

## Mise à jour de Limits to Growth : Comparaison du modèle World3 avec des données empiriques

par Gaya Herrington

Ceci est la version soumise de l'article suivant : Herrington, Gaya. 2021. Mise à jour des limites de la croissance : comparaison du modèle mondial3 avec des données empiriques. Journal d'écologie industrielle 2021 ; 25 : 614-626 qui a été publié après examen par les pairs sous sa forme finale sur <https://doi.org/10.1111/jiec.13084>.

---

### Abstrait

J'ai effectué une mise à jour des données sur Limits to Growth (LtG), plus connu du best-seller de 1972 qui prédit un scénario d'effondrement sociétal mondial se produisant à l'heure actuelle si l'humanité n'a pas modifié ses priorités. Depuis lors, des comparaisons de données empiriques ont indiqué que le monde était se dirige toujours vers l'effondrement. Mes objectifs étaient d'examiner si c'était toujours le cas sur la base les données les plus récentes et s'il restait une possibilité de changer cette trajectoire. Mon la recherche a bénéficié d'une meilleure disponibilité des données et comprenait un scénario et deux variables cela ne faisait pas partie des comparaisons précédentes. J'ai recueilli des données auprès du milieu universitaire, (non-)les agences gouvernementales, les entités des Nations Unies et la Banque mondiale. Cela a été tracé le long de quatre Scénarios LtG couvrant une gamme d'hypothèses technologiques, de ressources et sociétales. De ces graphiques et deux mesures de précision quantitatives, j'ai constaté que les scénarios correspondaient étroitement à données mondiales observées, qui témoignent du travail effectué par LtG il y a des décennies. Les deux scénarios l'alignement le plus étroit indique un arrêt de la croissance au cours de la prochaine décennie, ce qui met en remettre en question l'utilité de la croissance continue comme objectif de l'humanité au 21<sup>e</sup> siècle. Les deux les scénarios indiquent également des déclin ultérieurs, mais un seul – le scénario dans lequel les déclin sont causée par la pollution, y compris la pollution par les gaz à effet de serre, représente un modèle d'effondrement. Le scénario avec les plus petites baisses correspondant le moins aux données empiriques, cependant, les différences absolues étaient rarement grand et parfois insignifiant. Cela suggère qu'il est presque, mais pas encore, trop tard pour société à changer de cap.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Limites à la croissance

Dans le best-seller *Limits to Growth* (LtG) de 1972, les auteurs (Meadows et al.) ont conclu que si l'humanité a poursuivi sa croissance économique sans tenir compte des coûts environnementaux et sociaux, la société mondiale connaîtrait un déclin brutal (c'est-à-dire un effondrement) des conditions environnementales au XXI<sup>e</sup> siècle. Ils ont utilisé un modèle appelé World3 pour étudier principales interactions entre les variables pour la population mondiale, le taux de natalité, la mortalité, la production alimentaire, les services de santé et d'éducation, les ressources naturelles non renouvelables et pollution. L'équipe LtG a généré différents scénarios World3 en faisant varier les hypothèses sur le développement technologique, les quantités de ressources non renouvelables et les priorités sociétales. Le peu de comparaisons de données empiriques avec les scénarios depuis lors, le plus récent datant de 2014, a indiqué que le monde suivait toujours le scénario du « business as usual » (BAU). BAU a montré un arrêt de l'augmentation jusque-là continue des indicateurs de bien-être autour du présent jour, et une forte baisse à partir de 2030 environ.

J'ai considéré si l'humanité suivait toujours BAU, et s'il y avait possibilité de changer de cap et de s'aligner davantage sur un autre scénario LtG, peut-être un dans lequel l'effondrement a été évité. Cet article décrit la recherche pour répondre à cette question. J'ai comparé quantitativement les scénarios World3 avec des données empiriques. Ma recherche donc constitue une mise à jour des comparaisons précédentes, mais les complète également de plusieurs manières. Plus tôt les comparaisons de données ont utilisé des scénarios du livre LtG de 1972. J'ai utilisé la dernière version révisée et recalibré, version World3. Ma comparaison comprenait également un scénario et deux variables qui n'avait pas fait partie de telles recherches auparavant, et a bénéficié de meilleures approximations empiriques grâce à une meilleure disponibilité des données.

## 1.2. Message sur les limites de la croissance

Le message de LtG était que la croissance continue de la production industrielle ne peut être soutenue indéfiniment (Meadows et al., 1972). En effet, l'humanité peut soit choisir sa propre limite, soit atteindre à un moment donné une limite imposée, moment auquel une baisse du bien-être humain aura devenu incontournable. Un point souvent manqué, mais clé dans le message LtG est le pluriel de « limites » (Meadows et al., 2004 ; Meadows & Meadows, 2007). Dans un système interconnecté comme notre société globale, une solution à une limite provoque inévitablement des interactions avec d'autres parties du système, donnant lieu à une nouvelle limite qui devient alors la contrainte contraignante à la croissance (Prés et prés, 2007). Pour illustrer ce point, les auteurs de LtG ont créé divers scénarios avec World3. World3 était basé sur les travaux de Forrester (1971 ; 1975), le fondateur de la dynamique des systèmes : approche de modélisation des interactions entre les objets d'un système, souvent caractérisé par un comportement non linéaire comme des retards, des boucles de rétroaction et une croissance exponentielle ou déclin. Les scénarios LtG n'étaient donc pas destinés à produire des prédictions ponctuelles, mais plutôt à nous aider à comprendre le comportement des systèmes dans le monde au fil du temps.

## 1.3. Publications LTG

Le premier livre (Meadows et al., 1972) a été commandé par le Club de Rome et introduit World3 avec douze scénarios. Le scénario le plus discuté a été le BAU. Il a maintenu les paramètres aux niveaux historiques de la dernière partie du XXe siècle, sans imposer toute hypothèse supplémentaire. Au BAU, le niveau de vie cesserait à un moment donné augmentant avec la croissance industrielle une fois l'épuisement des ressources non renouvelables qui l'accompagne avaient commencé à en faire un facteur limitant de la production industrielle et agricole. Poursuite d'un fonctionnement économique standard sans s'adapter à la contrainte de croissance

la rareté des ressources nécessiterait alors de plus en plus de capital industriel à détourner vers extraire des ressources non renouvelables. Cela laisserait moins pour la production alimentaire, les services aux citoyens et le réinvestissement industriel, entraînant une baisse de ces facteurs et, par conséquent, de la population (Meadows et al., 1972).

Il y avait onze autres scénarios dans le premier livre, y compris "comprehensive technologie » (CT) et « monde stabilisé » (SW). CT assume une gamme de solutions technologiques, y compris la réduction de la génération de pollution, l'augmentation des rendements des terres agricoles et des ressources des gains d'efficacité nettement supérieurs aux moyennes historiques (Meadows et al., 1972, p. 147). Le scénario SW suppose qu'en plus des solutions technologiques, les les priorités ont changé à partir d'une certaine année (Meadows et al., 1972). Un changement de valeurs et politiques se traduisent, entre autres, par une faible taille de famille souhaitée, un contrôle parfait des naissances disponibilité, et un choix délibéré de limiter la production industrielle et de donner la priorité à la santé et à l'éducation prestations de service. SW était le seul scénario dans lequel les déclin ont été évités.

Le deuxième livre, *Beyond the Limits*, a été publié en 1992 (Meadows et al.). Le LTG équipe avait recalibré World3 à deux décennies de données supplémentaires. Les auteurs ont conclu que alors que l'humanité avait eu l'occasion d'agir durant les vingt années qui suivirent le premier livre de LTG, la société avait maintenant atteint le dépassement (c'est-à-dire, la transgression au-dessus de la capacité de charge de la terre). Le troisième et dernier livre, *Limits to Growth : The 30-Year Update*, date de 2004 (Meadows et Al.). Il décrivait dix nouveaux scénarios similaires à ceux des deux premiers livres de hypothèses, mais faites avec un modèle World3 révisé : World3-03. Les révisions du modèle comprenaient incorporation de deux nouvelles variables : l'empreinte écologique humaine (EF) et le bien-être humain. Le les hypothèses concernant le progrès technologique ont également été intensifiées, dépassant les taux historiques encore plus, rendant le scénario CT plus optimiste par rapport à sa version de 1972.

#### 1.4. Critique

Les livres LtG et World3 ont reçu de nombreuses critiques (par exemple, Norgard et al., 2010), dont la plupart n'était pas fondée (Bardi, 2011). Certains critiques ont mal interprété les scénarios et le message clé de les livres, d'autres ont critiqué les hypothèses de modélisation de World3.

Bien qu'évidemment fausses, certaines idées fausses se sont révélées persistantes et influentes dans le débat public. Un exemple est l'affirmation selon laquelle le premier livre a prédit l'épuisement des ressources en 1990 (Passell et al., 1972). Cette idée fausse promulguée au point d'être répétée même par des organisations comme le Programme des Nations Unies pour l'environnement (2002). C'était activement relancé par des analystes (Bailey, 1989 ; Lomborg & Olivier, 2009 ; « Plenty of Gloom », 1997), qui a ensuite rejeté LtG parce que l'épuisement et l'effondrement n'avaient pas eu lieu. Cependant, que les auteurs avaient affirmé que sans changement majeur dans le système mondial, la croissance s'arrêterait avant 2100. Il ressort clairement des graphiques des scénarios que les points d'inversion se situent au-delà de 2000.

Les critiques de la modélisation portaient principalement sur les hypothèses concernant le progrès technologique et correction du marché. Certains ont fait valoir que World3 n'accordait pas suffisamment de crédit à l'humanité capacité à inventer des solutions technologiques aux défis environnementaux (Cole et al., 1973 ; Kaysen, 1972). Ces critiques ont ignoré que le livre LtG contenait plusieurs scénarios très optimistes hypothèses sur l'innovation et l'adoption technologiques, compte tenu des moyennes historiques. Même le très hypothèses optimistes sur l'ingéniosité de l'humanité et sa volonté de partager des solutions (y compris avec ceux qui ne peuvent pas le payer) n'a pas empêché les déclin dans un scénario, à moins qu'il ne soit associé à la valeur sociétale et les changements de politique. D'autres considéraient l'absence d'un mécanisme de prix correctif comme un vice fatal, prétendant que la hausse des prix stimulerait les substitutions entre les ressources et autres solutions technologiques (Kaysen, 1972 ; Solow, 1973). Prix Nobel d'économie Solow (1973), par exemple, a fait valoir que les pressions sur les prix augmenteraient la demande publique dans

avenir pour des taxes plus élevées sur les ressources rares. Cela ne s'est pas produit. Recherche par l'International  
Fonds monétaire (FMI, 2014) et l'Organisation de coopération et de développement économiques  
(OCDE, 2017 ; 2018), entre autres, suggère que les coûts sociaux de la pollution et des  
l'épuisement des ressources renouvelables ne se reflète actuellement nulle part pleinement dans les impôts. Les énergies fossiles seules  
bénéficient toujours d'importantes subventions gouvernementales (Coady et al., 2017), totalisant 6,5 % du produit brut mondial.  
produit intérieur (PIB).

### 1.5. Mises à jour de LtG

Plusieurs revues qualitatives des publications LtG ont décrit comment la dynamique dans World3  
pourrait être observé dans le monde réel (Bardi, 2014 ; Jackson & Weber, 2016 ; Simmons, 2000). Un  
cette revue était de l'auteur LtG Randers (2000). Randers a admis que les énergies non renouvelables  
les ressources, en particulier les combustibles fossiles, s'étaient avérées plus abondantes que prévu dans les années 1972  
Scénario BAU. Il a donc postulé que ce n'est pas la rareté des ressources, mais la pollution, notamment  
gaz à effet de serre, entraînerait l'arrêt de la croissance. Cela correspond au deuxième scénario du  
Livres LTG. Ce scénario a les mêmes hypothèses que le BAU, sauf qu'il suppose une double  
la quantité de ressources non renouvelables. J'appelle ce scénario BAU2. Plus de ressources ne  
éviter l'effondrement dans World3 ; la cause passe de l'épuisement des ressources à une crise de pollution.

BAU2 a été évalué quantitativement dans une étude de recalibrage de World3-03 en 2015 (Pasqualino et  
Al.). Les résultats ont indiqué que la société avait investi davantage pour réduire la pollution, accroître la  
productivité et investir dans les services par rapport à BAU2. Cependant, les auteurs n'ont pas comparé  
leur étalonnage avec SW, et ils n'ont pas non plus utilisé leur version recalibrée de World3 pour exécuter le  
scénario au-delà du présent pour voir si l'effondrement a été évité.

Des comparaisons quantitatives entre les scénarios LtG et les données empiriques ont été réalisées par Turner (2008, 2012, 2014). Il a comparé les données mondiales observées pour les variables LtG avec trois des douze scénarios du premier livre : BAU, CT et SW. Turner a conclu que les données mondiales se comparent favorablement aux principales caractéristiques de BAU, et bien plus que pour les deux autres scénarios.

#### 1.6. Ma recherche : une comparaison de données avec LtG

J'ai examiné si la comparaison des données disponibles en 2019 avec le World3-03 recalibré produit les mêmes résultats que Turner avait trouvés. Parce qu'il a utilisé les variables de 1972, Turner n'a pas inclus les deux qui ont été ajoutés en 2004, le bien-être humain et EF. Une autre question ouverte était donc de savoir dans quelle mesure ces variables s'alignaient sur leurs homologues du monde réel. Dernièrement, compte tenu de l'attention que BAU2 avait reçue et que sa crise de pollution peut être interprétée comme illustrant le changement climatique (c'est-à-dire l'effondrement dû à la pollution par les gaz à effet de serre), ce scénario devrait être inclus dans une comparaison.

L'objectif de la recherche était de déterminer dans quelle mesure les données empiriques correspondaient aux scénarios de World3-03 (ci-après appelé "World3"). J'ai compilé des données provenant de diverses bases de données officielles, comme indicateurs de ce que représentaient les dix variables suivantes : population, fécondité (taux de natalité), mortalité (taux de mortalité), production industrielle par habitant (pi), alimentation pi, services pi, non renouvelable ressources, pollution persistante, bien-être humain et FE. J'ai tracé ces données avec quatre World3 scénarios : BAU, BAU2, CT et SW. Il s'agissait des équivalents de livre LtG 2004 des trois scénarios dans les travaux antérieurs de Turner, plus BAU2.

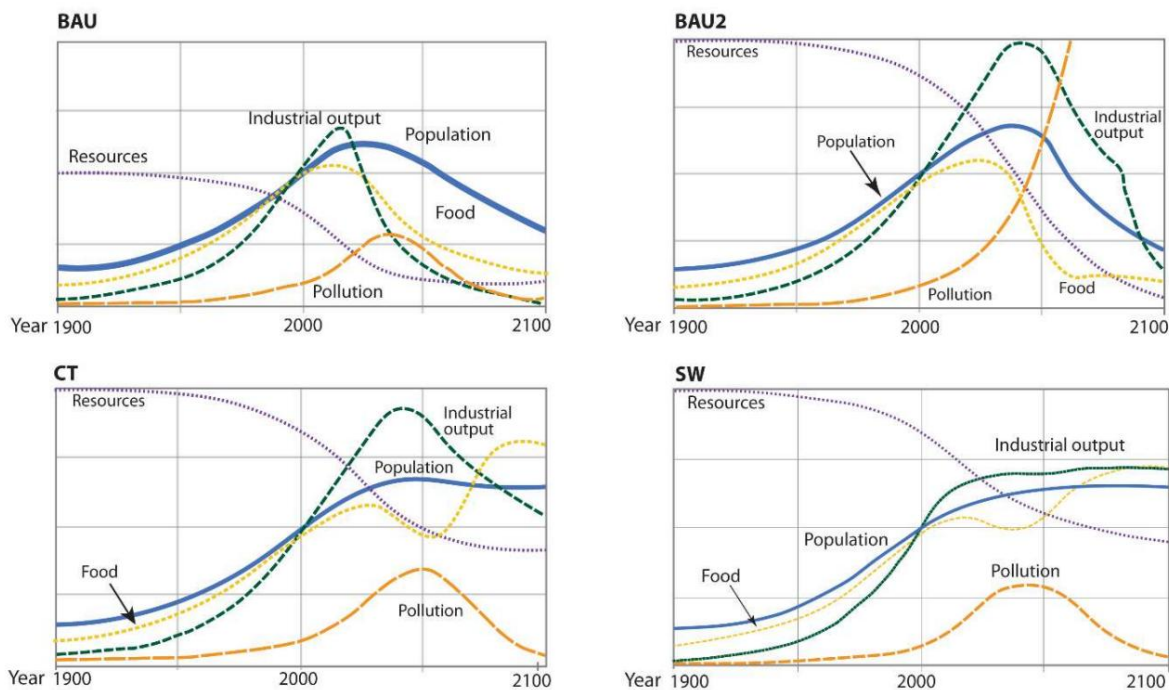


Figure 1. Scénarios BAU, BAU2, CT et SW. Adapté par de Limits to Growth: The 30-Mise à jour de l'année (p. 169, 173, 219, p.245), par Meadows, DH, Meadows, DL, & Randers, J., 2004, Chelsea Green Publishing Co. Copyright 2004 par Dennis Meadows. Adapté avec autorisation.

Les hypothèses sous-jacentes à chaque scénario diffèrent en termes de conditions technologiques, sociales ou de ressources.

La cause du déclin, allant d'une baisse temporaire à un effondrement sociétal, diffère également pour chaque

scénario (tableau 1).

Tableau 1. Description et cause de l'arrêt de la croissance et/ou du déclin par scénario.

Scénario	Description	Cause
ODEUR	Aucune hypothèse ajoutée à l'historique moyennes.	Effondrement dû aux ressources naturelles épuisement.
BAU2	Doubler les ressources naturelles de BAU.	Effondrement dû à la pollution (climat changement équivalent).
TDM	BAU2 + technologie exceptionnellement élevée taux de développement et d'adoption.	La hausse des coûts de la technologie finit par provoquer des déclin, mais pas d'effondrement.
SW	CT + évolution des valeurs sociétales et priorités.	La population se stabilise au 21ème siècle, tout comme le bien-être humain à un niveau élevé.

## 2. MÉTHODES

### 2.1. Données de scénario

BAU, BAU2, CT et SW correspondent aux scénarios 1, 2, 6 et 9 du livre LtG de 2004. Ce signifie que pour le scénario SW, j'ai supposé des changements de politique à partir de 2002. Pour créer le scénarios, j'ai utilisé le CD-ROM original fourni avec le livre de 2004. (j'ai obtenu une menthe copie d'état avec le CD-ROM toujours joint.) Le CD-ROM contient des simulations de scénarios et sortie numérique des variables. Un fichier zip de World3-03 est également disponible sur MetaSD (2019) et il peut être exécuté sur le logiciel gratuit de Vensim (2019).

### 2.2. Détermination de la précision

Pour quantifier à quel point les scénarios LtG se comparent aux données observées, j'ai utilisé les deux mêmes mesures comme dans Turner (2008) :

#### 1) la combinaison de

- un. la différence de valeur (entre la sortie du modèle et les données empiriques), et
  - b. la différence (entre la sortie du modèle et les données empiriques) du taux de changement (ROC)
- les deux appliqués au moment des données empiriques les plus récentes,

#### 2) la différence quadratique moyenne normalisée (NRMSD).

Ces deux mesures ne fournissent pas le niveau de précision de certains tests statistiques. Ils sont, lorsqu'il est combiné avec une inspection visuelle et compte tenu de la portée et de l'agrégation mondiales de World3, mesures appropriées pour la précision des scénarios. La précision ne correspond pas toujours à précision. La précision de la régression linéaire et d'autres méthodes économétriques repose sur

hypothèses de constance comme la linéarité, l'homoscédasticité ou la normalité, qui ne peuvent pas être supposés en dehors d'expériences contrôlées ou d'autres environnements inhabituellement stables (Branderhorst, 2018 ; Sterman, 1994). En tant que tels, ils sont insuffisants pour analyser la dynamique d'un système comme notre société (Forrester, 1971 ; Meadows, 2012). Les mesures de précision sont utiles pour déterminer le mérite de World3, non pas pour les prédictions ponctuelles, mais comme outil d'analyse de la dynamique globale générale.

### 2.2.1. Formules

Les calculs des deux mesures sont effectués pour des intervalles de 5 ans se terminant la dernière année de la série de données. Dans les équations ci-dessous, je suppose que la dernière année est 2015 pour faciliter l'interprétation. Il est simple d'ajuster les formules pour les séries de données se terminant une autre année.

Mesure 1 : changement de valeur et taux de changement

$$= \frac{\text{---}}{2015}$$

$$= \left( \text{---} \right) - \left( \text{---} \right)$$

Mesure 2 : NRMSD

Dans la formule ci-dessous, je suppose que le début du calcul est 1990. C'est ce que j'ai utilisé pour chaque variable où cela était possible, cependant, certaines séries ne remontaient pas aussi loin, auquel cas l'équation ci-dessous devrait être adaptée en conséquence.

$$= \frac{\sum \left( \frac{\quad}{6} - \frac{\quad}{6} \right)}{\sum \frac{\quad}{6}}$$

### 2.2.2. Plages d'incertitude

Il était nécessaire d'établir des plages d'incertitude appropriées pour chacune de ces mesures, étant donné

La faible précision de World3 et les marges d'erreur auxquelles on peut s'attendre dans les données empiriques. J'ai choisi

plages d'incertitude de 20%, 50% et 20% pour la différence de valeur, ROC et NRMSD,

respectivement. Cela reconnaît qu'il est peu probable que les données mondiales aient une précision supérieure à 10 % en raison

aux difficultés de mesure, et de nombreuses variables sont des combinaisons de facteurs. En même temps

les plages d'incertitude sont encore suffisamment étroites pour être une indication significative de l'accord

entre les données observées et simulées. Je ne suggère pas d'interpréter les 20 % et 50 % aussi strictement

comme, par exemple, on utiliserait  $\alpha$  comme seuil dans l'analyse statistique. Comme mentionné, la précision

les mesures et les plages d'incertitude complètent une inspection visuelle des graphiques en quantifiant

erreur d'alignement.

### 2.3. Les sources de données

Ci-dessous, je liste pour chaque variable la source des données empiriques qui a été utilisée pour la comparaison. C'est

la fiabilité est brièvement abordée dans les informations complémentaires (SI).

Certaines variables nécessitaient des procurations car la variable dans World3 n'est pas directement observable

ou quantifiable dans le monde réel. J'ai souvent utilisé les mêmes sources de données que Turner, cependant, dans

plusieurs cas, j'ai pu les améliorer grâce à des indices nouveaux ou récemment améliorés et

bases de données. Lorsque les données empiriques étaient exprimées dans des unités différentes de celles des scénarios LtG, je

les a normalisés à la valeur du scénario de 1990, car c'est l'année où World3 a été

recalibré pour durer (Meadows et al., 1992).

#### 2.3.1. Population. J'ai utilisé les chiffres de la Division de la population des Nations Unies

Département des affaires économiques et sociales (UN DESA PD, 2019). Leur population

la série comprend des estimations pour 2020, que j'ai utilisées pour comparer avec le LtG 2020

valeurs. Les chiffres annuels de la population peuvent également être trouvés sur les données ouvertes de la Banque mondiale

site Web (BM, 2019a). Les deux sites mentionnent des agences nationales et internationales

organisations comme sources, telles qu'Eurostat, le US Census Bureau et le recensement

publications des bureaux nationaux de statistique.

#### 2.3.2. Fécondité et mortalité (deux variables). J'ai utilisé la série de données du WB Open

Site de données (2019b ; 2019c) pour ces deux variables. La BM mentionne comme son

s'approvisionne auprès des mêmes organismes et publications que pour sa série population.

#### 2.3.3. Nourriture par habitant. J'ai utilisé l'énergie totale disponible par personne et par jour pour approximer

cette variable. La valeur calorique quotidienne par habitant peut être trouvée dans le bilan alimentaire

Fiches sur FAOSTAT (2019), la base de données de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

de l'ONU.

#### 2.3.4. Production industrielle par habitant. La variable pc de la production industrielle représentée

niveau de vie matériel et technologique des citoyens et a été un facteur de

La capacité de la société mondiale<sup>3</sup> à cultiver des aliments et à fournir des services (Meadows et al., 2004). je

ont utilisé l'indice de la production industrielle (PII) et la formation brute de capital fixe

(FBCF) en tant que mandataires. J'ai divisé les deux séries proxy par la population pour arriver à par habitant

Nombres.

La PEG est un indicateur macroéconomique standardisé de la production réelle d'une économie en la fabrication, l'exploitation minière et l'énergie (par exemple, Moles et Terry, 1997). Contrairement au PIB, la PEG exclut le commerce de détail et les services professionnels, ce qui en fait un proxy évident pour sortir. La série IIP peut être récupérée sous le nom "INSTAT2" sur le portail de données de l'ONU Organisation de développement industriel (ONUDI, 2019a). L'ONUDI ne fournit pas de IIP mondial, j'en ai donc créé un avec une moyenne pondérée des IIP des pays. Comme poids je a choisi la valeur ajoutée manufacturière nationale, également issue de l'ONUDI (2019b).

La Banque mondiale (2019d) fournit une série mondiale de FBCF. La FBCF comprend les terrains améliorations (par exemple, clôtures et drains), infrastructure (par exemple, routes), construction usines de construction (par exemple, écoles, bureaux, hôpitaux et bâtiments industriels), achats de machines et d'équipements. Cela correspond étroitement à la définition de la variable de la production industrielle dans Monde3, notamment en ce qui concerne la capacité d'une société à fournir des services et produire de la nourriture.

#### 2.3.5. Services par habitant. Dans le Monde3, les services pc représentent l'éducation et la santé

(Meadows et al., 2004). J'ai utilisé l'indice de l'éducation (EI), les dépenses en la santé et les dépenses d'éducation comme approximations.

L'IE est construit par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD, 2019a). C'est calculé en utilisant les années moyennes de scolarisation et les années de scolarisation attendues (PNUD, 2019b). Ces deux chiffres peuvent être très différents, en particulier dans les pays en développement, et combinés fournissent ainsi une bonne indication de l'éducation actuellement disponible services (PNUD, 2019c). Le PNUD ne fournit pas d'IE global, j'en ai donc créé un par pesant l'IE de chaque pays par sa fraction de population.

La Banque mondiale fournit des chiffres mondiaux pour les dépenses publiques d'éducation (2019e) et dépenses de santé (2019f). Les deux séries sont exprimées en pourcentage du PIB. Les auteurs du LtG ont décrit plusieurs schémas d'effondrement comme ressources détournées des services vers le capital industriel afin de extraire des ressources naturelles, réduire la pollution et/ou produire de la nourriture. Fraction du PIB est une indication de la façon dont les ressources sont allouées à quelque chose au niveau macro, comme l'exprime la déclaration de la Banque mondiale selon laquelle « un pourcentage élevé du PIB suggère priorité à l'éducation » (2019e). Par conséquent, suivre la fraction du PIB mondial dépensée sur l'éducation ou la santé peut aider à révéler si le mécanisme décrit par LtG est effectivement observable.

2.3.6. Pollution. World3 suppose que la pollution est mondialement distribuée, persistante et

préjudiciable à la santé humaine et à la production agricole. J'ai utilisé les concentrations de CO<sub>2</sub> et la production de plastique comme substituts.

Les données sur le CO<sub>2</sub> atmosphérique (Tans & Keeling, 2019) ont été obtenues du National Administration océanique et atmosphérique. J'ai soustrait le niveau de 1900 CO<sub>2</sub> de 297 parties par million (Etheridge et al., 1996), parce que les scénarios LtG placent la pollution à 0 en 1900. Bien que le CO<sub>2</sub> ne soit pas le seul polluant persistant —NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, les métaux et les substances appauvrissant la couche d'ozone en sont d'autres exemples - c'est un indicateur adéquat en raison des impacts mondiaux que le changement climatique entraîne sur la santé humaine, la l'environnement et notre capacité à cultiver des aliments, et parce qu'il existe des séries chronologiques précises données.

Les données sur la production mondiale de plastique proviennent de Geyer et al. (2017). Je ajusté les données à la baisse par la part de plastique qui est jetée, ce qui

serait passé de 100 % en 1980 à 55 % en 2015 (Geyer et al., 2017). Pas tout le plastique est considéré comme de la pollution, cependant, je pense que c'est un indicateur approprié étant donné que le plastique est persistant et omniprésent dans la société d'aujourd'hui. Différents types de plastiques peuvent se retrouver tout au long de la chaîne des produits de consommation et d'approvisionnement alimentaire, de océans et la faune marine (van Sebille et al., 2015 ; Smillie, 2017) à l'eau du robinet (Kosuth et al., 2017), des terres agricoles (Nizzetto et al., 2016) aux composants et l'air que nous respirons (Wright & Kelly, 2017a), provoquant une croissance corpus de littérature scientifique sur un large éventail de possibles effets négatifs sur la santé humaine effets (Halden, 2010; Wright et Kelly, 2017b).

#### 2.3.7. Ressources non renouvelables. J'ai utilisé deux procurations de combustibles fossiles et une procuration de métal. je

suppose une substitution totale entre les ressources énergétiques ou métalliques, ce qui est conservateur compte tenu de l'état actuel de la technologie (Brathwaite et al., 2010 ; Driessen et al., 2016 ; Graedel et al., 2015). La série de données proxy que j'ai créée n'a pas été normalisée pour 1990 valeurs parce qu'elles représentent des fractions (c'est-à-dire qu'elles fonctionnent sur une échelle de 1 à 0) et donc les mettre à l'échelle fausserait la comparaison. Parce que BAU et BAU2 ne différaient que par la quantité de ressources et celles-ci étaient fixées à 1 en 1900, les deux les scénarios montrent la même courbe.

Les deux proxys d'énergie fossile consistaient en des estimations du charbon restant, du gaz naturel, et huile. Le premier proxy de combustible fossile était le même que dans les travaux antérieurs de Turner. Son L'article de 2008 répertorie toutes les sources qu'il a utilisées pour déterminer les estimations d'experts hautes et basses pour les ressources énergétiques fossiles en 1900. La production annuelle de chaque ressource provenait du World Watch Institute, qui à son tour avait compilé les données de organisations telles que l'ONU, British Petroleum (BP) et l'US Energy

Administration des informations. J'ai mis à jour la série de Turner avec les données de production de BP's Statistical Review of World Energy (2019) et résumé sur les trois fossiles ressources pour arriver à la série de production annuelle totale. Ces données de production ont été cumulativement soustraite des estimations totales des ressources élevées et faibles, ce qui donne une limite supérieure et inférieure pour la fraction de ressources non renouvelables restantes au fil du temps. Le deuxième proxy énergie fossile a été construit selon la même méthode, mais avec des estimations de ressources issues d'une publication Geochemical Perspective (GP) (Sverdrup & Ragnarsdóttir, 2014) et les données de production de la BM (2019g).

L'approximation des métaux consistait en des estimations de ressources de 21 métaux : aluminium, Antimoine, Bismuth, Chrome, Cobalt, Cuivre, Or, Indium, Fer, Plomb, Lithium, Manganèse, Nickel, Niobium, Palladium, Platine, Argent, Tantale, Étain, vanadium et zinc. Les estimations des ressources des métaux disponibles en 1900 étaient sur la base de la publication GP également utilisée pour le deuxième proxy d'énergie fossile (Sverdrup & Ragnarsdóttir, 2014). La production de chaque métal a été obtenue des États-Unis Commission géologique (USGS, 2019). GP a fourni les montants recouvrables restants pour chaque métal à partir de 2010, j'ai donc additionné la production USGS de 1900 à 2009 et ajouté cette somme à l'estimation du GP des ressources métalliques pour arriver au chiffre des ressources de 1900. Les données sur la production et les ressources ont ensuite été additionnées pour les 21 métaux, et la production annuelle totale a été soustraite de la ressource totale de 1900 au fil du temps.

#### 2.3.8. Bien-être humain. La série de données HDI peut être consultée sur le site Web du PNUD

(2019a). L'IDH a subi des changements méthodologiques au fil des ans (PNUD, 2019d), qui ont entraîné d'importants ajustements rétroactifs de la série. Le 2004 Le livre LtG (Meadows et al.) note que la variable de bien-être World3 était très proche de

la valeur du PNUD en 1999, mais ce n'était plus le cas pour la dernière version de la série de données IDH. Le PNUD (2019d) déclare : « La différence entre les valeurs de l'IDH (...) publié dans HD Reports pour différentes années représente un effet combiné de la révision des données, le changement de méthodologie et le changement réel des réalisations dans indicateurs ». Le PNUD (2019d) conseille donc de ne pas se procurer les chiffres IDH rapports, mais d'utiliser les "séries de données disponibles dans la base de données en ligne". Donc, je a mis à l'échelle les données actuelles de l'IDH avec un facteur de 1,106 pour s'aligner sur les scénarios World3 valeur en 2000.

#### 2.3.9. Empreinte écologique humaine. Le réseau mondial de l'empreinte (GFN, 2019a)

publie le FE sur son site Internet. J'ai mis à l'échelle la série EF à des valeurs de scénario entre 1990 et 2000 (avec un facteur de 1,17), car l'équipe LtG aurait calibré World3 pour s'aligner sur les chiffres EF de l'époque. La raison pour laquelle les données EF d'aujourd'hui ont fait pas exactement alignés est très probablement les plusieurs révisions du calcul EF au cours de la deux dernières décennies (GFN, 2019b), similaire à l'IDH.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1. Vue d'ensemble pour chaque mesure de précision

Le tableau et le graphique ci-dessous donnent un aperçu des deux mesures de précision pour chaque variable et scénario. Des graphiques pour chaque variable tracée avec les scénarios sont fournis dans le SI. Tableau 2 montre les résultats pour la mesure de précision 1, le graphique de la Figure 3 montre la mesure de précision 2. Certains les variables comportaient plus d'une série de données à comparer avec le scénario (c'est-à-dire plus d'une Procuration). Ces données sont répertoriées dans une cellule par variable du tableau et affichées séparément dans la graphique.

Les chiffres du tableau 3 qui se trouvaient dans les plages d'incertitude (20 % pour la différence de valeur et 50% pour le ROC) sont imprimés en vert, ceux hors plage en rouge. L'incertitude des limites ont été laissées en noir. La ligne de 20 % est facilement identifiable sur la figure 3 et marquée par une ligne verte pointillée pour plus de facilité.

Tableau 2. Mesure de précision 1 : différence de valeur et différence de taux de variation (en %).

Scénario		Population	Fertilité	Mortalité	Alimentation pc	PC de sortie industrielle	Prestations de service pc	Pollution	Naturel cap.pc	Bien-être EF	
ODEUR	valeur Δ	-6	-18	12	-15	1; 1; 7	-1; -11	-20 ; 59	-15 ; -11 ; -8 ; -2 ; 15	-4	15
	ΔROC	-42	118	-109	-342	1; 12; 76	-123 ; -90	-14 ; 169	12; 43 ; 55; 121 ; 179	-152	593
BAU2	valeur Δ	-5	-12	5	-14	3 ; 4 ; 9	-7; 9	-20 ; 59	-15 ; -11 ; -8 ; -2 ; 15	-2	19
	ΔROC	-28	41	-105	-279	53 ; 70 ; 140 -64 ; 240 -14; 173			12; 43 ; 55; 121 ; 179	-62	940
TDM	valeur Δ	-5	-12	3	-12	3 ; 5 ; 9	-6 ; 9	-20 ; 59	-15 ; -11 ; -8 ; -2 ; 16	-1	18
	ΔROC	-25	43	-104	-194	53 ; 71 ; 140 -62 ; 250 -14; 170			7; 41 ; 50 ; 113 ; 166	-40	841
SW	valeur Δ	-11	-24	9	-dix	12; 13; 19	-9 ; -2	-19 ; 62	-15 ; -11 ; -8 ; -2 ; 16	-1	13
	ΔROC	-52	-50	-107	-275	33; 49 ; 134 -127; -95		-8 ; 190	-3 ; 36; 39; 97 ; 143	-67	247

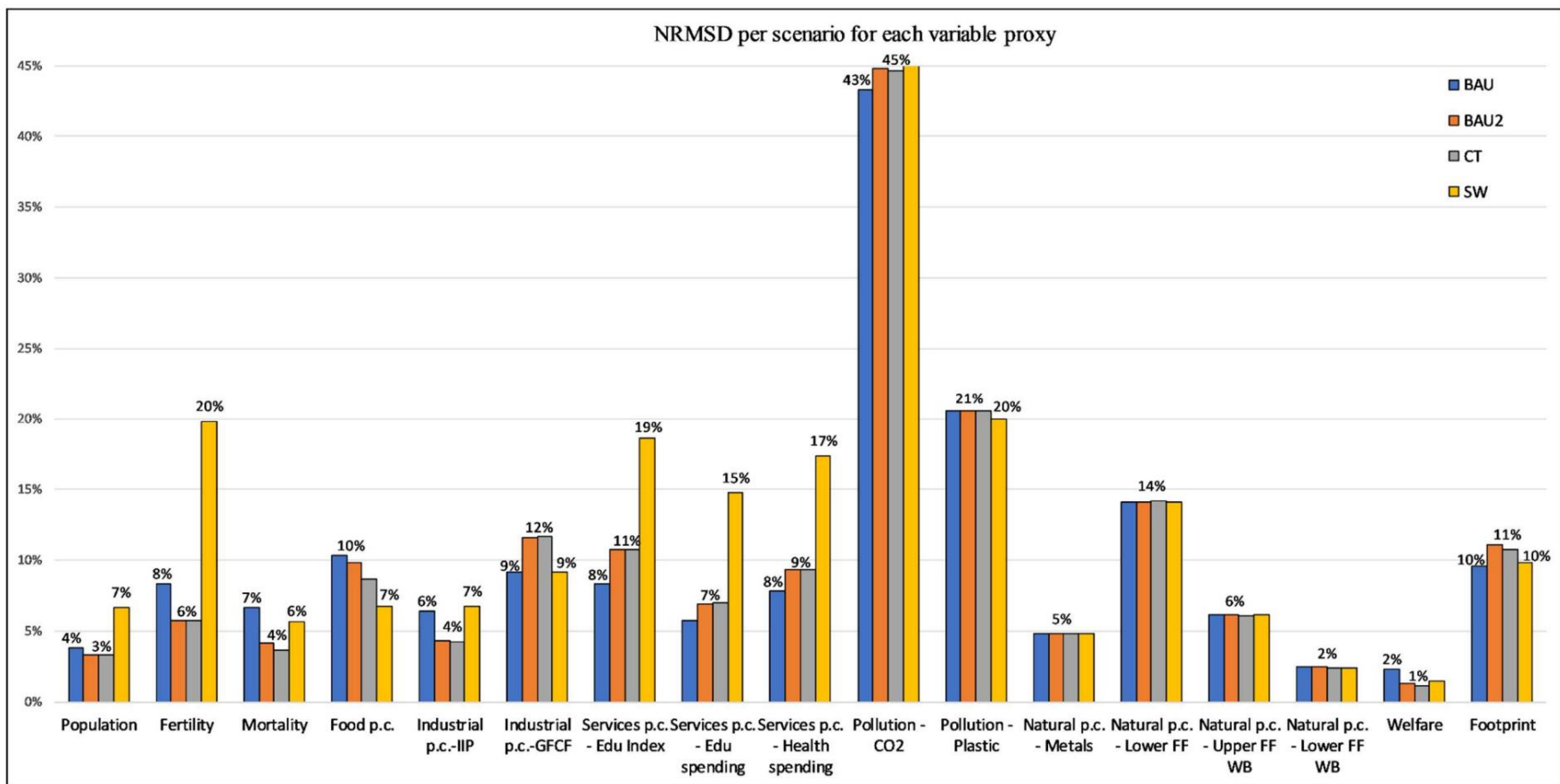


Figure 2. Mesure de précision 2 : NRMSD. Tracé pour chaque scénario et variable proxy. La visualisation des données a été facilitée par le complément XL Toolbox de Daniel pour Excel, version 7.3.4, par Daniel Kraus, Würzburg, Allemagne ([www.xltoolbox.net](http://www.xltoolbox.net)).

### 3.2. L'ajustement le plus proche compte par scénario

Le tableau 3 contient un décompte par scénario pour chaque fois qu'il s'agissait de l'ajustement le plus proche. Un scénario a été compté comme un ajustement le plus proche lorsqu'il s'alignait plus étroitement que d'autres scénarios et au moins un proxy était dans les limites d'incertitude pour les deux mesures d'exactitude. Ce dernier critère est strict; J'aurais également pu utiliser l'exigence d'une seule mesure de précision à l'intérieur limites d'incertitude. (Comme il ressort clairement de la figure 3, la mesure de précision 2 est dans les limites d'au moins moins un proxy pour chaque variable.) J'ai choisi les deux mesures au lieu de l'une ou l'autre, car les scénarios montrent un renversement autour du temps présent pour plusieurs variables LtG. Donc, l'alignement dans le ROC est une partie importante de l'évaluation de la précision. En tant que dérivée seconde, cependant, le ROC est également la partie la plus sensible de la mesure. Dans un cas, la production industrielle pc, j'ai décidé d'équilibrer la sensibilité du ROC avec son importance en comptant le scénario qui a montré un alignement étroit en valeur (à la fois différence et NRMSD) et le ROC légèrement au-delà de la limite de 50 % (c'est-à-dire 62 % et 64 %). Lorsque tous les scénarios étaient en dehors de l'incertitude limites pour au moins une mesure, elles ont été comptées comme non concluantes (la dernière colonne du tableau 3). Pour les cas où deux scénarios ou plus s'alignaient dans la même mesure, ils ont tous été comptés. C'est pourquoi le tableau 3 montre 22 comptages totaux sur dix variables. L'utilisation de plusieurs procurations car certaines variables n'ont pas conduit à un double comptage ; bien que différents proxys pour le même variables avaient parfois des résultats numériques différents, elles conduisaient souvent aux mêmes résultats dans termes d'alignement (ou non) à un certain scénario.

Tableau 3. Nombre par scénario d'accord le plus proche avec les données empiriques.

Scénario	BAU	BAU2	CT	SW	Aucun		
Nombre d'alignements les plus proches avec les données	4	6	7	3	2		

Même lorsque les scénarios montraient un alignement étroit, dans certains cas, le choix d'un scénario d'ajustement le plus proche n'était pas possible car ils s'alignaient tous dans une mesure similaire. C'est parce que les scénarios commencent à dévier plus tard dans World3-03 que ce n'était le cas dans la version 1972 de World3. Tel était le cas avec des ressources non renouvelables, par exemple, et avec le proxy plastique pour la pollution variable. En particulier, les scénarios BAU2 et CT ne s'écartent pas significativement avant 2020, ce qui fait que les deux sont les ajustements les plus proches pour plusieurs variables. Parce que les scénarios souvent étroitement alignés en valeur, un facteur décisif pour déterminer l'ajustement le plus proche était la différence de ROC. Cela signifie que même dans les cas où un scénario pourrait être choisi comme le plus adapté, cela le résultat pourrait changer dans les futures mises à jour car des points de données supplémentaires peuvent modifier un ROC significativement. Par exemple, les mesures de précision pour la variable de bien-être indiquaient CT comme l'ajustement le plus proche, mais c'est uniquement parce que sa différence ROC était inférieure à l'incertitude de 50 % gamme. Les autres scénarios s'accordent également étroitement en valeur, et mathématiquement parlant, c'est tout à fait possible que les points de données des années à venir provoquent leurs taux de changement (maintenant 62 % et 67 %) pour descendre en dessous de 50 %. Ceci doit être gardé à l'esprit avec le tableau 3.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. Alignement étroit

En ce qui concerne la valeur, les deux mesures indiquent un alignement globalement étroit entre le LtG scénarios et données empiriques. La mesure 2 (la NRMSD) n'était pas supérieure à 20 % pour toutes les variables (Figure 3), sauf pour la pollution. Le tableau 2 montre que la plupart des différences de valeur se situaient également dans la fourchette de 20%, sauf pour la pollution et pour la fertilité dans le SW. Le ROC a montré de plus en plus écarts entre les scénarios et les données empiriques. L'alignement global étroit en valeur entre

les scénarios LtG et les données empiriques témoignent du travail de l'équipe LtG, ainsi que de la  
potentiel de la modélisation des systèmes dynamiques pour la planification stratégique et les évaluations des politiques en général.

#### 4.2. La fin de la croissance

Malgré tous les scénarios montrant une trajectoire relativement proche, il y avait des différences entre  
scénarios pour certaines variables. Contrairement aux comparaisons précédentes, cette recherche n'a pas révélé le BAU  
scénario s'alignant plus étroitement que les autres sur les données empiriques. Le nombre le plus bas pour le plus proche  
fit est pour SW, le scénario qui indiquerait une trajectoire durable. Quand il était possible de  
faire la distinction entre les scénarios, le CT et le BAU2 étant le plus souvent alignés les plus proches. BAU2 et CT  
les scénarios montrent un arrêt de la croissance d'ici une dizaine d'années. Les deux scénarios indiquent donc  
que la poursuite des affaires comme d'habitude, c'est-à-dire la poursuite d'une croissance continue, n'est pas possible. Même quand  
associé à un développement et à une adoption technologiques sans précédent, le statu quo  
entraînera inévitablement une baisse du capital industriel, de la production agricole et des niveaux de bien-être au sein de cette  
siècle. Ces prévisions placent les récentes prévisions économiques relativement faibles (par exemple, OCDE, 2020 ;  
BM, 2019h) et des discours d'organisations comme le FMI sur un « ralentissement synchronisé » de  
croissance mondiale (Lawder, 2019) en perspective.

#### 4.3. Effondrement?

Mes conclusions ne permettent pas de déterminer si l'on peut s'attendre à ce que les déclin ultérieurs soient aussi prononcés que  
constituer un effondrement. Les scénarios CT et BAU2 montrent des schémas de déclin nettement différents,  
et on ne peut pas simplement « prendre le juste milieu » entre deux scénarios produits par un complexe, non  
modèle linéaire comme World3. Bien que la pente du déclin d'un scénario ne puisse être utilisée pour  
à des fins prédictives (Meadows et al., 2004), on peut dire que BAU2 montre un net effondrement

modèle, tandis que CT suggère la possibilité que les déclinés futurs soient des atterrissages relativement doux, à moins pour l'humanité en général. Les baisses modérées du CT s'aligneraient sur une prévision mondiale réalisée en 2012 par l'auteur LtG Randers. La prévision de Randers a été faite avec un modèle différent de celui World3 et il ne peut donc pas être comparé à CT à bien des égards. Cependant, l'évolution générale ne sont pas dissemblables, car les prévisions incluent la stagnation de la consommation et du PIB vers le milieu du siècle suivi de déclinés mais pas d'effondrement.

#### 4.4. À propos des points de basculement

Les scénarios BAU2 et CT semblent s'aligner assez étroitement non seulement sur les données observées, mais aussi avec le débat contemporain. D'une part, le scénario BAU2 résonne avec les messages de les climatologues que nous pourrions être actuellement au « point de basculement climatique » (Cai et al., 2016 ; Lenton et al., 2019 ; Pearce, 2019; Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019). Sur le d'autre part, CT est le scénario de ceux qui croient en l'ingéniosité de l'humanité pour innover hors de toute limite. Les hypothèses sous-jacentes à CT sont très optimistes compte tenu de l'historique Les figures. Par exemple, CT suppose des taux de progrès technologique de 4 % par an, ce qui, parmi autres choses, devraient conduire à des réductions des émissions polluantes de 10% par rapport à leurs valeurs de 2000 d'ici 2020 et 48 % d'ici 2040 (Meadows et al., 2004). Compte tenu de la tendance à la hausse des émissions mondiales de CO2 jusqu'à présent, les réduire de moitié au cours des 20 prochaines années semble irréaliste. Toutefois, le technologue pourrait soutiennent que l'histoire est pleine de « points de basculement technologiques » (Montresor, 2014 ; World Economic Forum, 2015), où les innovations bousculaient les tendances et révolutionnaient la société au-delà de la sagesse conventionnelle jugée possible.

Détailler cette discussion dépasse le cadre de cet article. Plus important encore, mes découvertes indiquent une question tout à fait différente à poser que celle de savoir si la société pourrait suivre le CT.

Deux scénarios les mieux adaptés qui s'alignent légèrement plus près que les deux autres indiquent qu'il est pas encore trop tard pour que l'humanité change de cap et modifie de manière significative la trajectoire de l'avenir points de données. Si nous voulons parier notre avenir sur la possibilité de points de bascule, plutôt que sur la technologiques, il faut viser les « points de basculement sociaux » (David Tàbara et al., 2018 ; Otto et al., 2020 ; Westley, et al., 2011) : Une transformation des priorités sociétales qui, des innovations technologiques visant spécifiquement à faire avancer ces nouvelles priorités, peuvent apporter l'humanité sur le chemin du scénario SW.

#### 4.5. Conclusion

J'ai comparé des données mondiales empiriques à des scénarios du dernier livre LtG, créé par le World3 modèle. La comparaison des données, qui a utilisé la dernière version de World3, comprenait quatre scénarios : BAU, BAU2, CT et SW. Les données empiriques ont montré un ajustement relativement proche pour la plupart des variables. Cela était vrai dans une certaine mesure pour tous les scénarios, car dans plusieurs cas, les scénarios ne considérablement diverger jusqu'en 2020. La piste globalement proche avec les données empiriques du dernier World3 version est un témoignage de l'accomplissement de l'équipe LtG, quand ils ont créé et recalibré un modèle qui a été capable de générer des tendances mondiales interactives avec précision trois décennies après l'avenir. Lorsque les scénarios ont commencé à diverger, ceux qui s'alignaient le plus sur les données empiriques les données étaient BAU2 et CT. Cela constitue une rupture avec les comparaisons précédentes qui utilisaient version antérieure de World3, qui indiquait que BAU était la plus suivie de près. Le BAU n'étant pas le scénario le plus proche n'implique pas que l'effondrement de la société soit exclu sur la base de World3. Le scénario qui décrit les plus faibles déclin, SW, est également celui qui s'aligne le moins étroitement avec données observées. En outre, l'un des scénarios les plus alignés, BAU2, montre un effondrement modèle. Cependant, l'autre scénario, CT, ne montre qu'une baisse modérée. A ce stade donc,

les résultats indiquent un ralentissement et un arrêt éventuel de la croissance au cours de la prochaine décennie, mais laissent ouvert si le déclin ultérieur constituera un effondrement. La société mondiale n'a pas à se contenter de CT comme meilleur scénario, cependant. Bien que SW suive de moins près, une intention délibérée de changement de trajectoire induit par la société se tournant vers un autre objectif que la croissance est encore possible. Cette fenêtre d'opportunité se referme rapidement.

## 5. REMERCIEMENTS

Je suis reconnaissant à Graham Turner d'avoir partagé son travail précédent avec moi et de m'avoir apporté son soutien. Ce fut un plaisir et un honneur de discuter de mes recherches avec lui. Je tiens à remercier Esther G. Naikal et Giovanni Ruta de la Banque mondiale pour m'avoir fourni les données sous-jacentes sur les calculs de capital. Je suis également très reconnaissant à John Sterman de m'avoir rencontré brièvement en janvier 2019 alors qu'il était en congé sabbatique. Cette conversation dans son bureau du MIT m'a fourni exactement les bonnes idées pour pousser mes recherches dans la bonne direction.

## 6. INFORMATIONS SUR LE FINANCEMENT

Cette recherche a été autofinancée.

## 7. RÉFÉRENCES

Bailey, R. (1989). Dr Doom. *Forbes*, 144, 44.

Bardi, U. (2011). La malédiction de Cassandra : comment « les limites de la croissance » ont été diabolisées. Récupéré de <https://www.resilience.org/stories/2011-09-15/cassandras-curse-how-limits-growth-was-demonized/>

Bardi, U. (2014). Extrait : Comment la quête des richesses minérales pille la planète. Chelsea Green Publishing Co.

- Branderhorst, G. (2018, 20-22 juin). Cartographier le gâchis : planifier l'inédit dans un monde complexe, dynamique et interconnecté. [Présentation de l'article] Forum de la fonction publique du Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies 2018, Marrakech, Maroc.
- Brathwaite, J., Horst, S. et Iacobucci, J. (2010). Maximiser l'efficacité de la transition vers une économie basée sur le charbon. *Politique énergétique*, 38(10), 6084–6091.
- British Petroleum (BP). (2019). Revue statistique de l'énergie mondiale. Extrait de <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Cai, Y., Lenton, TM et Lontzek, TS (2016). Risque de multiples points de basculement en interaction devrait encourager une réduction rapide des émissions de CO<sub>2</sub>. *Changement climatique naturel*, 6(5), 520–525.
- Coady, D., Parry, I., Sears, L. et Shang, B. (2017). Quelle est l'importance des subventions mondiales aux combustibles fossiles ? *Développement mondial*, 91, 11–27. doi : 10.1016/j.worlddev.2016.10.004
- Cole, HSD, Freeman, C., Jahoda, M., & Pavitt, KLR (1973). *Modèles de malheur : une critique des limites à la croissance*. Édition d'univers.
- David Tàbara, J., Frantzeskaki, N., Hölscher, K., Pedde, S., Kok, K., Lamperti, F., . . . Berry, P. (2018). Points de basculement positifs dans un monde qui se réchauffe rapidement. *Opinion actuelle sur la durabilité environnementale*, 31(C), 120–129.
- Driessen, PPJ, Henckens, MLCM, van Ireland, EC, & Worrell, E. (2016). Minéral ressources : rareté géologique, tendances des prix du marché et générations futures. *Politique des ressources*, 49, 102–111. doi: 10.1016/j.resourpol.2016.04.012
- Etheridge, DM, Steele, LP, Langenfelds, RL, Francey, RJ, Barnola J.-M., & Morgan, VI (1996). Changements naturels et anthropiques du CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours des 1000 dernières années à partir de l'air dans la glace et le névé de l'Antarctique. *Journal de recherche géophysique*, 101.
- FAOSTAT. (2019). Bilans alimentaires. Extrait de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Forrester, JW (1971). *Dynamique mondiale*. Presse Wright-Allen.
- Forrester, JW (1975). *Papiers collectés*. Communications Pégase.
- Geyer, R., Jambeck, JR et Law, KL (2017). Production, utilisation et devenir de tous les plastiques jamais fabriqués. *Avancées scientifiques*, 3(7).
- Réseau mondial de l'empreinte (GFN). (2019a). Tendances pays. Extrait de <http://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=earth>

Réseau mondial de l'empreinte (GFN). (2019b). FAQ. Extrait de <https://www.footprintnetwork.org/faq/>

Graedel, TE, Harper, EM, Nassar, NT et Reck, BK (2015). Sur la base matérielle de la société moderne. Actes de l'Académie nationale des sciences, 112, 6295. doi : 10.1073/pnas.1312752110

Halden, RU (2010). Plastiques et risques pour la santé. Examen annuel de la santé publique, 31(7).

Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2019). Rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans un climat changeant. Extrait de <https://www.ipcc.ch/srocc/>

Jackson, T. & Weber, R. (2016). Les limites revisitées : un examen du débat sur les limites de la croissance. Extrait de <http://limits2growth.org.uk/revisited>

En ligne Kaysen, C. (1972). L'ordinateur qui a imprimé W\*O\*L\*F\*. Affaires étrangères, 50, 660–668. doi:10.2307/20037939. JSTOR 20037939.

Kosuth, M., Wattenberg, EV, Mason, SA, Tyree, C., & Morrison, D. (2017). Contamination par les polymères synthétiques dans l'eau potable mondiale. Orbe Média. Extrait de [https://orbmedia.org/stories/Invisibles\\_final\\_report/multimedia](https://orbmedia.org/stories/Invisibles_final_report/multimedia)

Lawder, D. (2019). La nouvelle directrice du FMI, Georgieva, met en garde contre un "ralentissement synchronisé" de la croissance mondiale. Nasdaq. Extrait de <https://www.nasdaq.com/articles/new-imf-chief-georgieva-warns-of-synchronized-slowdown-in-global-growth-2019-10-08>

Lenton, T., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., & Schellnhuber, H. (2019). Points de basculement climatiques – trop risqué pour parier contre. Nature, 575(7784), 592–595.

En ligne Lomborg, B., Olivier, R. (2009). La poubelle de l'histoire : les limites de la croissance. Politique étrangère, 103, 34–48. Extrait de <https://foreignpolicy.com/2009/11/09/the-dustbin-of-history-limits-to-growth/>

Meadows, DH (2012). Penser en systèmes. Édition verte de Chelsea.

Prés, DL (1974). Dynamique de croissance dans un monde fini. Presse Wright-Allen.

Meadows, DH, & Meadows, DL (2007). L'histoire et les conclusions de The Limits to Croissance. Examen de la dynamique du système, 23, 191–197. doi : 10.1002/sdr.371

Meadows, DH, Meadows, DL et Randers, J. (1992). Au-delà des limites : affronter le monde s'effondrer, envisageant un avenir durable. Chelsea Green Publishing Co.

Meadows, DH, Meadows, DL et Randers, J. (2004). Les limites de la croissance : la mise à jour sur 30 ans. Chelsea Green Publishing Co.

Meadows, DH, Meadows, DL, Randers, J. et Behrens, WW (1972). Les limites de la croissance : un rapport pour le projet du Club de Rome sur la situation difficile de l'humanité. Livres de l'Univers.

MetaSD. (2019). monde3-03. Extrait de <https://metasd.com/tag/world3/>

Moles, P., & Terry, N. (1997). Le manuel des termes financiers internationaux. L'université d'Oxford Presse.

Montresor, F. (2014, 14 août). 14 prédictions technologiques pour notre monde en 2020. <https://www.weforum.org/agenda/2014/08/14-technology-predictions-2020/>

Nizzetto, L., Langaas, S. et Futter, M. (2016). Pollution : Les microplastiques se répandent-ils sur les sols agricoles ? *Nature*, 537. doi : 10.1038/537488b

Norgard, J., Peet, J., & Ragnarsdóttir, K. (2010). L'histoire des limites à la croissance. *Solutions*, 1(2), 59–63. <https://www.thesolutionsjournal.com/article/the-history-of-the-limits-to-growth/>

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2017). Réforme fiscale environnementale : Progrès, perspectives et écueils. <http://www.oecd.org/tax/tax-policy/environmental-fiscal-reform-progress-prospects-and-pitfalls.htm>

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2018). Taux effectifs de carbone 2018 : tarification des émissions de carbone par le biais de taxes et d'échanges de droits d'émission. Éditions OCDE : Paris. doi:10.1787/9789264305304-fr.

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2020). Perspectives économiques de l'OCDE, rapport intermédiaire, mars 2020. [https://www.oecd-ilibrary.org/economie/oecd-perspectives-economiques/volume-2019/issue-2\\_7969896b-en](https://www.oecd-ilibrary.org/economie/oecd-perspectives-economiques/volume-2019/issue-2_7969896b-en)

Otto, I., Donges, J., Cremades, R., Bhowmik, A., Hewitt, R., Lucht, W., . . . Schellnhuber, H. (2020). Dynamique de basculement social pour stabiliser le climat de la Terre d'ici 2050. *Actes de l'Académie nationale des sciences des États-Unis d'Amérique*, 117(5), 2354–2365.

Passell, P., Roberts, M. et Ross, L. (1972). Les limites de la croissance. *Le New York Times*. Extrait de <https://www.nytimes.com/1972/04/02/archives/the-limits-to-growth-a-report-for-the-club-of-romes-project-on-the.html>

Pasqualino, R., Jones, A., Monasterolo, I. et Phillips, A. (2015). Comprendre les systèmes mondiaux aujourd'hui—Un étalonnage du modèle World3-03 entre 1995 et 2012. *Sustainability*, 7, 9864–9889. doi : 10.3390/su7089864.

Pearce, F. (2019). Alors que le changement climatique s'aggrave, une cascade de points de basculement se profile. <https://e360.yale.edu/features/as-climate-changes-worsens-a-cascade-of-tipping-points-se-profile>

- Randers, J. (2000). Des limites à la croissance au développement durable ou DD (sustainable développement) dans une perspective DD (dynamique des systèmes). Examen de la dynamique du système, 16, 213–224.
- Randers, J. (2012). 2052 : Une prévision globale pour les quarante prochaines années. Éditions vertes de Chelsea Co.
- Simmons, MR (2000). Revisiter les limites de la croissance : le Club de Rome aurait-il pu avoir raison, après tout ? Mud City Press. <http://www.mudcitypress.com/PDF/clubofrome.pdf>
- En ligneSmillie, S. (2017). De la mer à l'assiette : comment le plastique s'est introduit dans nos poissons. Le gardien. <https://www.theguardian.com/lifeandstyle/2017/feb/14/sea-to-plate-plastic-got-into-fish>
- Solow, RM (1973). La fin du monde est-elle proche ? Défi, 16, 39–50. est ce que je: 10.1080/05775132.1973.11469961.
- En ligneStern, J. (1994). Apprentissage dans et sur les systèmes complexes. Examen de la dynamique du système, 10, 291–330. doi:10.1002/sdr.4260100214
- Sverdrup, H., & Ragnarsdóttir, K. (2014). Les ressources naturelles dans une perspective planétaire. Perspectives géochimiques, 3, 129–341. doi : 7185/geochempersp.3.2.
- Tans, P., & Keeling, R. (2019). Moyenne annuelle des données moyennes mondiales sur la surface marine. [Fichier de données]. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>
- "Beaucoup de morosité". (1997, 18 décembre). Extrait de <https://www.economist.com/christmas/spéciaux/1997/12/18/beaucoup-de-morosité>
- Turner, GM (2008). Une comparaison des Limites de la croissance avec 30 ans de réalité. Changement environnemental mondial, 18, 397–411.
- Turner, GM (2012). Au bord de l'effondrement mondial ? Mise à jour de la comparaison des limites à la croissance avec les données historiques. Gaïa, 21(2), 116–124. [https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ecosystem-management-dam/documents/EducationDOC/Readings\\_DOC/Turner\\_2012\\_GAIA\\_LimitsToGrowth.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ecosystem-management-dam/documents/EducationDOC/Readings_DOC/Turner_2012_GAIA_LimitsToGrowth.pdf)
- Turner, G. (2014). L'effondrement mondial est-il imminent ? Institut de la société durable de Melbourne, The Université de Melbourne. [http://sustainable.unimelb.edu.au/sites/default/files/docs/MSSI\\_ResearchPaper-4\\_Turner\\_2014.pdf](http://sustainable.unimelb.edu.au/sites/default/files/docs/MSSI_ResearchPaper-4_Turner_2014.pdf)
- Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, Division de la population (UN DESA PD). (2019). Population totale – Les deux sexes [Datafile]. [https://population.un.org/wpp/Download/Files/1\\_Indicators%20\(Standard\)/EXCEL\\_FILE/S/1\\_Population/WPP2019\\_POP\\_F01\\_1\\_TOTAL\\_POPULATION\\_BOTH\\_SEXES.xlsx](https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20(Standard)/EXCEL_FILE/S/1_Population/WPP2019_POP_F01_1_TOTAL_POPULATION_BOTH_SEXES.xlsx)

Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). (2019a). Données sur le développement humain (1990–2017). <http://hdr.undp.org/en/data>

Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). (2019b). Indice de l'éducation (1990–2017). <http://hdr.undp.org/en/content/education-index>

Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). (2019c). Notes techniques. (Indices et indicateurs du développement humain : mise à jour statistique 2018). [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2018\\_technical\\_notes.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2018_technical_notes.pdf)

Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). (2019d). Questions fréquemment posées - Indice de développement humain (IDH). [http://hdr.undp.org/en/faq-page/human-development index-hdi#t292n2872](http://hdr.undp.org/en/faq-page/human-development-index-hdi#t292n2872)

Programme des Nations Unies pour l'environnement. (2002). Perspectives de l'environnement mondial 3. <https://www.unenvironment.org/resources/global-environment-outlook-3>

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI). (2019a). Base de données sélectionnée : INDSTAT 2 2019, ISIC Revision 3. Récupérable sur <https://stat.unido.org/database/INDSTAT%202%202019,%20ISIC%20Revision%203>

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI). (2019b). Base de données sélectionnée : MVA 2019, Fabrication. <https://stat.unido.org/database/MVA%202019,%20Manufacturing>

Service géologique des États-Unis (USGS). (2019). Statistiques historiques sur les minéraux et les matériaux marchands aux États-Unis. Extrait de [https://www.usgs.gov/centers/nmic/historical-statistics-mineral-and-material products-united-states](https://www.usgs.gov/centers/nmic/historical-statistics-mineral-and-material-products-united-states)

van Sebillé, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, BD, van Franeker, JA, ...Law, KL (2015). Un inventaire mondial des petits débris plastiques flottants. *Lettres de recherche environnementale*, 10(12).

Vensim. (2019). Téléchargements gratuits. <https://vensim.com/free-download/>

Westley, F., Olsson, P., Folke, C., Homer-Dixon, T., Vredenburg, H., Loorbach, D., . . . En ligneLeeuw, S. (2011). Basculer vers la durabilité : nouvelles voies de transformation. *AMBIO*, 40(7), 762–780.

Banque mondiale (BM). (2019a). Population totale. Extrait de <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>

Banque mondiale (BM). (2019b). Taux de natalité, brut (pour 1 000 personnes). <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.CBRT.IN>

Banque mondiale (BM). (2019c). Taux de mortalité, brut (pour 1 000 personnes).  
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.CDRT.IN>

Banque mondiale (BM). (2019d). Formation brute de capital fixe (USD constants de 2010). <https://data.worldbank.org/indicator/NE.GDI.FTOT.KD>

Banque mondiale (BM). (2019e). Dépenses publiques d'éducation, total (% du PIB).  
<https://data.worldbank.org/indicator/SE.XPD.TOTL.GD.ZS>

Banque mondiale (BM). (2019f). Dépenses publiques de santé, total (% du PIB).  
<https://data.worldbank.org/indicator/SH.XPD.CHEX.GD.ZS>

Banque mondiale (BM). (2019g). [Fichiers de données]. Fichiers Excel inédits. Récupérable auprès de la Banque mondiale à la demande.

Banque mondiale (BM). (2019h). Perspectives économiques mondiales : croissance lente, défis politiques. <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects#overview>

Forum économique mondial. (2015). Changement profond : points de basculement technologique et impact sociétal.  
[http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_GAC15\\_Technological\\_Tipping\\_Points\\_report\\_2015.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf)

Wright, SL et Kelly, FJ (2017a). Plastique et santé humaine : un micro-enjeu ? Environnement  
Science et technologie, 51. doi:10.1021/acs.est.7b00423pmid:28531345

Wright, SL et Kelly, FJ (2017b). Menace pour la santé humaine des plastiques environnementaux. BMJ, 358(4334). doi : <https://doi-org.ezp-prod1.hul.harvard.edu/10.1136/bmj.j4334>

## 8. INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Il existe deux fichiers SI pour cet article, un document Word et un document Excel. Ceux-ci peuvent être trouvés sur

la page de l'article publié du Journal of Industrial Ecology à

<https://doi.org/10.1111/jiec.13084>

Le Word SI fournit les graphiques de chacune des dix variables par rapport aux quatre scénarios, et

traite de la fiabilité des sources de données. L'Excel SI contient les tableaux de données de la figure 2 dans le

texte principal et dans le Word SI.

9. Légendes des figures

Figure 1. Scénarios BAU, BAU2, CT et SW. Adapté par de Limits to Growth: The 30-

Mise à jour de l'année (p. 169, 173, 219, p.245), par Meadows, DH, Meadows, DL, & Randers, J.,

2004, Chelsea Green Publishing Co. Copyright 2004 par Dennis Meadows. Adapté avec

autorisation. .... 8

Figure 2. Mesure de précision 2 : NRMSD. Tracé pour chaque scénario et variable proxy. Données

la visualisation a été facilitée par le complément XL Toolbox de Daniel pour Excel, version 7.3.4, par Daniel Kraus,

Würzburg, Allemagne ([www.xltoolbox.net](http://www.xltoolbox.net)). .... 20