amélioration des rendements agricoles

Manipulation

- ✓ **Cocher** “Doubler le stock de ressources fossiles”
- ✓ **Cocher** “Investir dans une technologie de dépollution industrielle”
- ✓ **Cocher** “Améliorer la fertilité des sols”

Année d'application des politiques : 2025

Pour résoudre la crise alimentaire, une solution est **d'investir tôt dans des technologies permettant d'augmenter les rendements agricoles** (4% de rendement annuel en plus pour 6-8% du capital).

Cet investissement s'avère inutile jusqu'en 2050 où les rendements sans technologie suffisent à nourrir la population. A partir de 2050 la technologie permet de considérablement réaugmenter la production agricole (*Voir courbe production alimentaire*). Cependant, l'utilisation massive d'intrants chimiques pour améliorer les rendements et la perte de terres arables en raison de l'érosion et de l'expansion urbaine et industrielle (*Voir courbe Terres arables à partir de 2075*) finissent par neutraliser l'effet positif des nouvelles technologies sur le rendement, et la production alimentaire totale diminue après 2070 (*Voir pic en 2075 de la production alimentaire*). Ici une boucle de rétroaction positive s'enclenche : en cherchant à augmenter les rendements sur les terres de moins en moins nombreuses, le secteur agricole accélère l'érosion de celles-ci.

→ Avez vous des exemples de technologies du monde réel qui contribuent à aggraver le problème qu'elles annoncent résoudre ?

B.5 Scénario 5 : Mieux préserver les sols

Manipulation

- ✓ **Cocher** “Doubler le stock de ressources fossiles”
- ✓ **Cocher** “Investir dans une technologie de dépollution industrielle”
- ✓ **Cocher** “Améliorer la fertilité des sols”
- ✓ **Cocher** “Pratiques agricoles favorables à la préservation des sols”

Année d'application des politiques : 2025

On suppose ici que l'on arrive à **casser le cercle vicieux de détérioration des sols par des pratiques agricoles plus responsables**. (*Voir courbe Terres arables*)

L'effort réalisé permet d'augmenter un peu la période de bien être au delà de 2070. Cependant les mécanismes induits par de moins en moins de ressources disponibles et une production agricole de plus en plus difficile finissent par survenir de nouveau. À mesure que les ressources s'amenuisent, **les efforts sont de plus en plus redirigés vers l'extraction de ressource** pour soutenir les besoins des filières industrielles et agricoles (*Voir courbe part du capital dans l'obtention de ressources*). Les coûts augmentent et le capital disponible ne suffit pas à subvenir aux besoins de tous les secteurs et d'une population croissante. Tout s'effondre vers 2075.

B.6 Scénario 6 : Efficacité technologique

Manipulation

- ✓ **Cocher** “Doubler le stock de ressources fossiles”
- ✓ **Cocher** “Investir dans une technologie de dépollution industrielle”
- ✓ **Cocher** “Améliorer la fertilité des sols”
- ✓ **Cocher** “Pratiques agricoles favorables à la préservation des sols”
- ✓ **Cocher** “Investissement dans l’efficacité technologique”

Année d’application des politiques : 2025

L’origine des problèmes étant toujours plus ou moins lié aux ressources, on décide ici d’investir dans **l’efficacité technologique dans l’utilisation des ressources : moins de ressources fossiles nécessaire pour produire la même chose.**

Ici la combinaison de tous ces efforts technologiques (assez peu réalistes au final pour des raisons de coût, d’inertie technologique, ...) permet d’éviter l’effondrement. Un semblant de stabilisation se fait entre 2080 et 2100 (*voir courbe production industrielle, population, biens par personne, indice de bien être humain*). Néanmoins tout cela arrive trop tardivement pour éviter les fluctuations considérables de toutes les variables à la fin du 21^e siècle. Par ailleurs, le stock de ressources est très faible (environ 10% de celui de 1900) et le coût d’accès aux ressources est trop important pour soutenir à la fois la production industrielle et la survie d’une population pourtant stabilisée.

Une leçon à tirer des 6 scénarios précédents est que tant que la stabilité du système repose sur toujours plus d’extraction de ressources naturelles, de production et de consommation et d’utilisation de sols ..., enlever un problème/une limite en améliorant la technologie ne permet que de prolonger un tout petit peu (voire pas du tout) la dynamique du système jusqu’à tomber sur la prochaine limite. Les technologies restent tout de fois nécessaires parce que sinon tout serait pire, il s’agit donc d’investir dans celles qui font socialement sens et qui ne servent pas qu’à entretenir inutilement un cercle vicieux. En particulier par un effet d’inertie, un mauvais investissement peut être déterminant à l’avenir et détourner d’autres investissements plus soutenables : on parle de blocage technologique. On peut voir considérer que l’on a en fait une part des ressources/du capital que l’on peut investir pour résoudre les problèmes de demain sans exacerber ceux d’aujourd’hui et qu’il faut répartir avec le plus grand soin.

B.7 Scénario 7 : Sobriété

Manipulation

- ✓ **Cocher** “Doubler le stock de ressources fossiles”
- ✓ **Cocher** “Politiques de sobriété et durabilité”

Année d’application des politiques : 2025

Les efforts technologiques réalisés dans les scénarios précédents sont risqués, potentiellement irréalistes et ne permettent pas de résoudre tous les problèmes. Enlevons toutes les technologies et voyons ce qui se passe si la population **choisit la voie de la sobriété modélisée comme une quantité de biens par habitant choisie à 10% de plus qu’en 2000**. Cet effort est équitable : les plus riches limitent leur consommation pour permettre aux plus pauvres d’améliorer leurs niveaux de vie à leur niveau. On limite par ailleurs l’obsolescence programmée et on investit dans des produits durant plus longtemps. Dans ce scénario limiter la consommation et la production permet

d'être moins dépendant d'une extraction permanente de nouvelles ressources.

Investir dans la durabilité augmente la consommation, car on limite l'investissement nécessaire pour le renouvellement du capital industriel (*Voir hausse immédiate des biens par personne dès la mise en place de la politique*). Cela permet d'arriver rapidement à un niveau juste de consommation : ni trop qui risquerait de causer un effondrement écologique, ni trop peu. Ces efforts "minimes" sont prometteurs : ils permettent de retarder le pic de pollution, de maintenir un bon niveau de vie et d'alimentation. Même si ce scénario semble vivable pour 7 milliards d'habitants, l'augmentation de la population amène le retour des problèmes précédents (effets de la détérioration des sols, pollution ...) : l'ensemble des courbes décline vers la fin du siècle.

B.8 Scénario 8 : Efficacité technologique + Sobriété

- ✓ **Cocher** "Doubler le stock de ressources fossiles"
- ✓ **Cocher** "Investir dans une technologie de dépollution industrielle"
- ✓ **Cocher** "Améliorer la fertilité des sols"
- ✓ **Cocher** "Pratiques agricoles favorables à la préservation des sols"
- ✓ **Cocher** "Investissement dans l'efficacité technologique"
- ✓ **Cocher** "Politiques de sobriété et durabilité"

Année d'application des politiques : 2025

Manipulation

Pour répondre aux problématiques du scénario 7, nous choisissons de **combiner l'adoption de modes de vie plus sobres avec l'investissement dans des technologies utiles**.

L'adoption d'un mode de vie plus sobre permet de libérer du capital pour un investissement raisonnable dans les technologies les plus pertinentes. L'utilisation de ressources fossiles est réduite de près de 80% grâce à la combinaison de ces actions. Le niveau de vie est bon (consommation et alimentation suffisante pour tous) (*Voir courbes biens par habitant et alimentation par habitant*). La population et la production se stabilisent permettant aux sols et milieux naturels de se régénérer (*Voir courbe empreinte écologique*). Nous arrivons à un équilibre où les dynamiques contribuant à l'augmentation des variables du système sont compensées par des dynamiques contribuant à leur réduction (*Voir stabilisation de l'espérance de vie, du développement humain, de la production alimentaire et industrielle*).

B.9 Scénarios 9 & 10 : Agir plus ou moins vite

- ✓ **Cocher** "Doubler le stock de ressources fossiles"
- ✓ **Cocher** "Investir dans une technologie de dépollution industrielle"
- ✓ **Cocher** "Améliorer la fertilité des sols"
- ✓ **Cocher** "Pratiques agricoles favorables à la préservation des sols"
- ✓ **Cocher** "Investissement dans l'efficacité technologique"
- ✓ **Cocher** "Politiques de sobriété et durabilité"

Année d'application des politiques : 2000 ou 2050

Manipulation

Ici nous réfléchissons à ce que **20 années de plus ou de moins** avant d'agir peuvent induire.

- **2000** : Agir 20 ans plus tôt permet de stabiliser le monde plus tôt et avec moins de risques. En particulier on stabilise le monde à un niveau de population plus faible et avec plus de marge de manœuvre (ressources disponibles, niveau de pollution, état des sols)
- **2050** : Un point de non-retour est franchi : la population est si élevée, les sols si endommagés, les niveaux de pollution si élevés que les efforts les plus radicaux ne suffisent plus à enrayer les dynamiques conduisant à l'effondrement du système.

C Quelques éléments d'analyse

C.1 Quelles conclusions tirées pour l'action environnementale

Les dynamiques mises en évidence dans ce modèle sont transposables à de nombreuses problématiques actuelles (dont la portée et la connaissance étaient plus que limitée au moment où les auteurs publiaient *Limits to Growth* en 1972) : changement climatique, érosion de la biodiversité, perturbation des cycles biogéochimiques, acidification des océans, pollution atmosphérique ...

L'intérêt des modèles est de pouvoir apporter des recommandations aux décideurs sur la base de dynamiques simulées. Sur la base de notre analyse de World3 nous proposons les messages principaux suivants :

1. **Agir vite** : Plus on agit vite plus une trajectoire soutenable est possible, les dégâts limités et les risques maîtrisés
2. **Savoir ce qui se passe** : Avoir les indicateurs pertinents pour évaluer l'état du monde et adapter nos modes d'action
3. **Limiter l'utilisation de ressources non renouvelables** : Les énergies fossiles et les minerais doivent être utilisés avec parcimonie et efficacité et uniquement pour permettre une transition vers des ressources renouvelables. Le recyclage et l'efficacité technologique doivent permettre de limiter l'impact de ces consommations non renouvelables.
4. **Rechercher l'efficacité** : Maximiser le bien-être tiré de chaque unité de ressources est environnementalement et économiquement bénéfique et nécessaire
5. **Sobriété nécessaire** : Rien n'est possible sans une sobriété permettant d'enrayer les dynamiques exponentielles. Cela implique de repenser nos modes de vie, nos institutions et nos manières de faire société. Il s'agit en particulier de définir démocratiquement et collectivement des niveaux de consommation soutenables, équitables et désirables.

C.2 Quelques remarques

- Le modèle est réaliste sur certains aspects et irréaliste sur d'autres. Tout le talent du modélisateur est de construire et d'utiliser son modèle pour que les questions auxquelles il souhaite répondre fassent partie des traits réalistes du modèle. Il faut donc bien distinguer ces résultats de l'évolution (bien plus complexe) du monde réel, mais s'interroger sur les leçons que l'on peut tirer de cet exercice
- Aucune prise en compte d'inégalités ici. Leur prise en compte conduirait à des dynamiques bien plus complexes et des effets de seuil (famine, pollution, capacité d'investissement) bien plus marqués

- Beaucoup d'hypothèses optimistes : fonctionnement optimal et sans frictions des marchés, des technologies 100% efficaces, pas d'effets aléatoires, pas d'effets de seuils, pleins de catastrophes possibles manquantes (naturelles, pandémies, crises sanitaires ...)

C.3 Ressources pour aller plus loin

- [La version 2004 du rapport Limits to Growth en français](#)
- Conférence de Romain Jarrier sur le sujet :
 - [Vidéo](#)
 - [Slides](#)
- Un papier de Pierre-Yves Longaretti sur l'histoire du modèle
- Un papier de Pierre-Yves Longaretti sur les limites du modèle
- **Contact** : kilian.rouge@agroparistech.fr