



FAERE

French Association
of Environmental and Resource Economists

Working papers

Limites à la croissance
et destruction créatrice dans le cadre
d'un modèle à générations de capital

Marc Germain

WP 2021.14

Suggested citation:

M. Germain (2021). Limites à la croissance et destruction créatrice dans le cadre d'un modèle à générations de capital.

FAERE Working Paper, 2021.14.

ISSN number: 2274-5556

www.faere.fr

Limites à la croissance et destruction créatrice dans le cadre d'un modèle à générations de capital

Marc Germain

Univ. Lille, CNRS, IESEG School of Management, UMR 9221 - LEM - Lille Economie Management, F-59000 Lille, France et IRES, Université de Louvain.

Résumé

Cet article étudie la trajectoire d'une économie soumise à des contraintes de ressource, dans le cadre d'un modèle de croissance à générations de capital original, intégrant un processus de destruction créatrice à la Schumpeter.

La trajectoire de l'économie est caractérisée par trois phases successives : (i) une croissance « forte » non durable ; (ii) après un pic, une décroissance profonde et brutale ; (iii) une croissance plus lente conduisant progressivement à l'équilibre. Le ralentissement et le retournement de l'économie sont liés à la hausse continue du taux d'exploitation de la ressource, qui survient malgré le progrès technique dû au processus de destruction créatrice.

Ce processus a également une trajectoire non monotone, en particulier sa composante destruction, un des facteurs à la base de l'obsolescence économique des équipements. Celle-ci évolue en sens inverse de la production, en porte-à-faux avec l'hypothèse répandue d'un taux de dépréciation constant du capital.

Abstract

This paper studies the path of a resource-constrained economy in an original vintage capital growth model involving a Schumpeterian process of creative destruction.

The path of the economy is characterized by three successive phases: (i) unsustainable « high » growth; (ii) after a peak, a deep and brutal decline; (iii) slower growth gradually leading to equilibrium. The slowdown and reversal of the economy are linked to the continuous rise in the extraction rate of the resource, which occurs despite technical progress due to the creative destruction process. This process also has a non-monotonic trajectory, in particular its destruction component, one of the factors behind the economic obsolescence of equipment. The latter evolves in the opposite direction to production, in contradiction with the widespread assumption of a constant capital depreciation rate.

Mots clés : limites à la croissance, destruction créatrice, obsolescence, générations de capital

JEL: C61, C63, O41, Q20, Q57

Introduction

Le présent article est au coeur d'une question actuelle importante : celle de la possibilité de poursuivre la croissance économique dans un monde (bio-physique) fini. Cette question est loin d'être nouvelle puisqu'elle était déjà évoquée par des auteurs classiques tels que Ricardo ou Jevons. Plus proche de nous, elle a été l'objet du fameux rapport au Club de Rome de Meadows et al. (2012)¹. Pour différentes raisons (épuisement des ressources naturelles (en particulier de la terre), renchérissement de leur exploitation, accumulation des pollutions), ces auteurs inclinaient à répondre négativement à la question dans un cadre de laissez-faire. En effet, la majorité des scénarios décrits dans leur rapport anticipent des trajectoires de l'économie mondiale au 21^{ème} siècle sous la forme d'une phase de croissance suivie d'une phase de décroissance prolongée².

La position "pessimiste" exposée ci-dessus fait débat. Des auteurs plus "optimistes" ont mis en avant plusieurs processus qui ont permis dans le passé et pourraient a priori permettre dans le futur la poursuite de la croissance : (i) les découvertes ou mises en exploitation de nouvelles ressources, (ii) le progrès technique resource-saving (Faber et Proops, 1993), (iii) la substitution entre ressources naturelles d'une part et travail et capital d'autre part (dans la tradition de Solow (1974) et Stiglitz (1974))³, (iv) le changement structurel (induit par des glissements dans la demande finale ou par des différentiels de gains de productivité entre secteurs) impliquant un poids grandissant d'activités plus économes en ressources comme les services ou la recherche, au détriment d'activités intenses en ressources comme l'industrie (Lopez et al. (2007), Bretschger and Smulders (2012), Campiglio (2014)).

Cependant, même s'ils sont loin d'être achevés, la question se pose de savoir si ces processus pourront indéfiniment permettre de contourner les contraintes précitées et garantir la croissance. Que leurs résultats se fondent sur la substitution entre facteurs humains et naturels, le progrès technique ou le changement structurel, les contributions qui répondent par l'affirmative à cette question reposent sur le postulat que la productivité des ressources naturelles n'est pas bornée supérieurement.

Or, il a été montré qu'une technologie caractérisée par une productivité de la ressource non bornée viole les lois de la physique, en particulier la loi de

1 Publié en anglais en 1972 et réactualisé en 1992 et 2004.

2 En revanche, Meadows et al. (2012) montrent que des scénarios de société durable à l'échelle mondiale sont possibles à condition de combiner des politiques de maîtrise de la population et de la production et de stimuler le progrès technique en matière de protection des ressources et de l'environnement.

3 Le capital peut être physique ou intellectuel ou les deux (Aghion et Howitt, 1998, chapitre 5).

conservation de la matière (Anderson (1987), Baumgartner (2004)) ou le second principe de la thermodynamique (Meran, 2019).

En accord avec l'argument du paragraphe précédent, plusieurs contributions (appartenant à la littérature de l'ingénierie ou de l'économie) ont produit des résultats en phase avec ceux de Meadows et al (2012). Capellàn-Pérez et al. (2020), Dale et al. (2012), Fagnart et al. (2020) dans le cadre plus spécifique de la transition énergétique, Germain (2014, 2020) dans un cadre plus général similaire au présent article, génèrent des trajectoires de l'économie non monotones, où la phase croissante initiale est suivie d'une phase de décroissance, suivie elle-même d'une convergence (éventuellement à la hausse) vers un équilibre stationnaire.

Le présent article se situe dans la continuité des contributions du paragraphe précédent, avec l'originalité d'intégrer le concept de destruction créatrice dans le cadre d'un modèle à générations de capital original (cfr. infra). Ce concept (attribué à Schumpeter) repose sur l'idée que la croissance est principalement le résultat des efforts d'innovation des entreprises. Ceux-ci se traduisent par de nouvelles techniques ou organisations de la production et de nouveaux biens et services (création). Mais ces innovations s'accompagnent de l'obsolescence d'équipements, de déclassement de biens et services existants et de faillites (destruction).

Dans la tradition de Solow et al. (1966), les modèles à générations de capital sont un moyen élégant d'intégrer le concept de destruction créatrice au niveau du renouvellement du capital. Dans ce type de modèle, le progrès technique est continuellement incorporé dans de nouvelles machines, d'où une hétérogénéité temporelle du capital. La décision d'investissement revient alors à décider du remplacement optimal de vieilles machines par des machines neuves plus efficaces. Il en découle que l'obsolescence du capital est économique et endogène, et intrinsèquement liée à l'investissement (Boucekkine et al., 1997, 1998).

En postulant un modèle à générations de capital avec une ressource naturelle dont la productivité est bornée supérieurement, le but du présent article est d'étudier comment les limites bio-physiques à la croissance et le processus de destruction créatrice interagissent. Il vise en particulier à mettre en lumière les évolutions de l'investissement en nouveau capital et de l'obsolescence lors des phases de croissance et de décroissance de l'économie.

Par ailleurs, le modèle proposé ici présente sur le plan méthodologique l'originalité de calculer les quantités globales (par ex. la production) en intégrant les équipements sur base d'un indice d'efficacité, et non sur base de leurs dates d'installation, comme

c'est habituellement le cas dans les modèles à générations de capital. Il en découle une sérieuse simplification au niveau du calcul, dans la mesure où le modèle conduit à un système d'équations différentielles ordinaires, au lieu d'un système d'équations différentielles aux différences (comme chez Boucekkine et al., 1997)⁴.

La structure de cet article est la suivante. La section 1 décrit le modèle, en particulier le processus de destruction créatrice et la dynamique de la ressource naturelle. Vu que la productivité de la celle-ci est bornée supérieurement, une solution de long terme du type sentier de croissance équilibrée est impossible. En revanche, il existe un équilibre stationnaire unique et celui-ci est calculé à la section 2. La section 3 est consacrée à l'analyse de la simulation de référence. La section 4 présente les résultats obtenus dans le cadre de différentes variantes obtenues à partir de changements de paramètre. La conclusion résume les principaux résultats obtenus.

1. Le modèle

1.1 Préambule

Le modèle est celui d'une économie uni-sectorielle, fermée⁵, avec une ressource naturelle (RN) agrégée et renouvelable. A la manière des modèles de croissance classiques, les comportements des agents microéconomiques ne sont pas décrits, et la présentation du modèle est faite directement au niveau macroéconomique.

L'économie produit un bien à tout faire, à partir de capital et de la ressource. Une partie de la production est utilisée comme consommation intermédiaire (CI) pour extraire et transformer la ressource. La valeur ajoutée sert à la consommation finale (privée et publique) ou est investie dans la reproduction et l'accumulation du capital.

Le modèle est à générations de capital dans la tradition de Solow et al. (1966). La technologie est intégrée dans les équipements, et ceux-ci sont d'autant plus efficaces qu'ils ont été installés récemment. Cependant, à la différence de ces auteurs, (i) les générations d'équipements se distinguent par leur intensité en CI, c-à-d la quantité

⁴ Le modèle développé ici est également différent des modèles de destruction créatrice dans la tradition de Aghion et Howitt (1992), où l'innovation résulte de l'activité d'un secteur de recherche explicitement représenté.

⁵ L'intérêt de cette hypothèse est qu'elle contraint l'économie à supporter intégralement les limites de ses ressources naturelles, sans possibilité de les contourner via des échanges avec le reste du monde (soit en important directement des ressources naturelles, soit en se spécialisant dans une production peu intensive en ressources et en l'exportant en échange d'importations riches en ressources).

de CI nécessaire pour produire une unité de bien⁶ et (ii) la production agrégée est calculée en intégrant les générations sur base d'un indice d'efficacité (dans l'utilisation de la CI), et non sur base de leurs dates d'installation. Cet indice augmente au cours du temps en fonction du progrès technique, lui-même induit par l'investissement macroéconomique.

Le modèle intègre deux effets externes en rapport avec la RN. Le premier effet, lié au progrès technique, se traduit par une baisse du contenu en ressource d'une unité de bien. Cependant, en vertu des lois de la physique évoquées dans l'introduction, ce contenu en ressource est borné inférieurement par une valeur strictement positive (autrement dit, la productivité de la ressource en termes de bien ne peut être infinie). Le deuxième effet résulte de l'accès libre à la RN et se traduit par une corrélation négative entre la production des équipements en activité et le taux d'exploitation de la ressource.

1.2 Les équations

Le modèle est dynamique et écrit en temps continu. La dépendance par rapport au temps est cependant omise afin d'alléger les équations.

Le capital *existant* est formé d'un continuum de machines (ou équipements) représenté par l'intervalle $[0, b]$, où $0 < b$. Ces machines ont la même capacité de production, mais se distinguent par leur CI (la quantité de biens nécessaires pour les faire fonctionner). b désigne l'indice de la machine existante la moins intensive en CI et indique donc la frontière technologique de la période. Cet indice augmente avec le temps (cfr. infra) et est désigné par la suite par les termes *indice frontière*. Pour simplifier le modèle, on ignore l'usure physique et le coût de maintenance du capital existant. A chaque période, toutes les machines de l'intervalle $[0, b]$ sont a priori utilisables. Mais comme on va le voir, seules les machines rentables seront effectivement en activité.

La machine $i \in [0, b]$ consomme la quantité de biens

$$w(i) = \frac{1}{ni} \quad (1)$$

pour extraire et transformer la quantité de RN

$$x(i) = 1 - E \quad (2)$$

⁶ Dans la littérature fondée sur les modèles à générations de capital, l'usage est plutôt de distinguer celles-ci par leur intensité en travail, ce qui oblige à modéliser le marché du travail. La première version du présent modèle reprenait cet usage et conduisait à des résultats similaires à ceux obtenus ici.

Plus une machine est caractérisée par un indice d'efficacité i élevé, plus sa CI est faible. n est un paramètre constant positif et $E \in [0,1]$ désigne le taux d'extraction de la RN (cfr. infra). Quand celle-ci n'est pas exploitée ($E=0$), chaque machine extrait donc une unité de ressource. Il importe de bien distinguer $w(i)$ et $x(i)$: $x(i)$ est une quantité de ressource (de matière première) extraite de l'environnement, alors que $w(i)$ est de la CI produite par l'économie (par exemple, de la farine ou de l'électricité).

(2) illustre le *premier effet externe* présent dans l'économie : les machines sont d'autant moins productives que E est élevé, c-à-d que la RN est exploitée intensivement. La non dépendance du membre de droite par rapport à i indique que cet effet externe affecte de façon *uniforme* tous les équipements en activité.

La quantité de RN extraite par chaque machine est transformée en bien à tout faire. Soit $m (>0)$ le contenu en ressource d'une unité de ce bien supposé homogène, au sens où ce contenu ne dépend pas de la machine qui a produit le bien (m ne dépend pas de i). La production de bien par la machine i vaut par conséquent :

$$y(i) = \frac{x(i)}{m} = \frac{1-E}{m} \quad (3)$$

La RN est supposée en accès libre. Le profit obtenu avec la machine i s'écrit :

$$p(i) = y(i) - w(i) = \frac{1-E}{m} - \frac{1}{ni} \quad (4)$$

Une machine est rentable si elle génère un profit positif. L'*indice marginal*, c-à-d l'indice de la machine *en activité* la plus intensive en CI, est déterminé par la condition $p(a)=0$ (une condition classique des modèles à générations de capital), ce qui donne :

$$a = \frac{m}{n[1-E]} \quad (5)$$

Cet indice est une fonction croissante du taux d'extraction E et du contenu en ressource m .

A chaque période t , toutes les machines rentables sont supposées être en activité. Le capital *rentable* et donc utilisé est décrit par l'intervalle $[a,b]$. Les machines appartenant à $[0,a]$ sont sujettes à l'obsolescence économique⁷.

⁷ Cette obsolescence est cependant réversible, au sens où une machine inutilisée à la période t peut être en activité plus tard (on ignore les coûts de maintenance et l'usure physique).

En intégrant la fonction définie par (2) sur l'intervalle $[a,b]$ et en utilisant (5), on en déduit la quantité totale de ressource extraite :

$$x = [1 - E][b - a] = [1 - E]b - \frac{m}{n} \quad (6)$$

Or, le taux d'extraction est défini par $E=x/R$, où R désigne le stock de RN. L'équation précédente permet alors d'exprimer E comme un fonction de b,R et m :

$$E = \frac{b - m/n}{b + R} \quad (7)$$

Comme b,R,m,n sont positifs, on vérifie que E est inférieur à 1 (à une période donnée, on ne peut pas exploiter plus que le stock disponible). Il faut aussi que $0 < E$, ce qui suppose que $b > m/n$. On observe que $b \rightarrow +\infty \Rightarrow E \rightarrow 1$: si l'indice frontière tend vers l'infini (impliquant que l'intensité en CI des machines tend vers 0), le stock de RN disponible tend à être entièrement exploité.

Comme $x=ER$, (6) devient :

$$x = \frac{b - m/n}{b + R} R \quad (8)$$

Vu (3), la production totale de biens s'écrit :

$$y = \frac{x}{m} = \frac{b - m/n}{b + R} \frac{R}{m} \quad (9)$$

Vu (7), l'indice marginal déterminé par (5) devient :

$$a = \frac{b + R}{1 + \frac{nR}{m}} \quad (10)$$

L'indice marginal a est une fonction croissante de b . Dès lors que $E > 0$, on peut montrer que (i) a est strictement plus petit que b (autrement dit, l'intervalle $[a,b]$ est non vide) et (ii) a est une fonction décroissante de R (b étant donné, une plus grand stock de RN réduit le taux d'exploitation E , ce qui permet à plus de machines d'être rentables).

La consommation intermédiaire totale s'obtient en intégrant la fonction définie par (1) sur l'intervalle $[a,b]$:

$$w = \int_a^b \frac{di}{ni} = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{n} \ln\left(b \frac{1 + nR/m}{b + R}\right) \quad (11)$$

où la dernière égalité découle de (10). A partir de (9), on montre aisément que CI et production sont liées par l'équation suivante :

$$w = \frac{1}{n} \ln(ny + 1) \quad (12)$$

La CI croît comme le logarithme de la production. Il en découle que le rapport w/y décroît si y augmente.

Selon l'approche par la valeur ajoutée, le PIB s'obtient comme la différence entre production totale et CI :

$$v = y - \frac{1}{n} \ln(ny + 1) \quad (13)$$

b étant l'indice frontière (l'indice de la machine en activité la plus efficace), son évolution au cours du temps est le reflet d'un *progrès technique incorporé* aux machines permettant de réduire la CI. Formellement, on suppose que :

$$b' = cy \left[1 - \frac{b}{b_*} \right] \quad (14)$$

où b' désigne la dérivée temporelle de b et c, b_* sont des paramètres positifs exogènes.

L'évolution du stock de ressource est déterminée par :

$$R' = F - x \quad (15)$$

où F est un flux naturel (exogène) qui reproduit la RN (par exemple le flux solaire).

Une troisième équation dynamique concerne m , le contenu en RN d'une unité de bien. Rappelons que ce bien est homogène, au sens où son contenu en ressource ne dépend pas de la machine qui l'a produit. m est supposé évoluer en fonction de l'indice frontière b selon l'équation :

$$m = m_b + [m_0 - m_b] e^{-r[b-b_0]} \quad (16)$$

où m_0 est le contenu en ressource au temps $t=0$ et r, m_b sont des paramètres strictement positifs exogènes. m décroît à partir de m_0 d'autant plus vite que r est élevé, et tend vers m_b si $b \rightarrow +\infty$. Le fait que $m_b > 0$ implique que le contenu en ressource d'une unité ne peut tendre vers 0 avec le temps.

L'équation (16) appelle deux remarques. D'une part, elle décrit le *deuxième effet externe* présent dans l'économie : celui-ci est induit indirectement par le processus d'investissement-innovation décrit par (14) et se traduit par une amélioration de la profitabilité de l'ensemble des machines.

D'autre part, alors que (14) décrit un PT qui réduit la CI, l'équation précédente fait apparaître un autre PT qui économise l'usage de la RN. Si le premier PT est incorporé aux machines, le deuxième ne l'est pas, dans la mesure où il affecte celles-ci de façon uniforme. Au vu de (9), (14) et (16), on observe que les deux formes de PT sont interdépendantes.

Au niveau macroéconomique, le modèle est entièrement décrit par les équations (7) à (16). Les variables endogènes sont $a, b, E, x, y, w, v, R, m$. Les paramètres n, c, F, r, b^*, m_b sont constants. Toutes ces valeurs sont positives. Les conditions initiales sont b_0, R_0 et m_0 .

2. L'équilibre stationnaire

2.1 Détermination de l'équilibre

A l'équilibre stationnaire (ES), les variables sont constantes. (14) à (16) impliquent que :

$$b_s = b^* \quad (17)$$

$$x_s = F \quad (18)$$

$$m_s = m_b + [m_0 - m_b]e^{-r[b_s - b_0]} \quad (19)$$

où l'indice s indique la valeur stationnaire de la variable. Si $b^* (> b_0)$ est fini, alors m tend vers une valeur m_s comprise entre m_0 et m_b . b^* et F étant donnés, les équations précédentes déterminent univoquement le triplet $\{b_s, x_s, m_s\}$. Il en va de même des valeurs stationnaires des autres variables (cfr. infra). L'équilibre est donc unique.

(8) et (9) impliquent respectivement que :

$$R_s = \frac{F}{1 - \left[\frac{m_s}{n} + F \right] \frac{1}{b^*}} \quad (20)$$

$$y_s = \frac{F}{m_s} \quad (21)$$

Comme F est fini et $m_s > m_b > 0$, la production est nécessairement bornée supérieurement (un sentier de croissance équilibrée est donc exclu). C'est également vrai dans le cas limite où $b^* \rightarrow +\infty$.

Vu que $E=x/R$, le taux d'extraction stationnaire vaut :

$$E_s = \frac{x_s}{R_s} = 1 - \left[\frac{m_s}{n} + F \right] \frac{1}{b^*} \quad (22)$$

Le fait que $0 < E_s$ impose une condition sur le choix des paramètres, à savoir que $m_s/n + F > b^*$, où m_s est donné par (19). E_s est d'autant plus proche de 1 que b^* est grand. Dans le cas limite où $b^* \rightarrow +\infty$, (20) et (22) impliquent que $R_s \rightarrow F$ et $E_s \rightarrow 1$. Autrement dit le stock de RN se réduit à l'ES au flux de renouvellement F .

A l'ES, (5) et (22) impliquent que :

$$a_s = \frac{m_s}{n[1-E_s]} = \frac{b^*}{1 + \frac{nF}{m_s}} \quad (23)$$

Au vu de (12), (13) et (21), la CI et le PIB à l'ES sont respectivement :

$$w_s = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{nF}{m_s} + 1 \right) \quad (24)$$

$$v_s = \frac{F}{m_s} - \frac{1}{n} \ln \left(\frac{nF}{m_s} + 1 \right) \quad (25)$$

Comme la production totale, ces deux grandeurs sont des fonctions croissantes du flux F et décroissantes du contenu en ressource m_s .

2.2 Statique comparative

L'analyse concerne F (le flux renouvelant la RN) et b^* (l'indice frontière asymptotique).

Variation de F

(18) et (21) montrent qu'à l'ES, l'extraction de ressource x_s et la production totale y_s sont linéairement proportionnelles au flux renouvelant la RN. Vu (23), il apparaît que l'indice marginal a_s est une fonction décroissante de F . Un flux externe plus élevé (via la réduction du taux d'extraction qu'il induit) implique une valeur stationnaire de l'indice marginal plus faible, autrement plus de machines en activité.

b^* étant donné, la hausse de y_s se traduit par la nécessité de recourir à des machines plus intensives en CI. Il en découle que le PIB augmente proportionnellement moins que F (v_s est une fonction croissante et concave de F , comme le montre (25)).

Une hausse de F accroît le renouvellement naturel du stock de RN, mais accroît aussi l'activité économique, qui augmente l'extraction. (20) montre que le premier effet l'emporte (R_s augmente avec F), même si le taux d'extraction E_s augmente également (cfr. (22)).

*Variation de b^**

Une augmentation de b^* traduit une augmentation du potentiel de PT. (18) montre que x_s n'est pas affecté. En revanche, un potentiel plus élevé réduit le contenu en ressource m_s , ce qui permet d'augmenter la production totale y_s (cfr. (19) et (21)).

F étant nécessairement fini, (21) fait apparaître qu'une croissance indéfinie de la production n'est possible que si m tend asymptotiquement vers 0. Au vu de (19), cela suppose que l'on postule à la fois $m_b=0$ et $b^* \rightarrow +\infty$. Pour les raisons évoquées dans l'introduction, on suppose au contraire ici que $m_b > 0$. En conséquence, $m_s > 0$ et y_s est nécessairement borné supérieurement.

(25) montre qu'une baisse de m_s (induite elle-même par une variation $\Delta b^* > 0$) a le même effet sur le PIB v_s qu'une hausse de F . Une hausse du potentiel implique donc une hausse de v_s , mais proportionnellement moins forte que celle de y_s .

L'effet d'une augmentation de b^* sur l'indice marginal a_s est ambigu, car a_s augmente via b^* , mais diminue via m_s . En revanche, l'intervalle des machines en activité mesuré par l'écart

$$b_* - a_s = b_* \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{nF}{m_s}} \right] \quad (26)$$

s'étend.

Enfin, (20) montre qu'un plus grand potentiel de PT a un double effet sur le taux d'extraction E_s , au sens où E_s augmente à la fois via la hausse de b^* et la baisse de m_s . Comme $R_s = F/E_s$, ce plus grand potentiel se traduit inévitablement par une diminution du stock de RN. Il en ressort que la diminution du contenu en ressource est plus que compensée par la hausse de l'activité.

3. Analyse de la dynamique

La simulation suivante, dite de référence (SR), vise à éclairer les interactions entre le PT, le processus de destruction créatrice qui l'accompagnent, et les limites en termes de RN auxquelles l'économie est confrontée. Sauf exception, les paramètres du modèle ne sont pas "observés" mais calibrés de façon à obtenir des valeurs des variables raisonnables. A la manière de Meadows et al. (2012), les valeurs numériques n'ont pas beaucoup d'intérêt en elles-mêmes et ce sont surtout les mécanismes sous-jacents aux trajectoires qui importent.

La SR est illustrée par les Figures 1.a-h ⁸. Toutes les variables évoluent en fonction du temps t . Il en ressort les observations suivantes.

- Suite à la hausse continue de b (Figure 1.f), le PT se traduit par une décroissance monotone du contenu en ressource d'une unité de bien m (Figure 1.a).
- La Figure 1.b illustre le comportement de la production y , de la CI w et du PIB v . Les trajectoires sont non monotones et font apparaître trois phases :
 - P1 : une phase de croissance forte mais non durable, « tirée » à la fois par la surexploitation de la ressource (cfr. infra) et par le PT (la baisse de m).
 - P2 : après un pic de l'activité (en $t=92.3$), une phase de décroissance profonde et brutale (v diminue de 44% entre $t=92.3$ et $t=112.9$).
 - P3 : à partir de $t=112.9$, une phase de croissance plus lente et durable, car nourrie uniquement par le PT, conduisant progressivement à l'ES.
- La Figure 1.c montre une évolution en cloche de l'extraction de ressource x .
 - Elle n'est pas sans rappeler la courbe de Hubbert pour le pétrole, à la différence que x tend vers F (normalisé à 1) et non vers 0 après la phase de décroissance (ce qui est logique puisque la RN considérée ici est renouvelable).
 - La figure montre bien pourquoi la croissance n'est pas durable durant P1 : le taux de dépassement x/F est non seulement supérieur à 1 mais il est croissant. Durant P3 au contraire, la croissance est durable puisque $x/F \approx 1$.
 - Le pic de l'extraction de ressource survient un peu avant celui de y et v (en $t=86.7$). Le retournement de l'extraction précède donc celui de l'activité.
- Au contraire des variables précédentes, l'évolution du stock de RN R décroît de façon monotone (Figure 1.d). Même durant la phase de décroissance P2, R continue de décroître car $x > F$. Ce n'est qu'à l'approche de P3 que le stock commence à se stabiliser et ce, à un niveau beaucoup plus faible qu'à l'origine.

⁸ Les valeurs des paramètres et des conditions initiales sont les suivantes : $c=.0282$, $F=1$, $n=2.4847$, $r=1.0934$, $m_b=.5$, $R_0=50$, $b_0=1.8418$, $m_0=2$, $b^*=5b_0$.

Figure 1. Simulation de référence

(b) : bleu ; (r) : rouge ; (v) : vert

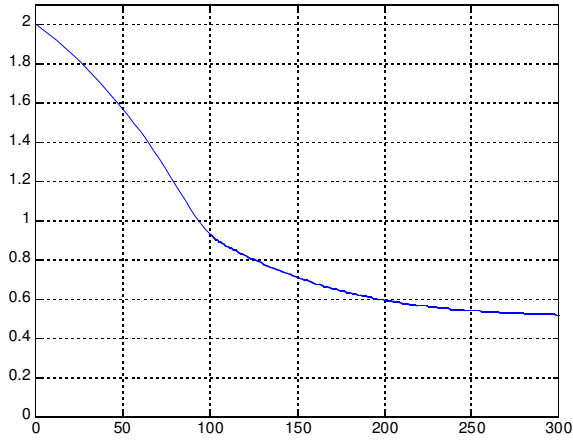
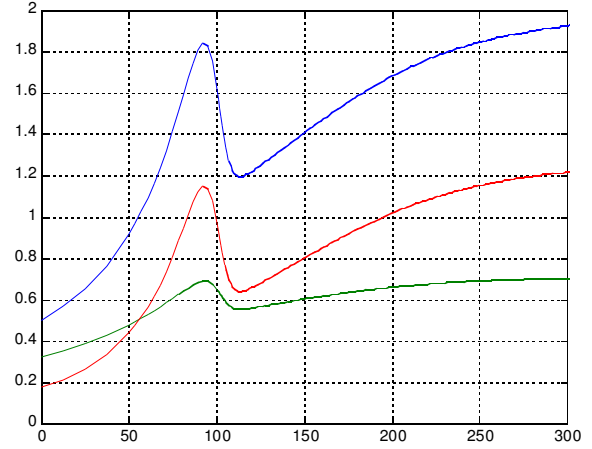
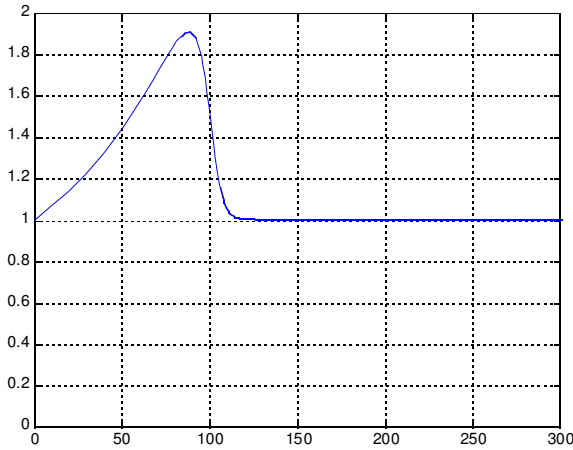
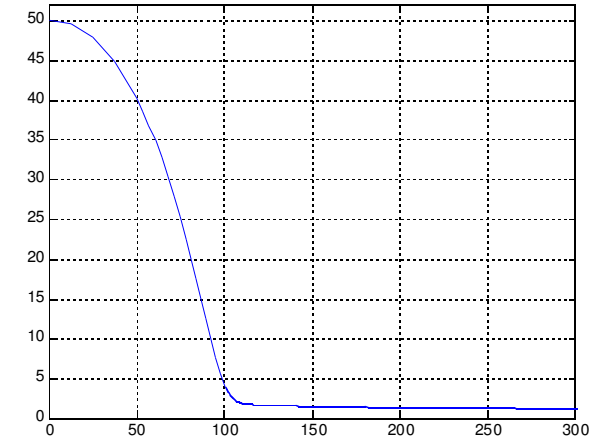
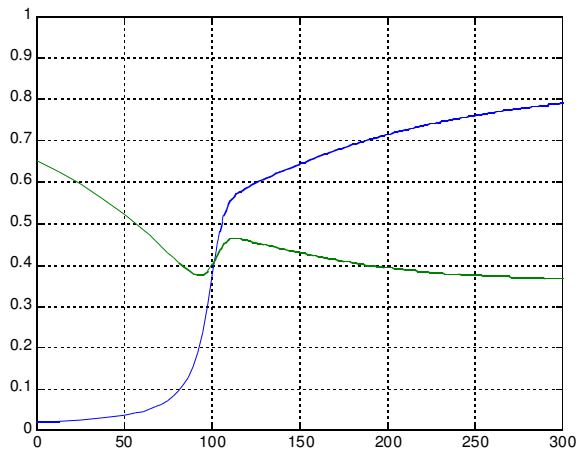
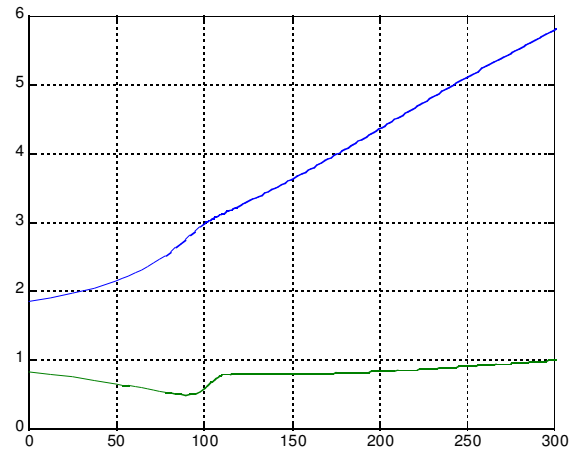
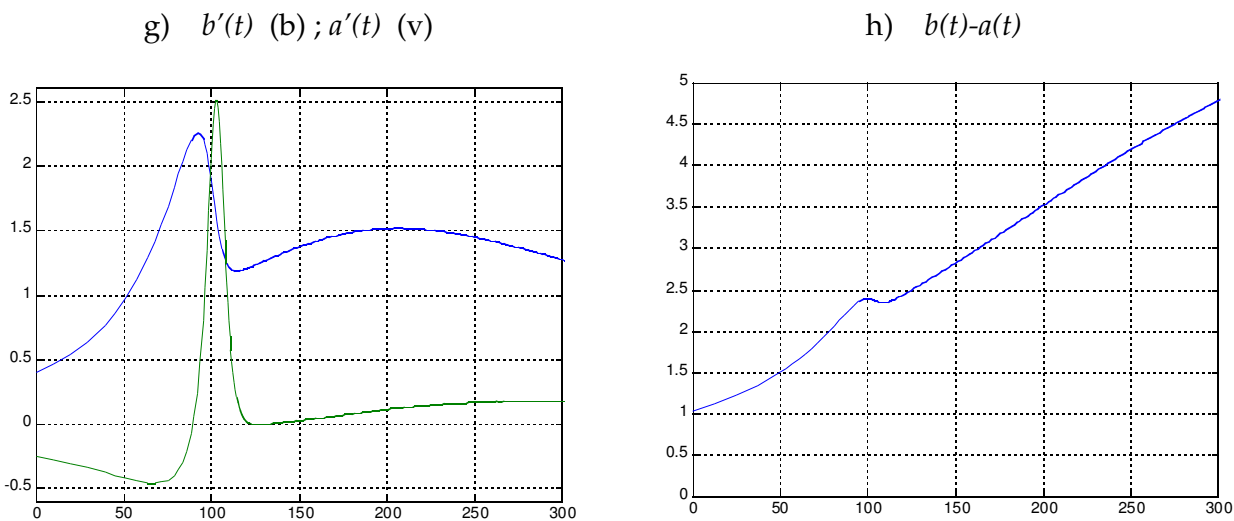
a) $m(t)$ b) $y(t)$ (b) ; $w(t)$ (v) ; $v(t)$ (r)c) $x(t)$ d) $K(t)$ e) $E(t)$ (b) ; $w(t)/y(t)$ (v)f) $b(t)$ (b) ; $a(t)$ (v)

Figure 1. Simulation de référence (suite)



- L'évolution du taux d'extraction $E=x/R$ est monotone croissante (Figure 1.e), mais celle de sa dérivée temporelle ne l'est visiblement pas. L'accélération de la hausse de E observée durant P2, alors que x est en pleine décroissance, s'explique via l'équation (7) : b et m varient modérément pendant que R continue de diminuer de façon sensible.

- Globalement, la part de la CI dans la production totale w/y décline pendant la trajectoire (Figure 1.e). Etant donné (12), ce rapport est une fonction décroissante de y . Son évolution est donc à l'opposé de celle de la production totale.

- La Figure 1.f illustre les comportements des indices frontière et marginal (b et a). Vu (14), b ne peut que croître. Cependant, cela n'implique pas que le processus de création dû aux investissements des acteurs économiques (mesuré par b') est constant, comme le confirme la Figure 1.g. Après une hausse soutenue durant P1, on observe que b' se retourne suite au retournement de y (durant P2). Le pic de b' survient en effet après celui de y . Ensuite, après un léger rebond suite au redémarrage de la croissance pendant la première partie de P3, b' tend inexorablement vers 0 parce que b se rapproche de sa limite b^* .

- Au vu de (5), l'indice marginal a est une fonction croissante de m et E . Rappelons que :
 (i) la productivité de la RN (en termes de bien) augmente avec la baisse de m , induit (à travers un premier effet externe) par l'investissement en nouveaux équipements (cfr. (16)) et (ii) les équipements en activité sont d'autant moins productifs que le taux d'exploitation de la ressource E est élevé (suite à un deuxième effet externe).

- Pendant P1, la baisse de m l'emporte sur la hausse (modérée) de E , en conséquence de quoi a diminue. Le processus de destruction (mesuré par a') est donc d'abord négatif, au sens où les entreprises mettent en œuvre des machines de moins en

moins efficaces avec le temps (Figure 1.g). Durant P1, la forte croissance de l'économie se traduit par une hausse du capital à la fois par le haut ($b' > 0$) et le bas ($a' < 0$). La baisse de a est possible parce que le modèle ignore à la fois l'obsolescence physique et les coûts de maintenance du capital existant (toutes les machines construites dans le passé sont susceptibles de produire).

- Avec le déclin de l'économie qui caractérise P2, la Figure 1.f montre que a remonte pendant P2, surtout à cause de la forte hausse de E . C'est pendant cette phase que le processus de destruction est le plus marqué (Figure 1.g), mais cela ne dure pas. On observe alors que les processus de création et de destruction (b' et a') évoluent en sens opposés. Cela est possible car a n'est pas seulement une fonction de b , mais aussi de R et m (cfr. (10)). On remarque également que le pic de a' est postérieur à celui de b' .
- Après avoir dégringolé avec la fin de la décroissance, a' recommence à croître mais à un rythme ralenti. Durant P3, le processus de création tiré par l'investissement permet d'engendrer une croissance modérée de l'économie, tout en impliquant un faible processus de destruction.

- L'évolution de l'intervalle des machines en activité est décrite par l'écart entre les deux courbes ($b-a$). A part un léger tassement durant P2, cet écart ne cesse de croître. La composante création du processus de destruction créatrice l'emporte donc (presque toujours) sur l'obsolescence.

4. Les variantes

Les variantes étudiées ci-dessous s'obtiennent en modifiant un paramètre ou une condition initiale par rapport à la SR. Par la suite, quand une quantité est dite augmenter ou diminuer dans le cadre d'une variante, c'est en comparaison avec la SR.

4.1 Augmentation du potentiel de PT (V1)

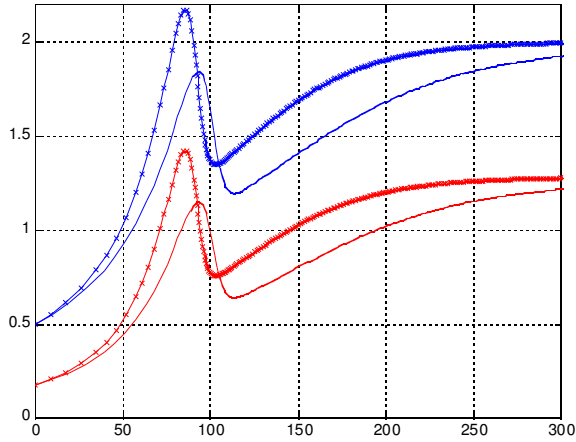
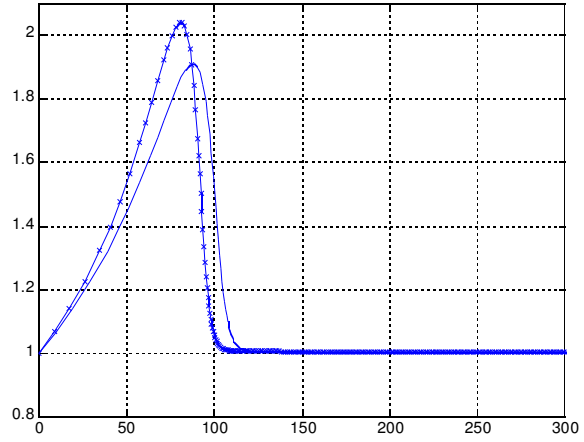
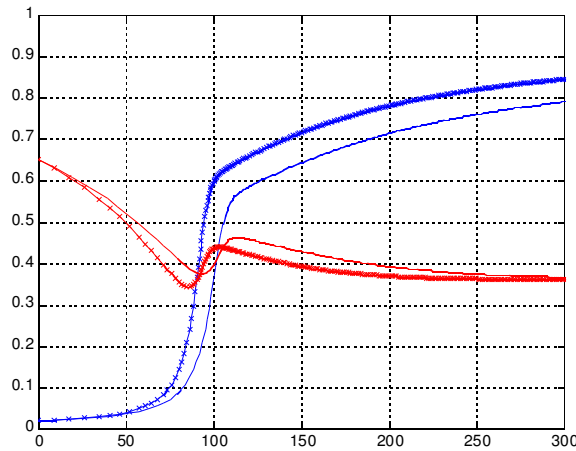
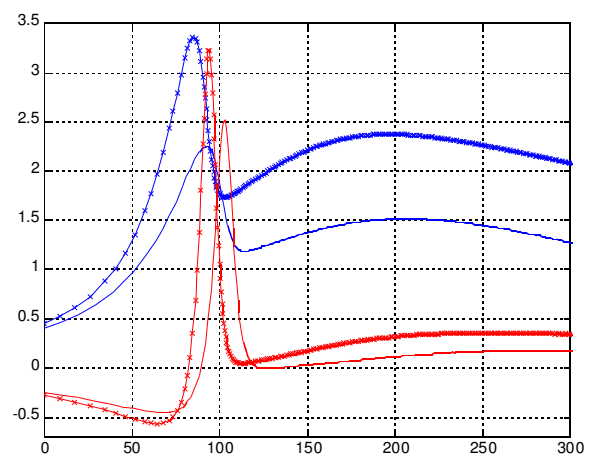
Ce potentiel se mesure par le rapport b^*/b_0 . Par rapport à SR, la variante V1 suppose un doublement de b^* . Les autres paramètres et les conditions initiales sont inchangés. V1 est illustrée par les Figures 2.a-d.

Dans ces figures comme dans les suivantes, les courbes en traits continus et avec des croix correspondent respectivement à la SR et à la variante. Avant d'analyser la variante V1, rappelons que l'impact d'une variation de b^* à très long terme (c-à-d à l'ES) a été étudié à la sous-section 2.2.

On peut énoncer les observations suivantes.

Figure 2. Variante 1 : augmentation du potentiel de PT

(SR : — ; V1 : -x ; (b) : bleu ; (r) rouge)

a) $y(t)$ (b) ; $v(t)$ (r)b) $x(t)$ c) $E(t)$ (b) ; $w(t)/y(t)$ (r)d) $b'(t)$ (b) ; $a'(t)$ (r)

- Par rapport à SR, l'allure des courbes est globalement préservée (ce constat vaudra également pour les simulations suivantes). En particulier, on retrouve au niveau des variables d'activité les trois phases P1, P2 et P3.

- Pendant P1, V1 est caractérisée par une croissance plus rapide de l'indice frontière b , impliquant une baisse plus rapide du contenu en ressource m . Il en découle une croissance sensiblement plus rapide de la production totale y et du PIB v (Figure 2.a). On observe également que le pic d'activité est avancé dans le temps.

- En lien avec le point précédent, la Figure 2.b montre que V1 se caractérise par une surexploitation de la RN plus forte par rapport à SR. Le pic d'extraction est également avancé. Sans surprise, il en découle que la courbe décrivant le taux d'extraction E augmente (Figure 2.c), tandis que celle décrivant le stock de RN R subit une translation vers la gauche (R_s variant à peine).

- La croissance plus vive de b implique que les entreprises utilisent des machines plus efficaces en termes de CI, d'où une diminution plus rapide du rapport w/y , la part de la CI dans la production totale (Figure 2.c).

- Enfin, la Figure 2.d montre que la variabilité des processus de création et de destruction (respectivement b' et a') est exacerbée par rapport à SR (les valeurs maximale et minimale des trajectoires s'éloignent). En particulier et comme pour la production totale et le PIB, leurs pics sont plus marqués et avancés.

4.2 Augmentation de r (V2)

Le paramètre r apparaît dans l'équation (16) et est un indicateur de la sensibilité du contenu en ressource d'un bien au PT. En effet, la dérivée temporelle de (16) conduit à

$$m' = -r[m - m_b]b' \quad (28)$$

Ceteris paribus, plus r est élevé, plus le contenu en RN m se réduit suite à une variation donnée de l'indice frontière b . Par rapport à SR, la variante V2 suppose une valeur de r augmentée de 25%. Les autres paramètres et les conditions initiales sont inchangés. V2 est illustrée par les Figures 3.a-d.

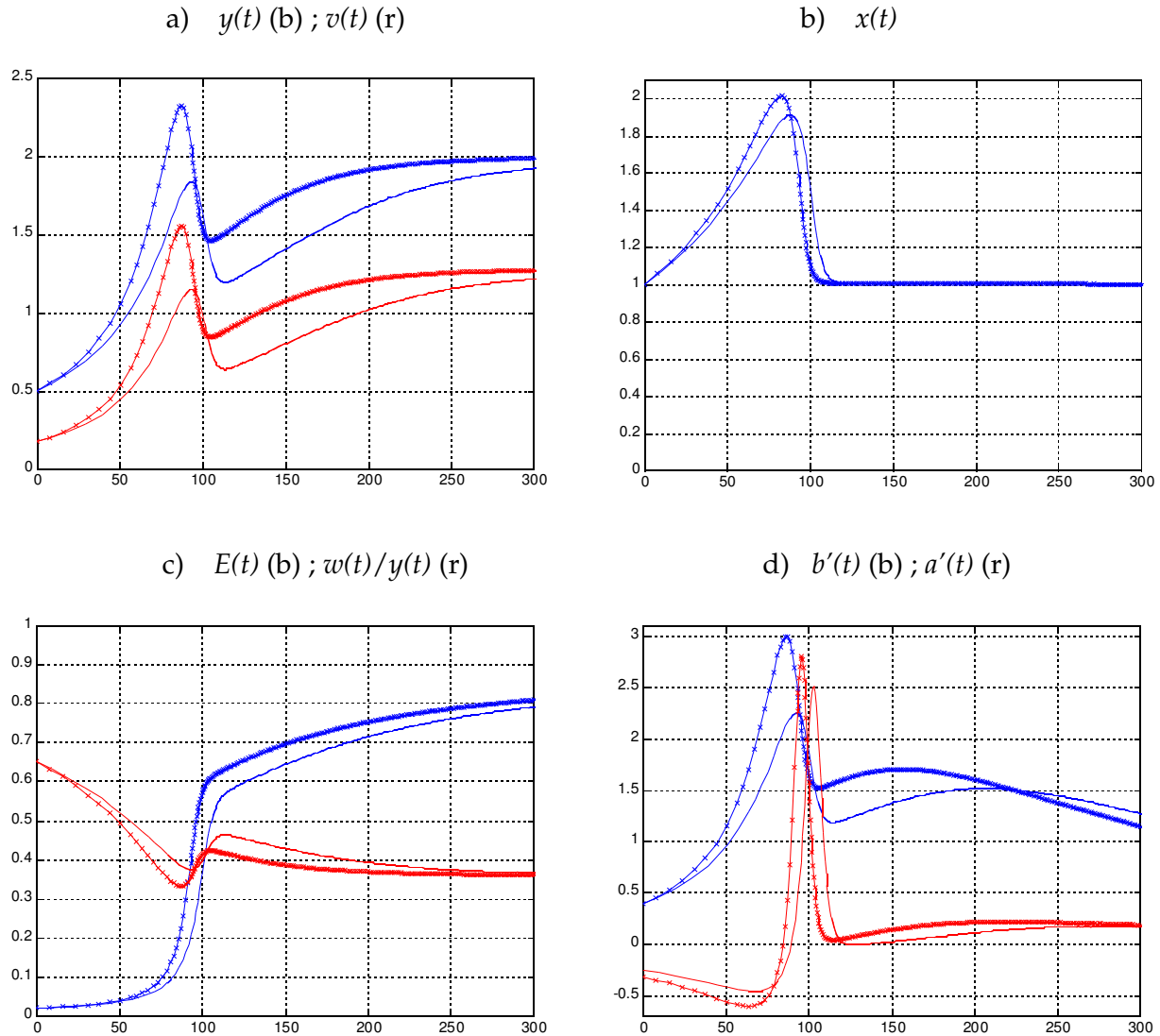
L'analyse conduit aux commentaires suivants.

- Rappelons d'abord que modifier r n'affecte pas l'ES (cfr. section 2). Les deux courbes relatives à une variable donnée convergent donc vers la même valeur asymptotique. Cela n'est pas évident au vu de certaines courbes parce que la convergence est très lente.

- A nouveau, l'allure générale des trajectoires est préservée.

- Vu (28), une hausse de r permet une baisse plus rapide du contenu en ressource m , d'où une croissance plus forte de la production totale y pendant la 1^{ère} partie de la trajectoire (Figure 2.a). Il en découle la même évolution de la quantité extraite de RN x (Figure 2.b), de l'investissement et donc du processus de création b' (Figure 2.d).

Figure 3. Variante 2 : augmentation du paramètre r
 (SR : — ; V2 : -x ; (b) : bleu ; (r) rouge)



- D'une manière générale, il apparaît que les déplacements des courbes (par rapport à la SR) vont dans le même sens que ceux observés dans le cadre de la variante V1. En particulier, les pics des variables de production (y et v) et celui de l'extraction x sont également plus prononcés et avancés dans le temps (Figures 3.a-b).

- Malgré la baisse plus rapide du contenu en ressource m , le stock de RN diminue (suggérant la présence d'un effet rebond). Cette baisse est suffisante pour qu'il en découle une hausse du taux d'extraction E (Figure 3.c).

4.3 Augmentation du stock initial de RN (V3)

Par rapport à SR, la variante V3 suppose une valeur de R_0 augmentée de 20%. Les autres paramètres et les conditions initiales sont inchangés.

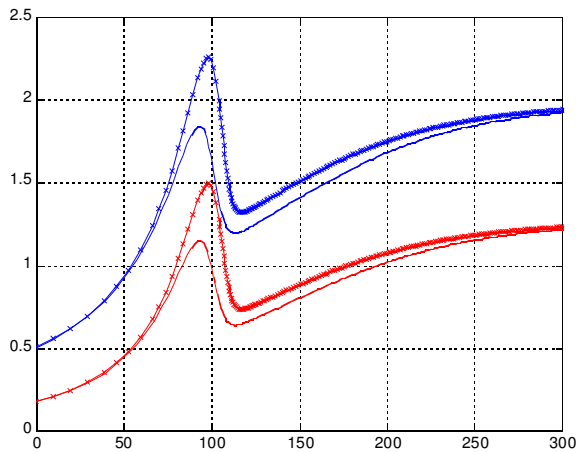
V2 est illustrée par les Figures 4.a-d. L'analyse conduit aux commentaires suivants.

- L'ES n'étant pas modifié, les deux courbes relatives à une variable donnée convergent donc vers la même valeur asymptotique.

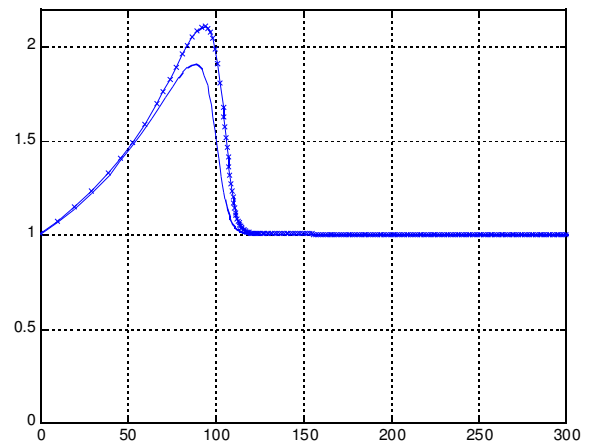
Figure 4. Variante 3 : augmentation du stock initial R_0

(SR : — ; V3 : -x ; (b) : bleu ; (r) rouge)

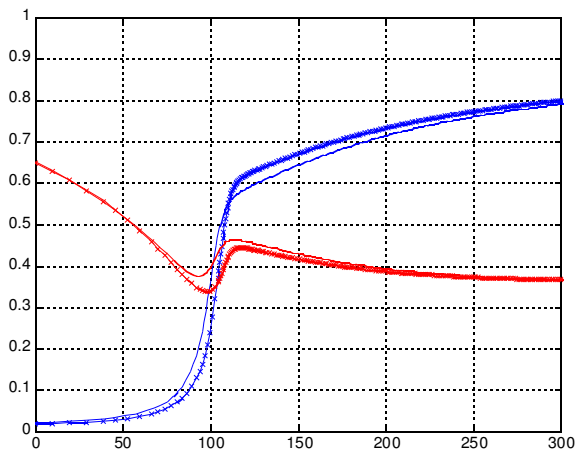
a) $y(t)$ (b) ; $v(t)$ (r)



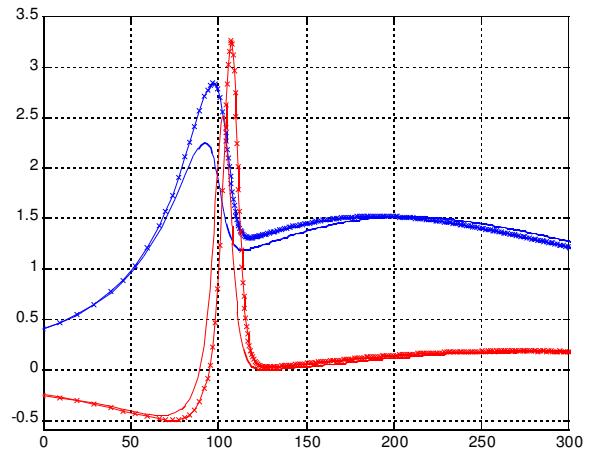
b) $x(t)$



c) $E(t)$ (b) ; $w(t)/y(t)$ (r)



d) $b'(t)$ (b) ; $a'(t)$ (r)



- Durant la phase de croissance P1, les trajectoires de la production globale y relatives à SR et V3 sont d'abord très proches. Il en va de même de v et x (Figures 4.a-b). Par rapport à SR, le fait de disposer d'un stock de RN plus élevé réduit l'effet externe lié au taux d'exploitation, ce qui rend les équipements plus productifs (cfr. (3)) et permet à la croissance de se poursuivre plus longtemps. P1 est allongée et les pics sont accentués et postposés (à l'opposé de V1 et V2 où les pics étaient avancés).

- A partir de la fin de P2 et pendant le reste de la trajectoire, x et y augmentent dans le cadre de V3. En vertu de (14) et comme le montre la Figure 4.d, il en va de même pour le processus de création b' (sauf en 2^{ème} de partie de P3 à cause du fait que b se rapproche de sa valeur asymptotique b^*).

- La phase de décroissance de l'économie étant plus prononcée et retardée, le pic du processus de destruction est lui-même accentué et retardé (Figure 4.d).

- L'évolution du taux d'extraction $E=x/R$ dépend de celles de x et R . Pendant P1 et P2, la hausse de R (par rapport à SR) l'emporte, d'où un taux d'extraction plus faible. A partir du début de la phase de redressement P3, R demeure virtuellement à son niveau stationnaire. x étant alors plus élevé, il en va de même pour E comme en témoigne la Figure 4.c.

Conclusion

Cet article étudie la trajectoire d'une économie contrainte par des ressources naturelles renouvelables mais limitées, dans le cadre d'un modèle de croissance à générations de capital permettant d'intégrer un processus de destruction créatrice à la Schumpeter. Ce faisant, il est au coeur d'une question importante et actuelle : celle de la possibilité de poursuivre la croissance économique dans un monde (bio-physique) fini.

L'économie étudiée est initialement riche en ressource, mais peu avancée sur le plan technique. Concernant la production totale et le PIB, les simulations font apparaître des trajectoires non monotones avec trois phases successives : (i) une phase de croissance forte mais non durable, « tirée » à la fois par la surexploitation de la ressource et le progrès technique ; (ii) après un pic, une phase de décroissance profonde et brutale ; (iii) une phase de croissance plus lente et durable, alimentée uniquement par le progrès technique, conduisant progressivement à l'équilibre stationnaire. Le ralentissement de la croissance et le retournement de l'économie sont dus à l'impact négatif sur la productivité des équipements de l'exploitation toujours plus prononcée de la ressource naturelle, impact qui finit par l'emporter sur le progrès technique induit par le processus de destruction créatrice.

Ces résultats sont dans la ligne de ceux de Meadows et al. (2004). En outre, le ralentissement de la croissance observé avant le pic d'activité n'est pas sans évoquer celui de l'économie mondiale de ces dernières décennies, et plus particulièrement celui des pays industrialisés (ce qui a ravivé le débat autour de leur entrée en "stagnation séculaire"). En revanche, les résultats du paragraphe précédent montrent que, dès lors que l'on prend en compte les lois de la physique, le processus de destruction créatrice ne permet pas de contourner les limites à la croissance, en opposition à certaines conclusions de la théorie de la croissance intégrant ce processus (Aghion et al., 2020).

L'exploitation de la ressource naturelle suit une évolution en cloche, avec un pic qui précède légèrement celui de l'activité économique. Pendant les deux premières phases, la ressource est surexploitée parce que le flux d'extraction dépasse le flux de renouvellement de la ressource. En conséquence, le stock de ressource décroît de façon monotone. Il faut toute la phase de décroissance de l'économie pour que l'exploitation retourne à un niveau soutenable, ce qui permet au stock de se stabiliser à un niveau beaucoup plus faible qu'en début de trajectoire.

Le processus de destruction créatrice est décrit par les variations temporelles des indices frontière et marginal (qui repèrent respectivement la frontière technologique et l'équipement en activité le moins efficace). La variation de l'indice frontière (la composante création du processus résultant de l'investissement dans de nouveaux équipements plus efficaces) a une évolution en trois phases similaire à celle de la production globale, sauf en fin de trajectoire suite à l'épuisement du progrès technique. La variation de l'indice marginal (qui caractérise l'obsolescence des équipements) va en sens inverse de celle de la production : faible voire négative en période de croissance, en forte augmentation en période de décroissance. Ce résultat est en porte-à-faux avec l'hypothèse d'un taux de dépréciation constant du capital, très généralement admise dans les modèles de croissance.

Par ailleurs, différentes variantes ont été étudiées afin de tester la sensibilité des résultats à certaines hypothèses. Elles montrent une grande stabilité de comportement du modèle, au sens où l'allure des trajectoires est globalement préservée. Elles montrent également qu'un plus grand potentiel de progrès technique ou un plus grand stock initial de ressource naturelle se traduit par un pic de la production plus élevé par rapport à la SR, accentuant ainsi la non monotonie de la trajectoire de la production. Ce dernier constat vaut aussi pour l'investissement en nouveaux équipements et l'obsolescence des équipements existants.

Le modèle développé dans cet article est susceptible de développements dans plusieurs directions. Deux voies de recherche méritent d'être mises en avant. La première serait de rendre coûteux la maintenance des équipements non utilisés ou de prendre en compte l'usure physique du capital à côté de l'obsolescence économique. Le processus de destruction créatrice pourrait en être intensifié. La deuxième serait d'introduire le facteur travail à côté du capital et de la ressource, ce qui permettrait d'enrichir la discussion en rapport avec le marché du travail. Dans cette optique et étant donné que le modèle est de très long terme, endogénéiser la population serait une extension utile. Ces deux pistes de recherche ne sont pas exhaustives.

Bibliographie

Aghion P. et P. Howitt (1992). "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica*, 60(2), 323-351.

Aghion, P., P. Howitt et P.C. García (1998). *Endogenous Growth Theory*, MIT Press, Cambridge.

Aghion P., C. Antonin et S. Bunel (2020). *Le pouvoir de la destruction créatrice*, Editions Odile Jacob.

Anderson (1987). "The production process : inputs and wastes", *Journal of Environmental Economics and Management*, 14, 1-12.

Baumgartner S. (2004), "The Inada conditions for material resource inputs reconsidered", *Environmental and Resource Economics*, 29, 307-322.

Boucekkine R., O. Licandro et C. Paul (1997). « Differential-difference equations in economics: On the numerical solution of vintage capital growth models », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 21, 347-362.

Boucekkine R., M. Germain, O. Licandro et A. Magnus (1998). « Creative Destruction, Investment Volatility, and the Average Age of Capital », *Journal of Economic Growth*, 3, 361-384.

Bretschger L. et S. Smulders (2012). "Sustainability and substitution of exhaustible natural resources. How structural change affects long-term R&D-investments", *Journal of Economic Dynamics & Control*, 36, 536-549.

Campiglio E. (2014). "The structural shift to green services: A two-sector growth model with public capital and open-access resources", *Structural Change and Economic Dynamics*, 30, 148-161.

Capellàn-Pérez I. et al. (2020). « MEDEAS: a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints », *Energy & Environmental Science*, 3, 986-1017.

Dale M., S. Krumdieck and P. Bodger (2012). "Global energy modelling - A biophysical approach (GEMBA). Part 2: Methodology", *Ecological Economics*, 73, 158-167.

Faber M. et J. Proops (1993). "Natural resource rents, economic dynamics and structural change: a capital theoretic approach", *Ecological Economics*, 8, 17-44.

Fagnart J.-F., M. Germain et B. Peeters (2020). « Can the Energy Transition Be Smooth? A General Equilibrium Approach to the EROEI », *Sustainability*, 12(3), 1176.

Germain M. (2014). « Croissance et déclin d'une économie avec ressource renouvelable - le rôle de la population », *Brussels Economic Review*, 57(3), 347-371.

Germain M. (2020). «Limits to growth and structural change », *Structural Change and Economic Dynamics*, 55, 204-221.

Lopez R., G. Anriquez et S. Gulati (2007). "Structural change and sustainable development", *Journal of Environmental Economics and Management*, 53, 307-322.

Meadows D., J. Randers et D. Meadows (2012). *Les limites à la croissance (dans un monde fini). Le Rapport Meadows 30 ans après*, Editions Rue de l'échiquier.

Meran G.(2019). « Thermodynamic constraints and the use of energy-dependent ces-production functions. A cautionary comment », *Energy Economics*, 81, 63-69.

Solow R., J. Tobin, C. Von Weizsacker et M. Yaari (1966). "Neoclassical growth with fixed factor proportions", *Review of Economic Studies* 33, 79-115.

Solow R. (1974). "Intergenerational equity and exhaustible resources", *Review of Economic Studies*, 41, 29-45.

Stiglitz J. (1974). "Growth with exhaustible natural resources : efficient and optimal growth path", *Review of Economic Studies*, 41, 123-137.