

	Fiche info - titre :	<u>Date :</u> 07/06/2016
	Auteur : Source : http://loic-steffan.fr/WordPress3/leffondrement-global-est-il-imminent/	

Une comparaison actualisée des « *Limites de la Croissance* » avec les données historiques

L'effondrement global est-il imminent ?

Research Paper No. 4 August 2014

About MSSI Research Papers

MSSI's Research Papers Series is a key communication initiative of the Melbourne Sustainable Society Institute, aimed at stimulating thought and discussion within the University of Melbourne and broader community and showcasing the scholarship of MSSI. Editor Dr Lauren Rickards, Melbourne Sustainable Society Institute, Lauren.Rickards@unimelb.edu.au Author Dr Graham M. Turner is a Principal Research Fellow at the Melbourne Sustainable Society Institute, University of Melbourne, Australia.

Acknowledgments This Paper draws substantially on the following publication, with additional material incorporated: Turner G 2012, On the cusp of global collapse? Updated comparison of the Limits to Growth with historical data. *GAiA*, 21, pp. 116-124.

Citing this report Please cite this paper as Turner, G. (2014) 'Is Global Collapse Imminent?', MSSI Research Paper No. 4, Melbourne Sustainable Society Institute, The University of Melbourne.

ISBN: 978 0 7340 4940 7

traduction Patrick Soullignac Loïc Steffan

Résumé

Le scénario « modèle standard » (business-as-usual ou BAU) des «limites de la croissance» produit il a 40 ans correspond parfaitement avec les données historiques qui ont été collectées pour cet article. Le scénario BAU produit un effondrement de l'économie globale et de l'environnement (avec des niveaux de vie qui chutent dramatiquement plus vite que ce qu'ils progressèrent historiquement car les fonctions économiques classiques cessent de fonctionner), entraînant une chute importante de la population mondiale. Bien que la baisse de la population modélisée survient vers 2030 —avec une augmentation des taux de mortalité à partir de 2020, inversant les tendances contemporaines— le début généralisé de l'effondrement apparaît vers 2015 quand la production industrielle par individu chute lourdement. Compte tenu de cette synchronisation alarmante, une autre question que pose cet article est de savoir si les difficultés économiques de la crise financière mondiale sont liées aux mécanismes mis en avant par le scénario BAU des limites de la croissance. En particulier, les analyses contemporaines sur le pic pétrolier et l'énergie nette ou le rapport à l'énergie investie vont dans le sens de la modélisation des limites de la croissance, soulignant ainsi l'effondrement.

Vérification des limites de la croissance

Avec plus de quarante ans de recul disponibles depuis la publication des limites de la croissance (LTG) (Meadows et al., 1972, Meadows et al., 1974), il est opportun d'examiner la façon dont la société et l'économie ont suivi le chemin dessiné par cette modélisation révolutionnaire de divers scénarii, et d'examiner si, à la fois l'économie et la population sont sur le chemin de l'effondrement ou de la soutenabilité. Sur une période identique, des efforts de recherches internationales basées sur une série de résultats de conférences des Nations Unies (ONU) ont produit au mieux des résultats mitigés (Linner et Selin, 2013, Meadowcroft, 2013). Par ailleurs, en plus des contraintes et problèmes environnementaux critiques et non résolus tels que le changement climatique d'origine anthropique et le pic pétrolier, l'économie mondiale doit faire face aux défis posés par la crise financière mondiale (Global financial crisis GFC), dont l'un des plus graves est le niveau colossal des dettes. Les préconisations classiques des politiques standards, ont des conséquences potentielles pour la stabilité de l'environnement, avec des rétroactions négatives évidentes sur l'économie. Les dépendances de l'interconnexion économie-environnement contenues dans le modèle LTG des années soixante-dix offrent l'occasion d'examiner comment la situation mondiale s'est déployée dans le temps et ce que cela pourrait signifier pour l'avenir.

Grâce à une douzaine de scénarii simulés dans un modèle global (appelé World3) entrelaçant économie et environnement Meadows et al. (1972, p. 125) ont montré que «dépassement et effondrement» était évitables à la condition d'un changement drastique de comportement social et si des progrès technologiques étaient obtenus bien en amont des problèmes de ressources ou des problèmes environnementaux. Si cela n'est pas obtenu dans les scénarii simulés, l'effondrement de l'économie et de la population (c'est à dire une chute rapide) survient au 21^{ème} siècle, détériorant alors les conditions de vie pour revenir à niveau semblable à celui observé au début du 20^{ème} siècle, selon les conditions moyennes mondiales modélisées. La façon exacte dont cela pourrait survenir dans le monde réel, permet des conjectures comme nous le notons ci-dessous.

En dépit du fait que LTG devint un best-seller, le travail fut ensuite relégué dans la «poubelle de l'histoire» par de nombreuses critiques (par exemple Lomborg et Rubin, 2002). Ces critiques ont créé un mythe public selon lequel LTG s'était trompé. Elles disaient que LTG avait prévu que l'effondrement surviendrait bien avant les années 2000, alors que ce n'était pas le cas. Ugo Bardi dans «les limites de la croissance revisitées» (2011) détaille les divers efforts qui furent entrepris pour discréditer l'étude.

Il établit des parallèles avec les cas documentés des campagnes contre la science du changement climatique, ou celles sur l'impact du tabac sur la santé. Trois économistes – Peter Passel, Marc Roberts, et Leonard Ross– initièrent des critiques dans un article de recension du dimanche du New York Times. Ils firent de fausses affirmations (par exemple « tous les scénarii du modèle Meadows mènent invariablement à l'effondrement »), ou encore que le livre indiquait un effondrement de nombreuses ressources à l'orée des années 1990. L'économiste américain William Nordhaus fit des jugements techniquement erronés (en 1992) en isolant des équations dans World3 sans tenir compte de l'influence réciproques des équations et des rétroactions dans le reste du modèle.

En 1973, une critique de LTG, éditée par le physicien Sam Cole et ses collègues de l'Université de Sussex, contenait un examen technique de la modélisation et des essais World3 en attaquant personnellement les auteurs. Selon Bardi, l'examen technique échoua car il ne pouvait pas être validé par des modélisations linéaires, test non probant pour un modèle non-linéaire. La recension établit aussi que le modèle ne pouvait fonctionner en arrière ce qui est une condition inutile pour fonctionner vers l'avenir. La critique de l'étude LTG a continué pendant environ deux décennies, y compris par des économistes de renom tel Julian Simon,

sur le mode de l'incompréhensions et de l'attaques personnelles. Pour la dernière décennie du 20^{ème} siècle, les critiques de LTG se centrèrent sur le mythe que les travaux de 1972 avaient prédit une raréfaction des ressources et un effondrement à la fin du 20^{ème} siècle. Bardi identifia comme point de départ de ce type d'attaque un article de Ronald Baley paru dans le magazine Forbes en 1989 et intitulé « monsieur catastrophe ». Dès lors, il fut largement promu par des commentateurs populaires comme le statisticien danois Bjørn Lomborg, et même dans des parutions à comité de lecture, des rapports d'organisations environnementales et des textes d'enseignements.

Durant la dernière décennie, il y a eu un retour en grâce, une attention et une compréhension nouvelle à l'égard de LTG. Plus récemment, Randers (2012a) —un des co-auteurs de LTG— a publié une prévision de la situation globale en 2052, renouvelant les enseignements de la publication originale (Randers 2012b). Un renversement dans le débat a eu lieu en 2000 quand Simon (2000), le spécialiste de l'énergie émis l'idée que le modèle était plus robuste que la perception que l'on en avait généralement. D'autres ont émis des évaluations plus complètes des conclusions du modèle (Hall and Day, 2009, Turner, 2008). En effet, mon précédent travail montrait que trente ans de données s'alignaient très bien avec les conclusions du « scénario standard » de LTG. Le modèle standard incarne les pratiques économiques business-as-usual (BAU), de la période historique qui sert de calibrage (1900 à 1970) avec le scénario modélisé à partir de 1970.

Cet article présente une actualisation des données utilisées par Turner dans version précédente (2008). Une mise à jour est particulièrement pertinente aujourd'hui en raison des questions soulevées par la manière dont la récession actuelle —couramment associée à la crise financière globale (GFC)— peut correspondre à l'apparition d'un effondrement dans le scénario BAU de LTG. Est-il possible que ce qui mène à l'effondrement dans le scénario BAU de LGT ait contribué à la crise économique liée à la GFC ? Ce ralentissement serait-il un signe avant coureur de l'effondrement modélisé dans LTG ?

Pour expliciter le contexte et souligner l'importance d'appréhender les dynamiques globales, cet article résume d'abord les mécanismes qui se jouent dans le scénario BAU modélisé. Ensuite, la trajectoire modélisée est comparée avec une quarantaine d'années de données historiques (qui sont décrites dans l'appendice). L'appendice fournit aussi la comparaison des données avec deux autres scénarii, nommé « technologie intelligente » et « monde stabilisé » (avec tous les détails dans l'article Turner, 2012) — qui montre que le scénario BAU est le plus pertinent après comparaison. Sur la base de cette comparaison, nous discuterons les conséquences pour un monde soumis à des contraintes de ressources limitées. En, particulier, le document a examiné la question du pic pétrolier et le lien entre le retour en énergie de l'investissement (EROI) et le modèle LTG World3. Les découvertes opérées conduisent à un débat sur le rôle du pétrole dans les contraintes de la crise financière (GFC), et à des considérations sur le lien entre ces contraintes et l'effondrement généralisé décrit dans LTG. Cet article n'a pas pour but de répondre aux critiques mais de réfléchir à la question controversée de la gouvernance appropriée; un autre aspect de la recherche est d'éclairer les difficultés qui empêchent le changement (par exemple Harich, 2010, Rickards et al., 2014). A la place, il vise à prévenir un effondrement global potentiel, — peut être plus imminent que ce que nous admettons généralement— dans l'espoir que cela puisse stimuler le changement, ou tout du moins préparer les lecteurs pour les pires résultats probables.

Modéliser des mondes futurs

Le modèle informatique World3, développé pour l'étude LTG, simulait de nombreuses interactions et données au sein et entre les sous-systèmes clés de l'économie mondiale: population, capital industriel, pollution, systèmes agricoles et ressources non renouvelables. A son époque, World3 était nécessairement sommaire. Par exemple, il modélisait la population mondiale totale plutôt que des régions ou des nations

distinctes. Dans l'approche systémique dynamique, les liens de causalité ont été modélisés mathématiquement pour refléter l'influence d'une variable sur une autre (pas nécessairement de façon linéaire), à la fois à l'intérieur et entre les différents secteurs du système économique mondial. De cette façon, des liens de rétroaction positives et négatives ont été établies, où le résultat dans une partie du système affecte les autres résultats et lui-même par une chaîne d'influences réciproques. Lorsque des boucles de rétroaction positives et négatives sont finement réglées, il en résulte des résultats stables (ou des oscillations autour de la moyenne); cependant, quand une boucle domine, il en résulte un état instable. C'est le cas par exemple de la croissance exponentielle qui génère une rétroaction positive dominante. Un autre exemple classique est l'accélération de la croissance d'une population biologique, tels que les bactéries, pour laquelle le taux de natalité à un moment donné est proportionnel à la taille de la population à ce moment-là. L'effet et le contrôle de ces évaluations dépendent de la présence « d'effets retards » dans les signaux d'une partie du système mondial à l'autre. Par exemple, les effets de l'augmentation des niveaux de pollution sur l'espérance de vie humaine ou la production agricole ne peuvent être connus que quelques décennies après l'émission de la pollution. Ceci est important. Si les effets sont anticipés et des mesures préventives sont prises à l'avance, les niveaux croissants de polluants ne peuvent pas se développer dans des proportions qui interdisent une action corrective. Ce sont les dynamiques qui conduisent au dépassement et à l'effondrement.

Le modèle world3 simulait un stock de ressources renouvelables ainsi qu'un stock de ressources non renouvelables. La fonction des ressources renouvelables dans World3, comme les terres agricoles ou les arbres, peut s'altérer à cause de l'activité économique. Mais ils peuvent retrouver leur potentialité si des mesures préventives sont prises ou si on réduit les activités nuisibles à leur potentiel. Le niveau de récupération par rapport au niveau de dégradation est affecté quand les seuils de danger ou les limites sont dépassés. Ainsi résulte l'ampleur de tout effondrement potentiel.

Pour explorer « les principaux modes de comportement du système population-capital » (Meadows et al. 1972, 91), le livre LTG présente une douzaine de scénarii et explore les effets de diverses améliorations technologiques et de changements sociétaux ou politiques. La série de scénarii démarre un modèle standard qui insère les valeurs BAU dans le modèle pour le futur. Les paramètres pour ce scénario étaient basés sur les données historiques et les comportements (établis pour reproduire approximativement la croissance et les dynamiques observées de 1900 à 1970).

L'effondrement imminent qui découle du scénario BAU

Comme nous le décrivons ci-dessous, les données issues des quarante dernières années depuis la parution de l'étude LTG ont été complétées et permettent d'indiquer que le monde suit le scénario BAU. Dans celui-ci, au cours du 20ème siècle, l'augmentation de la population et de la richesse matérielle permet d'augmenter la production industrielle à un rythme plus rapide que la population. La pollution de l'activité économique augmente mais à d'un niveau très bas, et cela n'affecte pas la population ou l'environnement.

Cependant, l'augmentation de l'activité économique demande toujours plus de ressources (même si on observe un gain d'efficacité), et l'extraction de ressources demande de mobiliser du capital (machines) qui sont produites par le secteur industriel (qui produit également des biens de consommation).

Tant que les ressources renouvelables ne sont pas réduites à moins de 50 % du niveau initial ou final, le modèle World3 suppose qu'une faible partie (5%) du capital est alloué au secteur de l'extraction, simulant ainsi un accès facile à de nombreuses ressources de qualité ainsi qu'à l'amélioration de l'efficacité des techniques d'investigation et d'extraction. Cependant, lorsque les ressources tombent à moins de 50 % au début du 21ème siècle et qu'elles deviennent plus difficiles à extraire et à mettre en œuvre, le capital nécessaire commence à augmenter. Par exemple, lorsque la ressource descend en dessous de 30 % du stock

initial ; la fraction du capital nécessaire pour l'extraction attribué par le modèle au secteur extractif atteint 50 % et continue à augmenter au fur et à mesure que le stock diminue (indiqué dans Meadows et al., 1974).

Avec une part significative du capital qui va vers le secteur d'extraction des ressources, il n'y a plus suffisamment de capital disponible pour remplacer entièrement l'obsolescence des machines et du capital dans le secteur industriel lui-même. Par conséquent, malgré l'activité industrielle accrue qui tache de satisfaire les multiples demandes de tous les secteurs et de la population, la production disponible (par individu) commence à chuter précipitamment à partir de 2015, alors que la pollution générée par l'activité industrielle continue de croître.

La réduction des apports à l'agriculture au profit de l'industrie, combinée à la pollution des terres agricoles conduit à une baisse des rendements agricoles et à une baisse de la nourriture disponible par habitant.

De même, les services (par exemple la santé et l'éducation) ne sont pas maintenus à leur niveau par manque de capital et de ressources. La diminution de l'offre de services et de nourriture par individu produit une augmentation de la mortalité aux alentours de 2020 (et une hausse plus faible du taux de natalité, en raison d'une politique de contrôle et de limitation des naissances. La population mondiale se réduit alors d'environ un demi milliard d'individus par décennie à partir de 2030. Après l'effondrement, les résultats du modèle BAU (fig. 1) montrent que le niveau de vie moyen de la population (richesse matérielle, nourriture et services par individu standard selon l'OCDE) s'approche de ceux observés au tout début du 20ème siècle.

Les implications du scénario BAU sont frappantes : la fig 1 illustre l'effondrement global du système économique et de la population. Cet effondrement est essentiellement causé par le manque de ressources (Meadows et al., 1972) si nous suivons les interactions décrites ci-dessus.

La dynamique qui est calibrée par les paramètres reflète les observations dans l'économie qui passe de l'abondance à la rareté (Meadows et al., 1972), montrant que les prix modélisés sont le canal de transmission des réponses économiques.

Le scénario « business As Usual » de LTG suit la réalité

Après cinquante ans écoulés depuis la modélisation initiale de LTG, il est opportun d'examiner à quel point les scénarii reflètent la réalité. Dans cette partie, nous présentons une comparaison graphique des données historiques avec le scénario BAU décrit ci-dessous (Fig 1) Il paraît évident que les données correspondent fortement avec le scénario BAU (pour la plupart des variables); alors que les données ne correspondent pas avec les deux autres scénarii (Turner, 2012, Turner, 2008) (voir appendice 1)

Les variables démographiques fournies dans la fig.1 indiquent les même comparaisons que celles aperçues par la comparaison sur trente ans (Turner 2008), de telle sorte que la population devrait atteindre un maximum vers 2030 ou un peu plus tard si on extrapole des différences entre les taux de natalité et les taux de mortalité. Il semble cependant évident aujourd'hui que le taux brut de mortalité s'élève fortement alors que le taux de naissance continue à chuter, ce qui est la tendance observée dans les 3 scénarii, mais avec des niveaux différents. Notamment, le taux de mortalité qui cesse son déclin linéaire et commence à augmenter fortement après une décennie. De manière significative, dans le scénario au déroulement standard (et de la technologie globale) à partir de 2020.

Les résultats du système économique (fig 1) montrent que les principales tendances sont en rapport avec le scénario BAU de LTG. Il est important de noter que le ralentissement de l'activité économique lié à la crise financière globale, n'ont pas été saisi dans les données historiques puisque ceux-ci ne sont disponibles que pour 2007. Néanmoins, la production industrielle par individu illustre un ralentissement du taux de croissance du BAU qui passe par un maximum. Dans ce scénario, la production industrielle par habitant s'inverse puis

baisse substantiellement à partir de 2015. La nourriture par habitant est conforme au scénario BAU de LTG, avec un approvisionnement alimentaire qui croît légèrement plus vite que la population. Les taux d'alphabétisation plafonnent tandis que la production électrique par tête (la courbe supérieure des données) croît plus rapidement en adéquation avec le modèle LTG (fig.1)

La pollution globale mesurée par la concentration de CO₂ est totalement compatible avec le scénario BAU (fig1), mais l'actualisation des 10 dernières années montre qu'elle augmente un peu moins vite que ce que nous avons modélisé. Cela peut être lié à plusieurs facteurs qui ne peuvent pas être identifiés séparément dans cette analyse. Par exemple, en comparant les résultats du modèle BAU, une production industrielle par tête inférieure est cohérente avec une moindre pollution mais cet effet peut être compensé par une augmentation réelle plus rapide pour la population. Il est aussi envisageable, que la dynamique de production de la pollution persistante par les différentes activités économique ou son assimilation par l'environnement ne soient pas paramétrées correctement dans le modèle World 3 en terme de dynamique réelle de CO₂ (ce qui constitue un sujet actif de recherche). Dans cette éventualité, les données récentes sont compatibles avec un taux d'assimilation plus important par l'environnement ou alors, avec une production de pollution plus faible dans l'agriculture ou l'industrie (puisque le taux relatif de production alimentaire est supérieur à la production industrielle).

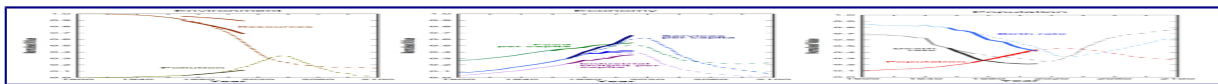


Figure 1. scénario BAU de LTG (scénario standard) (lignes en pointillés) comparé aux données historiques de 1970 à 2010 (lignes continues)—pour les variables démographiques: population, taux brut de natalité, taux brut de mortalité; pour les variables économiques: production industrielle per capita, nourriture per capita, services per capita (Courbe supérieure: électricité p.c.; courbes inférieures: taux d'alphabétisation des adultes et des jeunes [la courbe de données la plus basse]); pour les variables environnementales: pollution persistante globale, fraction de ressources non-renouvelables restantes (la courbe la plus haute utilise une limite supérieure de 150,000 EJ pour les ressources ultimes d'énergie; la courbe inférieure utilise une limite inférieure de 60,000 EJ [Turner 2008]).

Quelle que soit l'explication, le niveau de pollution mondiale est suffisamment faible (dans tous les scénarios et les données) pour ne avoir d'impact trop important sur l'environnement et l'espérance de vie (Turner 2008).

En revanche, les deux courbes de données pour les ressources non renouvelables indiquent un ajustement plus fin avec le modèle BAU (alors que l'estimation supérieure correspond bien avec le modèle d'une technologie qui s'adapte [fig1]). L'estimation base montre aussi une chute importante vers le point auquel le modèle World3 intègre une diversification croissance du capital dans le secteur des ressources naturelles afin d'extraire des ressources moins accessibles. (50 à 60 % de la ressource initiale; voir Meadows et al, 1974 fig -18). Il s'agit de la cause principale de l'effondrement dans le scénario BAU, décrit ci-dessus. Les données observées sont basées sur les ressources énergétiques (voir la discussion Turner 2008, P405-407), qui suppose une substituabilité parfaite entre les différents types d'énergies primaires. Cette hypothèse n'est pas tout à fait exacte (par exemple pour le transport (principalement du pétrole), car le carburant est essentiel pour le bon fonctionnement de l'économie. Les sections suivantes traiteront ce problème.

Nous faisons confiance à l'étalonnage des paramètres.

La comparaison remarquable établie ci-dessus indique que le travail initial de LTG ne peut pas être réfuté comme de nombreuses critiques ont tenté de le faire. Cela augmente la confiance envers la modélisation de LTG. Il faut noter qu'aucun autre modèle n'a démontré une telle adéquation avec les données de long terme.

Cependant, cette justesse n'est pas une validation complète du modèle BAU de LTG (en partie à cause de la non linéarité du modèle World3). Réussir une validation complète signifie que les paramètres initiaux principaux et la non linéarité (les seuils) soient vérifiés. Cette vérification est partiellement effectuée ci-dessous avec un examen des paramètres sur l'extraction des ressources.

Malgré la non-linéarité du modèle World3, les résultats généraux des scénarii ne sont pas sensibles aux aléas normaux liés aux paramètres clés (Meadows et al. 1974). Cependant, des critiques continuent de questionner la valeur scientifique de la modélisation LTG en se basant sur la sensibilité perçue du modèle (De Jongh 1978; Vermeulen et De Jongh, 1976) en indiquant que le modèle est trop sensible à une modification des paramètres. Par exemple, en modifiant de seulement 10 % à partir de 1970 trois paramètres dans le secteur industriel, il est possible de modifier substantiellement les résultats du modèle World3. En reproduisant ces changements je n'ai pas observé que nous pouvions éviter le dépassement et l'effondrement contrairement à ce qu'affirmaient les critiques (Turner 2013). A lieu de cela, un examen attentif des résultats indiquent que le dépassement et l'effondrement sont justes retardés, et la raison principale de cela est que la production per capita (une approximation de la richesse matérielle) reste constante sur plusieurs décennies avant de décliner. En effet, les critiques travaillent un scénario de « monde stabilisé » où la consommation se réduit, mais ils ne reconnaissent pas l'erreur.

En outre, les critiques sur la sensibilité des paramètres sont contredites par l'adéquation sur 40 ans des données indépendantes au modèle LTG; si le modèle était trop sensible, nous ne pourrions pas obtenir ces résultats. Pour résoudre ce paradoxe apparent, il est crucial de reconnaître que le modèle World3 a été calibré comme un système global en fonction des données et tendances de 1900 à 1970. Cet étalonnage qui déduit les paramètres à partir des données —ce qui génère des interrogations est reconnu par tout le monde y compris les auteurs de LTG— mais le plus important est que les résultats (population, nourriture, ressources, etc.) fournissent des valeurs compatibles avec les données observées. Un sous-ensemble du modèle doit fonctionner comme un contrôle efficace des autres sous-systèmes du modèle. Le calibrage total du modèle contraint les valeurs possibles des variables. Cela ne veut pas dire qu'un paramètre est connu avec plus de précision, ce qui n'est pas le cas. Au contraire, c'est la qualité des interactions qui importe le plus. C'est un élément essentiel que Bardi (2011) a examiné dans sa revue des critiques initiales de LTG (par exemple, la nécessité d'appréhender le système dans son ensemble sans isoler un sous-système avec aucune référence au reste du système).

Par ailleurs, il y a des principes généraux de contrôle des systèmes qui s'appliquent malgré la sensibilité ou l'incertitude autour des spécificités des trajectoires futures des systèmes. C'est une spécificité des systèmes avec des mécanismes de renforcement ou d'autocorrection (par exemple rétroactions positives ou négatives, de la croissance antérieure) qui vont déstabiliser l'équilibre de long terme s'il y a des réactions trop tardives aux signaux négatifs. Si c'est le cas, il devient inévitable que le système produise une correction en chutant ou en s'effondrant en dessous de l'équilibre.

L'effondrement est-il probable et imminent ? Examen des mécanismes derrière l'effondrement prochain dans le scénario BAU

En se basant sur la comparaison des données observées et les scénarii LTG présentés ci-dessus et compte tenu de la façon dont le scénario BAU donne une meilleure correspondance que les deux autres scénarii, il semble que l'économie et la population mondiale soient sur le point de s'effondrer. Cela contraste avec d'autres prévisions mondiales qui donnent des trajectoires plus longues avant un éventuel effondrement au delà de 2050 (par exemple Raskin et al 2010, Randers 2012). Randers par exemple, prévoit un effondrement après 2050, en se basant sur l'impact du changement climatique, avec des caractéristiques proches du scénario

d'adaptation des technologie du modèle LTG. Cette section examine donc de plus précisément les mécanismes sous-jacent de l'effondrement du scénario BAU et explore si ces mécanismes correspondent au développement actuellement du monde réel.

Evolution du monde réel – pic pétrolier

Après confirmé un alignement significatif de 40 ans de données avec le scénario BAU, et avoir établi que le modèle n'a pas une sensibilité problématique, cette section étudie maintenant si les principales dynamiques qui sous-tendent la répartition ci-dessus ressemblent au développement réel. Comme l'effondrement dans le scénario BAU est principalement associé à la contrainte de ressources et le transfert des capitaux vers le secteur extractif, il est important d'examiner le pic pétrolier (ou les autres pics de ressources). Le pic pétrolier se réfère au pic de production de pétrole (particulièrement celui du l'offre conventionnelle), par opposition à la demande qui est supposée augmenter continuellement. Les publications sur le pic pétrolier ces dernières années ont accrédité la possibilité d'un pic mondial (par exemple par l'Agence Internationale de l'Énergie jugée conservatrice) (Alexander, 2014). Ces publications ont tendance à se concentrer sur la question de savoir si le pic pétrolier est bien en train de se produire et quel sera le volume d'approvisionnement en pétrole disponible. Sorrell et al (2010a, 2010b) examinent un grand nombre de ces rapports et montre que les chercheurs indépendants attendent généralement le pic dans la décennie qui vient ou estiment qu'il s'est déjà produit (Sorrell et al., 2010a, Sorrell et al., 2010b, Murray et King, 2012). Les estimations fournies par l'industrie pétrolière se situent dans quelques décennies. Malheureusement, les productions de pétroles qu'ils estiment eux-mêmes donnent peu de conclusions sur les conséquences de la réduction du taux d'approvisionnement en pétrole sur l'économie, car une offre limitée de carburant qui est omniprésente dans le transport est susceptible d'être néfaste pour les économies mondiales et nationales (Hirsch, 2008, Friedrichs, 2010).

Il est utile de comparer la qualité passée et future de la production de pétrole qui découle du scénario BAU de LTG (fig 2), même si il y a des incertitudes autour des productions spécifiques de pétrole. La production intégrée à LTG a été calculée en utilisant la dérivée des ressources non renouvelables.

La courbe de LTG ressemble au profil de celle d'Hubbert représentée dans la Fig 2 en utilisant une fonction logistique (normalisée à la production cumulative; en fait l'aire sous la courbe). Hubbert prend une ressource finie, avec une croissance exponentielle de la production dans le phase initiale de production (en se basant sur la tendance des données, et en reproduisant les découvertes de ressources. (en fait pic puis déclin) qui conduisent finalement à un fin de la production (Hubbert, 1956). Il conçu initialement des courbes arbitraires basées sur des présupposés de taux de production et des estimations de la ressource ultime. Par la suite, Hubbert a utilisé la fonction logistique mathématiquement plus commode (pour la production cumulée) pour appréhender les propriétés qualitatives des profils de production (Hubbert, 1982).

En comparaison, les taux de production de pétrole à partir des données actuelles et estimées n'atteignent pas le pic et ne chutent pas aussi rapidement, bien que les données indiquent un maximum inférieur en raison d'une production plus rapide ou un pic plus précoce entre 1960 et 1985. La production supplémentaire (par rapport à LTG) dans cette période correspond de très près au déficit de production (en rapport à LTG entre 1990 et 2005). en effet, la production cumulée jusqu'à 2005, ne diffère que de 1%. Les projection de la production de pétrole est basée sur un modèle empirique d'un décalage entre production et découverte des productions (Gargett and Bittre, 2009), dans lequel la production cumulée ne peut pas être supérieur aux découvertes cumulées. Par conséquent, si les découvertes passent par un maximum puis chutent, la production devra faire pareil, même si les taux peuvent évidemment varier. Il ne tient pas compte de la façon dont la production peut varier, contrairement au modèle LTG.

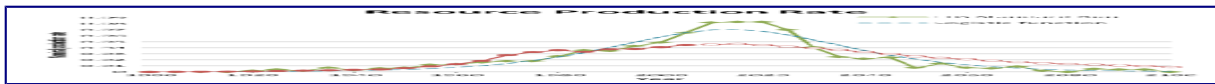


Figure 2. Taux de production de pétrole actuel et projeté découlant de LTG et courbe « selon Hubbert » basée sur une fonction logistique – normalisée pour correspondre à la ressource totale (ie. l'aire sous les courbes)?

Contrairement à d'autres projections de production de pétrole, la courbe LTG n'est pas explicitement assise sur le modèle mais basée sur d'autres dynamiques. La croissance exponentielle se produit d'abord en raison de la demande de l'activité industrielle qui est en croissance exponentielle. La production diminue par la suite à cause de l'effondrement de la demande de l'activité industrielle (voir section suivante). La production de ressources non-renouvelables dans le modèle World3 s'ajuste avec la population en utilisant un coefficient d'utilisation de ressource par individu et celle-ci est une fonction croissante (approximativement linéaire) de la production par individu. Par conséquent, la taux de production suit la production industrielle. Notamment la pénurie de la ressource pétrolière n'existe pas lorsque l'effondrement global commence; Loin de là puisque le taux d'extraction maximal se produit à la moitié des ressources. En outre, comme l'indiquent des commentateurs respectés (The Economist et The guardian), il y a des réserves supplémentaires de combustibles non conventionnels en gaz et en pétrole accessibles par la fracturation hydraulique (Maugeri, 2012). (Ces réserves additionnelles sont incluses dans les données des ressources non renouvelables pour la comparaison indiquée en Fig 1). Une vision optimiste s'exprime récemment pour dire qu'il y aura une nouvelle surabondance de pétrole et de gaz. Cela semble contredire la contrainte de ressources qui sous-tend l'effondrement dans le scénario BAU de LTG. Mais les protagonistes de cette surabondance sur le pétrole et le gaz n'ont pas compris un point crucial. Ils ont confondu le stock et le flux. L'élément important réside dans la vitesse à laquelle la ressource peut être fournie. En clair cela dépend du flux et de tout ce qu'il nécessite de machines, d'énergie ou d'autres intrants pour pouvoir obtenir ce flux. La recherche contemporaine sur l'énergie nécessaire pour extraire et fournir une unité d'énergie à partir du pétrole montre que les entrées nécessaires ont augmenté d'un ordre de grandeur. Peu importe la taille du stock de ressources si elles ne peuvent pas être extraites assez rapidement ou si d'autres ressources nécessaires ailleurs dans l'économie sont utilisées pendant l'extraction. Les optimistes à propos des combustibles non conventionnels notent qu'ils requièrent un prix minimal au voisinage de 70 US\$ le Baril. Ils reconnaissent volontiers que l'époque d'un pétrole bon marché est révolue, sans se rendre compte que les carburants chers sont un signe de contraintes sur l'extraction et les ressources nécessaires. Ce sont ces contraintes qui conduisent à l'effondrement dans le scénario BAU de LTG.

La fin du pétrole facile et l'effondrement global ultérieur

Par conséquent, le « coût d'opportunité » est plus significatif que le taux d'approvisionnement du pétrole en lui-même pour notre analyse. Le « coût d'opportunité » est associé avec l'extraction toujours plus faible de pétrole conventionnel et à la difficulté d'extraire les pétroles non-conventionnels (par exemple, sables bitumineux, pétrole en hauts profonds, pétrole à partir du charbon, etc.) (Murray et King, 2012). Dans le modèle LTG la fraction de capital allouée pour obtenir des ressources (FCAOR) représente ce coût d'opportunité. Dans la littérature sur le pic pétrolier, la mesure pertinente du coût d'opportunité est le retour d'énergie par rapport à l'investissement (EROI) qui correspond à l'énergie nette disponible après avoir retranché l'énergie utilisée à extraire la ressource. (Heun et de Wit, 2012, Dale et al., 2011, Heinberg, 2009, Murphy et Hall, 2011). Le EROI est défini comme le rapport entre l'énergie produite TE_{Prod} et l'énergie investie pour obtenir l'énergie produite $ERes$.

EROI = Retour en énergie de l'énergie investie

$$\frac{TE_{Prod}}{E_{Res}}$$

Le EROI peut être relié au FCAOR utilisé dans LTG. tant que le capital exploité (machines comme les pompes, les véhicules) dans le secteur des ressources, C_{Res} , est représentatif essentiellement du stock global de machines, C_{Ttl} , l'intensité d'énergie sera similaire. Le ratio de capital peut être approximé par le rapport de l'énergie utilisée dans le secteur des ressources, E_{Res} , par rapport à l'énergie totale consommée, TE_{Cons} .

$$\frac{C_{Res}}{C_{Ttl}} \approx \frac{E_{Res}}{TE_{Cons}}$$

FCAOR = fraction du capital utilisé pour obtenir des ressources

Tant que l'énergie totale consommée chaque année est approximativement égale à l'énergie produite (parce que les réserves d'énergie stockées sont relativement faibles et ne changent pas significativement d'une année sur l'autre) $TE_{Cons} \approx TE_{Prod}$, et les équations 1 et 2 donnent :

Les données recueillies et le modèle de EROI de Dale et al. (2011) peuvent alors être convertis en FCAOR à des valeurs qui correspondent à la fraction de ressources de pétrole qui reste. Celles-ci peuvent alors être comparées avec les données utilisées dans le modèle LTG (par exemple voir Meadows et al., 1974, figure 5-18). Si le pic du pétrole conventionnel s'est produit ou est sur le point de survenir, alors approximativement la moitié des ressources ont été consommées. Cela signifie que la ressource non-renouvelable qui reste est $NRFR \approx 0.5$. Les estimations actuelles de l'EROI sont dans une fourchette de 10-20 (ou 1/EROI de 0,1 à 0,05). Ceci correspond avec les valeurs et les tendance du paramètre FCAOR utilisé dans LTG (voir fig. 3).

Par conséquent, au delà des comparaisons des données faites sur les résultats modélisés, ces informations sur l'extraction des données corroborent une facteur clé de la dynamique du scénario BAU de LTG. En d'autres termes, en plus du fait que les résultats du modèle correspondent aux données disponibles, le mécanisme clé qui conduit à l'effondrement dans le scénario BAU de LTG est aussi observé dans les données disponibles dans le monde réel.

Le Rôle limité des innovations dans les énergies alternatives.

Étant donné que le mécanisme clé qui souligne l'effondrement dans le scénario BAU est le déplacement des capitaux vers le secteur extractif avec des ressources qui s'épuisent, il est pertinent d'examiner la sensibilité du scénario à l'évolution de ce facteur. Dans le cas des ressources de pétrole (et de gaz) en particulier, se pourrait-il que l'expansion actuelle des ressources non conventionnelles (huile de schiste, pétrole et gaz de schiste, sables bitumineux, etc) soit suffisante pour compenser le déclin de la production de pétrole conventionnel ? Les critiques sur les ressources conventionnelles portent sur la diminution de l'énergie nette liée à la difficulté d'extraction. Dans la modélisation de LTG cela correspond à la fraction de capital allouée pour obtenir des ressources (FOCAR) qui augmente à mesure que le stock de ressource s'épuise (comme dans le cadre du modèle BAU). Cependant, nous sommes au début du fonctionnement du marché des ressources non conventionnelles. Il est donc plutôt raisonnable d'imaginer que l'expérience accumulée et les nouvelles technologies faciliteront l'extraction. Cela réduira le ratio énergie/capital requis pour chaque baril de pétrole. Cette possibilité a été testée dans le model World3, en utilisant le paramètre (testFOCAR) montré dans la fig.3.

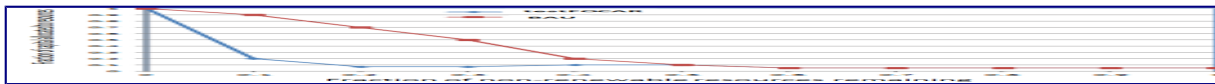


Figure 3 . Augmentation de l'efficacité dans l'extraction des ressources non conventionnelles (courbe bleue) au fur et à mesure que la fraction disponible de ressource décline vers zéro, comparé au paramètre de BAU (rouge).

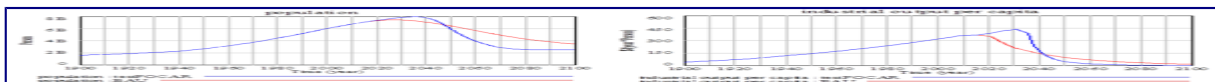


Figure 4 L'effondrement est retardé de 20 ans mais il est pire (en clair falaise de Sénèque), à cause d'une efficacité accrue dans l'accès aux ressources non conventionnelles.

Le FOCAR alternatif (fraction de capital allouée pour obtenir des ressources) est maintenu au niveau actuel et même légèrement diminué (entre les 5 % initiaux et le niveau actuel) pour simuler l'effet des technologies qui permettent des réductions de coût. Mais au moment où la ressource qui reste approche de 10 %, l'effort d'extraction augmente et il s'approche d'un FOCAR de 1 quand la ressource s'épuise. (la valeur de 1 empêche effectivement la ressource non renouvelable d'être complètement épuisée parce que les coût d'extraction de la ressource freinent l'extraction elle-même). Ce genre de FOCAR avaient été testé par l'équipe de LTG (voir pp398-405 Meadows et al., 1974) avec d'autres tests de sensibilité.

Cependant, l'effondrement n'est pas évité mais juste retardé d'une ou deux décennie (Fig 4) et lorsqu'il survient la vitesse de déclin est encore plus grande. Des ressources plus faciles à obtenir permettent un regain de croissance après un déclin autour de 2015? Par la suite, la diminution rapide des ressources non renouvelables se poursuit rapidement et atteint un niveau tellement bas que le système industriel n'a plus les ressources nécessaires et s'effondre vers 2030. En conséquence, la population croît un peu haut que ce que ne le prévoit le modèle BAU mais chute à partir de 2035 à une vitesse plus rapide et à un niveau inférieur.

Impact actuel des contraintes sur le pétrole: l'effondrement est-il en court ?

L'alignement important entre le scénario BAU de LTG et ce qui a été observé au cours des 40 dernières années tout comme la correspondance des dynamiques sous-jacentes décrites précédemment laissent augurer d'un effondrement potentiel global. Bien que la plupart des commentaires situent l'effondrement vers le milieu du siècle (les auteurs de LTG ne veulent pas interpréter l'échelle de temps trop précisément), le scénario BAU de LTG implique un effondrement imminent de l'économie et de la population. En effet, d'autres aspects des contraintes d'approvisionnement, étudiées dans la suite de l'article, indiquent que la crise financière globale (GFC) peut être significative d'un effondrement de type scénario BAU.

Tout d'abord, l'augmentation du prix du pétrole a correspondu à une augmentation récente du prix des denrées alimentaires (par exemple. (Alghalith, 2010, Chen et al., 2010). Il y a des liens directs et indirects entre le pétrole et la nourriture Schwartz et al., 2011, Neff et al., 2011). La mécanisation de l'agriculture implique du transport, il faut ensuite transporter les denrées pour les distribuer, et il faut des intrants phytosanitaires et des pesticides qui dérivent du pétrole. Il en est de même pour les apports azotés qui dépendent largement du gaz naturel. Le prix de ces produits sont liés au prix du pétrole. Plus récemment la production de bio-carburant comme l'éthanol à base de maïs, a transformé une partie de la production

agricole et a eu des conséquences sur le prix des denrées (par exemple, Alghalith, 2010, Chen et al., 2010). Ces évolutions ressemblent à la dynamique du scénario BAU de LTG qui prévoit que la production agricole est impactée négativement par la concurrence pour les capitaux. Il semble aussi y avoir des preuves que la pollution mondiale impacte la production alimentaire (effet secondaire dans le scénario BAU). Les sécheresses majeures récentes, les tempêtes et les incendies sont probablement les signes avant-coureurs du changement climatique induit par l'émission anthropique des gaz à effet de serre.

Le rôle du prix du pétrole (et des denrées) a des implications plus fortes dans les chocs économiques et politiques. Par exemple, d'autres modélisations du rôle de l'énergie dans l'économie (Nel et Cooper, 2009) constatent que les contraintes énergétiques provoquent un ralentissement économique à long terme et une réduction des gaz à effet de serre, qui sont des conclusions similaires à celles de l'effondrement dans le modèle LTG. Il y a des évidences empiriques (par exemple, Murray et King, 2012, cités dans Murphy and Hall, 2010, Murphy and Hall, 2011) pour lier augmentation du prix du pétrole et récessions économiques (comme il existe une forte corrélation entre consommation d'énergie et croissance économique). L'analyse économétrique produite par Hamilton (2009) indique que la dernière récession aux États-Unis couplée avec la crise financière globale (GFC) était différente des précédents chocs pétroliers dans la mesure où cette récession était causée par une combinaison d'une forte demande de pétrole liée à une stagnation de la production mondiale. Son analyse minimise le rôle de la spéculation financière.

Néanmoins, la cause première de la GFC est bien entendu financière : niveau excessif de dette (par rapport au PIB, ou plus précisément, la capacité effective de l'économie réelle à rembourser la dette) (Keen 2009). Ces dynamiques financières ne sont pas intégrées dans la modélisation de LTG. Das (2011) met en évidence l'existence de dettes risquées tels que les subprimes sur les hypothèques et le déclenchement de la GFC. Les modèles financiers utilisés n'ont pas correctement tenu compte du nombre élevé de défauts simultanés en se basant sur les statistiques antérieures qui ne donnaient pas autant de défauts simultanés. Cette corrélation peut provenir d'aspect particulier comme la création récente d'instruments financiers sur les prêts hypothécaires qui proposent des taux initiaux faibles et alléchants mais qui augmentent par la suite. Si c'était la cause un certain nombre de défauts serait prévus. Une explication alternative pourrait résider dans la hausse du prix du pétrole et des produits apparentés qui aurait touché tous les propriétaires (mais avec un impact énorme sur les ménages à faibles revenus) et par la même provoqué les défauts sur la dette.

Indépendamment du rôle joué par les contraintes et l'augmentation du prix d'énergie dans la GFC, une dernière considération est de savoir si nous pouvons envisager une transition réussie pour les énergies dédiées au transport et pour les énergies renouvelables. En raison de la GFC, il peut y avoir un manque de capitaux disponibles et de crédit pour financer une transition coordonnée (ou spontanée) (Fantazzini et al., 2011). De plus, la reprise économique peut être interrompue, plusieurs fois, par une augmentation du prix du pétrole associée à celle-ci. En outre même si une transition est initiée il faut au moins 20 ans pour mener à bien la transformation de la flotte de véhicules et développer les infrastructures nécessaires. (Hirsch, 2008, Hirsch et al., 2005). Le chemin vers la transition nécessite l'introduction de nouveaux carburants pour compenser une éventuelle épuisement de la production de pétrole de 4 % (ou plus) tout en répondant à toute demande supplémentaire associée à la croissance économique. On ne sait pas si les diverses conditions requises pour cette transition sont possibles.

Le rôle des réponses sociales

Pour ce qui concerne les changements sociaux, il est pertinent de noter que si les auteurs de LTG restent prudents, les dynamiques du modèle world3 continuent d'opérer malgré toutes les crises. Différentes

dynamiques sociales pourraient soit amplifier ou réduire l'effondrement (par exemple des réformes de la gouvernance mondiale, des guerres globales ou régionales) D'autres chercheurs ont envisagé comment la société pourrait réagir à des graves contraintes de ressources (par exemple Friedrichs, 2010, Fantazzini et al., 2011, Heinberg, 2007, Orlov, 2008, Heinberg, 2011). Divers degrés de conflits sont envisagés tout comme des modes de vie plus autarcique dans les pays développés.

La dynamique du modèle World3 conduit à un effondrement qui s'accorde avec d'autres descriptions de civilisations qui se sont effondrées (Tainter, 1988, Diamond, 2005, Greer, 2008, Greer, 2005). La proposition de Tainter de fonctionnement moins efficace lorsque la complexité s'accroît correspond à l'inefficacité croissante de l'extraction d'une ressource qui se raréfie dans la proposition du modèle World3. Il est en adéquation avec des observations plus générale dans les tentatives du modèle world3 de résoudre les défis de la durabilité qui conduisent au scénario de la « technologie globale » qui produit un effondrement plus dramatique. L'existence dans World3 de retards dans la reconnaissance puis dans la réponse apportée aux problème de l'environnement s'accordent avec les éléments clés que Diamond met en avant pour les sociétés qui ont échoué. De plus le mécanisme de Greer « d'effondrement catabolique » –en clair, augmentation des coût d'entretien qui dépassent le capital pour la production, conjugué à une sérieuse baisse des ressources clés – décrit sur un mode plus doux comme étant la cause de la crise dans le scénario BAU de LTG.

Malheureusement, les preuves scientifiques des graves problèmes de ressources et de problèmes environnementaux se sont heurtées à une forte résistance de la part de forces sociales puissantes, comme le démontre clairement la longue histoire de LTG ou les oppositions aux initiatives internationales des Nations Unies sur les questions climatiques et environnementales. Ironiquement, la confirmation par cet article du modèle BAU de LTG, implique que l'attention des scientifiques et du public pour le changement climatique se porte sur les conséquences des contraintes de ressources, en particulier celui de l'approvisionnement en pétrole. En effet, si l'effondrement global se produit comme l'indique le scénario LTG alors les problèmes de l'impact de la pollution sera résolu – mais pas d'une manière idéale ! Une des leçons difficiles des scénario de LTG est que les questions environnementales mondiales sont généralement étroitement liées et ne doivent pas être traitées comme des problèmes séparés. Une autre leçon est l'importance de la prise de mesures préventives bien avant que les problèmes soient important. Malheureusement, la correspondance des données en tendance avec les prédictions et la dynamique de LTG indique que les premiers stades de l'effondrement pourraient survenir dans une décennie, ou pourraient même être en cours. Cela suggère, dans une perspective basée sur le risque probable, que nous avons gaspillé les dernières décennies, et que se préparer à un effondrement mondial pourrait être plus utile que de chercher à éviter l'effondrement.

Appendix

Updates to the historical data

The data presented here follows that of the thirty year review (Turner, 2008). This data covers the variables displayed in the *LTG* output graphs: population (and crude birth and death rates); food supply per capita; industrial output per capita; services per capita; fraction of non-renewable resources available; and persistent global pollution. Data sources are all publically available, many of them through the various United Nations organisations (and websites). Details were provided earlier (Turner, 2008) on these data sources and aspects such as interpretation, uncertainties and aggregation. However, some additional data and calculation were necessary since measured data to 2010 was not always available (and even when it is the data may be forecast estimates). A summary of the data is provided in the following.

Population data is readily available from the Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the UN (United Nations) Secretariat (obtained via the online EarthTrends database of the World Resources Institute); but data from 2006 onwards is a forecast. Given the short gap to 2010 and typical inertia in population dynamics, the 2010 estimate will be sufficiently accurate for the comparison made here.

Food supply was based on energy supply data (calories) from the Food and Agriculture Organisation (FAO), with the extension to 2009/10 generated from comparison with production data, which was scaled to the energy supply data for each corresponding food type in the production data.

Industrial output was available only to 2007 directly from the UN Statistical Yearbooks (UN 2006, 2008), now accessible online. Industrial output per capita is used as a measure of material wealth in the *LTG* modelling, but the industrial output also supplies capital for use in other sectors, including agriculture and resource extraction.

Service provision (per capita) has been measured by proxy indicators: electricity consumed per capita and literacy rates. In the former case, for the most recent data it was necessary to scale electricity generation data (from BP Statistical Review 2011) to consumption values and hence account for electricity transmission losses. Literacy rates were updated from the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO) Statistics database, which is the source for the EarthTrends data. Literacy rates provide a partial proxy indicator since they will saturate as they increase toward 100 per cent. Values are provided for time ranges rather than single years.

The fraction of non-renewable resources available is estimated from production data on energy resources, since other resources are conservatively assumed to be infinitely substitutable or there to be unlimited resources. Energy production data to 2010 was obtained from the BP Statistical Review (2011), which was subtracted from the ultimate resource originally available to obtain the remaining resources. To account for considerable uncertainty in the ultimate resource, upper and lower estimates were made based on optimistic and constrained assessments, respectively (Turner, 2008). Hence, two data curves are provided for the fraction of non-renewable resources remaining.

Finally, global persistent pollution was measured by the greenhouse gas CO₂ concentration, available to 2008 on the EarthTrends database, with latest measurements to 2010 from Pieter Tans, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory (ESRL), and Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography.

Comparaison des données avec trois scénarii limites

Pour permettre de comprendre à quel point les données disponibles s'alignent avec le scénario BAU ou « Standard run » de la modélisation LTG, nous avons élargi la comparaison à deux autres scénarii clés de la modélisation LTG, à savoir « technologie Globale » et « monde stabilisé ». Les trois scénarii encadrent l'ensemble du spectre des scénarii produits.

Le scénario « technologie globale » essaie de résoudre les problèmes de développement durable avec un large spectre de solutions techniques. Ce scénario basé sur la technologie, intègre des niveaux de ressources qui sont illimités. 75 % des matériels sont recyclés, la pollution est réduite de 25 % de la valeur en 1970, les rendements des terres agricoles sont doublés et le contrôle des naissances s'applique à toute la planète.

Pour le scénario « monde stabilisé », des solutions technologiques et des politiques sociales volontaires sont mis en œuvre pour atteindre un équilibre pour les facteurs clés, y compris la population, la richesse matérielle, la nourriture et les services per capita. Les exemples d'actions mise en œuvre dans le modèle World3 comprennent : le contrôle des naissances drastique pour une famille de deux enfants, préférence pour

la consommation de services et pour la santé et moins de biens matériels, technologie pour réduire la pollution, maintien des terres agricoles en utilisant le capital dédié à l'industrie et augmentation de la durée de vie des machines pour le capital mobilisé dans l'industrie.

i Un point important réside dans le fait que l'offre de pétrole d'abord élastique à la demande devient inélastique ce qui produit des bouleversements économiques (Murray et King, 2012, Murray et Hansen, 2013), ce qui est discuté en détail dans les dernières sections.

ii L'analyse statistique réalisée dans notre étude sur trente ans (Turner, 2008) n'a pas été reproduite ici car les changements seraient minimes, et n'ajouterait pas grand chose à la démonstration.

iii <http://earthtrends.wri.org> (source: www.un.org/esa/population/ordering.htm)

iv http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD_STANDARD

v UN 2006, table 5, p. 22, UN 2008, table 5, p. 14. <http://unstats.un.org/unsd/syb/>

vi http://stats.uis.unesco.org/unesco/TableViewer/document.aspx?ReportId=136&IF_Language=eng&BR_Topic=0

vii www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/, scrippsco2.ucsd.edu/

Références

Alexander, S. 2014, *The New Economics of Oil*, MSSI Issues paper No. 2, Melbourne Sustainable Society Institute, The University of Melbourne.

Alghalith, M. 2010, 'The interaction between food prices and oil prices', *Energy Economics*, 32, pp.1520-1522.

Bardi U. 2011, *The Limits to Growth Revisited*, Springer, New York.

Castro, R. 2012, 'Arguments on the imminence of global collapse are premature when based on simulation models', *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 21, pp. 271-273.

Chen, S.T., Kuo, H.I. & Chen, C.C. 2010, 'Modeling the relationship between the oil price and global food prices', *Applied Energy*, 87, pp. 2517-2525.

Dale, M., Krumdieck, S. & Bodger, P. 2011, 'Net energy yield from production of conventional oil', *Energy Policy*, 39, pp. 7095-7102.

Das, S. 2011, *Extreme Money: Masters of the Universe and the Cult of Risk*, FT Press, New Jersey, US.

De Jongh, D. C. J. 1978, 'Structural parameter sensitivity of the 'limits to growth' world model', *Applied Mathematical Modelling*, 2, pp. 77-80.

Diamond J. 2005, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive*, Penguin Group, UK.

Fantazzini, D., Höök, M. & Angelantoni, A. 2011, 'Global oil risks in the early 21st century', *Energy Policy*, 39, pp. 7865-7873.

Friedrichs, J. 2010, 'Global energy crunch: How different parts of the world would react to a peak oil scenario', *Energy Policy*, 38, pp. 4562-4569.

Gargett, D. & BITRE 2009, *Transport Energy Futures: long-term oil supply trends and projections*, Canberra ACT: Bureau of Infrastructure, Transport and Regional Economics.

- Greer, J. M. 2005. *How Civilizations Fall: a theory of catabolic collapse*, WTV.
- Greer, J. M. 2008, *The Long Descent: A User's Guide to the End of the Industrial Age*, New Society Publishers, Canada.
- Hall, C. A. S. & Day J. W. 2009, 'Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil', *American Scientist*, 97, pp. 230-237.
- Hamilton, J.D. 2009, 'Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007-08', *Brookings Papers on Economic Activity*, 1, pp. 215-83.
- Harich, J. 2010, 'Change resistance as the crux of the environmental sustainability problem', *System Dynamics Review*, 26, pp. 35-72.
- Heinberg, R. 2007, *Peak Everything: waking up to the century of declines*, New Society Publishers, Canada,
- Heinberg, R. 2009, 'Searching for a miracle: "Net Energy" limits and the fate of industrial society', A joint report from the International Forum on Globalization, the Post Carbon Institute, accessed: www.postcarbon.org/new-site-files/Reports/Searching_for_a_Miracle_web10nov09.pdf
- Heinberg, R. 2011, *The End of Growth: adapting to our new economic reality*, New Society Publishers, Canada.
- Heun, M. K. & De Wit, M. 2012, 'Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions', *Energy Policy*, 40, pp.147-158.
- Hirsch, R. L. 2008, 'Mitigation of maximum world oil production: shortage scenarios', *Energy Policy*, 36, pp. 881-889.
- Hirsch, R. L., Bezdek, R. & Wendling, R. 2005, *Peaking of World Oil Production: impacts, mitigation and risk management*, National Energy Technology Laboratory (NETL), Department of Energy, West Virginia, US
- Hubbert, M. K. 1956, *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*, Shell Development Company, Houston, Texas.
- Hubbert, M. K. 1982, *Oil and Gas Supply Modeling*, U.S. Department of Commerce / National Bureau of Standards (now the National Institute of Standards and Technology, NIST), US.
- Keen, S. 2009, 'Bailing out the titanic with a thimble', *Economic Analysis & Policy*, 39, pp. 3-25.
- Linner, B.O. & Selin, H. 2013, 'The United Nations conference on sustainable development: forty years in the making', *Environment and Planning C: Government and Policy*, 31, pp. 971-987.
- Lomborg, B. & Rubin, O. 2002, 'The dustbin of history: limits to growth', *Foreign Policy*, 133, pp. 42-44.
- Maugeri, L. 2012, *Oil: The Next Revolution*, Discussion Paper 2012-10, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School, Harvard University, US.
- Meadowcroft, J. 2013, 'Reaching the Limits?', *Environment and Planning C: Government and Policy*, 31, pp. 988-1002.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. & Behrens III, W. W. 1972, *The Limits to Growth*, Universe Books, New York, US.
- Meadows, D. L., Behrens III, W. W., Meadows, D. H., Naill, R. F., Randers, J. & Zahn, E. K. O. 1974, *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press, Massachusetts, US.
- Murphy, D. J. & Hall, C. A. S. 2010, 'Year in review-EROI or energy return on (energy) invested', *Annals of*

the New York Academy of Sciences, 1185, pp.102-118.

Murphy, D. J. & Hall, C. A. S. 2011, 'Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth', *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219, pp. 52-72.

Murray, J. & King, D. 2012, 'Climate policy: Oil's tipping point has passed', *Nature*, 481, pp. 433-435.

Murray, J. W. & Hansen, J. 2013, 'Peak oil and energy independence: myth and reality', *Eos*, Transactions American Geophysical Union, 94, pp. 245-246.

Neff R. A., Parker, C. L., Kirschenmann, F. L., Tinch, J. & Lawrence, R. S. 2011, 'Peak oil, food systems, and public health', *American Journal of Public Health*, 101, pp.1587-1597.

Nel, W. P. & Cooper, C. J. 2009, 'Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming', *Energy Policy*, 37, pp. 166-180.

Orlov, D. 2008, *Reinventing Collapse*, New Society Publishers, Canada.

Randers, J. 2012, *2052: A Global Forecast for the Next Forty Years*, Chelsea Green Publishing, Vermont US.

Randers, J. 2012, 'The real message of the Limits to Growth: a plea for forward-looking global policy', *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 21 (2), pp. 102-05.

Raskin, P. D., Electris, C. & Rosen, R. A. 2010, 'The century ahead: searching for sustainability', *Sustainability*, 2, pp. 2626-2651.

Rickards, L., Wiseman, J. and Kashima, Y. (In press) 'Barriers to effective mitigation actions on climate change: the case of senior government and business decision-makers', *Wiley Interdisciplinary Review, Climate Change*.

Schwartz, B. S., Parker, C. L., Hess, J. & Frumkin, H. 2011, 'Public health and medicine in an age of energy scarcity: the case of petroleum', *American Journal of Public Health*, 101, pp. 1560-1567.

Simmons, M.R., 2000, 'Revisiting the Limits to Growth: could the Club of Rome have been correct, after all?', *An Energy White Paper*, accessed: www.simmonsco-intl.com/files/172.pdf.

Sorrell, S., Miller, R., Bentley, R. & Speirs, J. 2010a, 'Oil futures: A comparison of global supply forecasts', *Energy Policy*, 38, pp. 4990-5003.

Sorrell, S., Speirs, J., Bentley, R., Brandt, A. & Miller, R. 2010b, 'Global oil depletion: A review of the evidence', *Energy Policy*, 38, pp.5290-5295.

Tainter, J. A. 1988, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Turner, G. M. 2008, 'A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality', *Global Environmental Change*, 18, pp. 397-411.

Turner, G. M. 2012, 'On the cusp of global collapse? Updated comparison of the Limits to Growth with historical data', *GAiA – Ecological Perspectives for Science and Society*, 21, pp.116-124.

Turner, G. M. 2013, 'The limits to growth model is more than a mathematical exercise; reaction to R. Castro, 2012, Arguments on the imminence of global collapse are premature when based on simulation models', *GAiA* 21/4, pp. 271– 273. *GAiA*, 22, pp.18-19.

Vermeulen, P. J. & De Jongh, D. C. J. 1976, 'Parameter sensitivity of the 'Limits to Growth' world model', *Applied Mathematical Modelling*, 1, pp. 29-32.

www.sustainable.unimelb.edu.au

Alice Hoy Building (Blg 162), Monash Road (Melways Ref 2B-E7)

The University of Melbourne Parkville VIC 3010, Australia

About MSSI:

The Melbourne Sustainable Society Institute (MSSI) aims to facilitate and enable research linkages, projects and conversations leading to increased understanding of sustainability and resilience trends, challenges and solutions. The MSSI approach includes a particular emphasis on the contribution of the social sciences and humanities to understanding and addressing sustainability and resilience challenges.