

Des limites à la croissance verte

Marc GERMAIN¹

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

Résumé : Proposé en réponse à l'insoutenabilité de la croissance brune actuelle, le concept de croissance verte fait débat, en particulier du point de vue de sa faisabilité. Cet article a pour but de contribuer à ce débat sur la base d'un raisonnement combinant (i) le concept de destruction créatrice et (ii) la distinction entre limites environnementales, limites physiques à long terme et limites technologiques à court et à moyen termes. La combinaison des limites environnementales et physiques impose qu'une croissance (même verte) indéfinie dans un monde fini est impossible. A moyen terme, à cause d'un effet d'impact (dû aux pollutions) et d'un effet d'éviction (qui détourne le capital disponible du secteur produisant ce facteur), les limites technologiques sont susceptibles non seulement de ralentir la croissance mais aussi d'amener l'économie en décroissance (au moins transitoirement). Si les innovations permettent continuellement de repousser les limites technologiques (avec des rendements décroissants à cause des limites physiques), elles exacerbent en même temps les contradictions entre croissance et limites environnementales. Loin de seulement constituer la solution, les innovations sont aussi à la source des problèmes parce qu'elles sont inscrites au cœur de la destruction créatrice à la base de la croissance. Vu les limites technologiques et l'urgence des multiples défis écologiques au niveau global, une transition de l'actuelle croissance brune vers une croissance verte dans les prochaines décennies ne paraît pas possible. Pour remplacer la croissance brune, l'alternative n'est pas entre croissance verte et décroissance, mais entre décroissance subie et décroissance choisie.

Mots clés : croissance verte, destruction créatrice, progrès technique, recyclage, limites à la croissance.

Introduction

Il y a aujourd'hui un large consensus sur le fait que « le modèle de croissance [économique] actuel, qui repose sur une consommation toujours plus accrue de ressources naturelles et sur la dégradation de l'environnement, doit être profondément transformé. Les risques liés aux impacts du changement climatique ou à l'érosion de la biodiversité sont inacceptables, et la « croissance brune » pourrait même s'autodétruire par la hausse du prix des matières premières ou par le coût économique de la pollution. » (Demailly, 2013). En réponse au caractère insoutenable de la croissance brune a été proposé le concept de croissance verte, c'est-à-dire une croissance de l'économie qui serait compatible avec la préservation de l'environnement. Ce concept fait débat tant sur le plan de sa désirabilité et sur celui de sa faisabilité dans un monde fini. Cet article se limite à la deuxième partie de ce débat, la question de la faisabilité².

¹ Je remercie vivement H. Jeanmart, L. Possoz et J.-P. Raskin pour leurs multiples explications et commentaires. Contact: marc.germain@univ-lille.fr

² La désirabilité de la croissance, même verdie, est surtout remise en question au-delà d'un certain niveau de développement. Il est légitime de s'intéresser d'abord à sa faisabilité, car si la croissance verte devait se révéler infaisable, la question de sa désirabilité devient secondaire.

La principale critique à la croissance verte repose sur l'idée qu'il existe des limites environnementales à une économie en expansion, liées à la finitude des ressources naturelles et à la capacité limitée de l'environnement à absorber les différentes pollutions induites par l'activité économique. La croissance verte n'est pas faisable au sens où une économie en croissance, *même verdie*, finira tôt ou tard par « heurter » ces limites. C'est en particulier la thèse du fameux rapport au Club de Rome de Meadows et al. (2012), de Parrique et al. (2019), Hickel et Kallis (2020), Bihoux (2019), et plus généralement des partisans du mouvement de la Décroissance. Dès lors, rompre avec les effets négatifs de la croissance brune actuelle implique de sortir de la croissance.

En appui du paragraphe précédent, une récente et très étendue revue de la littérature (Haberl et al, 2020) a montré (i) qu'un découplage absolu entre PIB, consommations de ressources naturelles et émissions de GES n'a jamais existé dans le passé à un *niveau mondial* et (ii) qu'un tel découplage supposerait dans le futur, vu l'urgence des questions écologiques, des taux de réduction des intensités matérielles et énergétiques bien supérieurs à ceux observés jusqu'ici.

La défense de la croissance verte ne nie pas l'existence des limites environnementales, mais postule que celles-ci peuvent être contournées, notamment grâce au progrès technique et à des politiques de gestion de l'environnement appropriées. En particulier, l'innovation permettrait un découplage *absolu* entre la production et son empreinte environnementale. Autrement dit, celle-ci pourrait ne plus augmenter, voire diminuer, malgré la croissance de la production. La conclusion est alors tout autre : dès lors que la croissance est supposée désirable (parce que garante du progrès matériel), il n'est pas nécessaire d'en sortir mais de la verdir.

Cet article a pour but de contribuer au débat autour de la faisabilité de la croissance verte, sur la base d'un raisonnement combinant :

- le concept de destruction créatrice à la base de la croissance ;
- la distinction entre limites environnementales, physiques et technologiques ;
- la description des possibles conséquences des limites sur la trajectoire de l'économie.

L'analyse est faite à un niveau global (mondial) et en cinq étapes. Dans la section 1, on décrit un moteur essentiel de la croissance d'une économie capitaliste, à savoir le processus de destruction créatrice conceptualisé par Schumpeter. En croissant, l'économie augmente son empreinte environnementale et finit inévitablement par se « heurter » à des limites. La section 2 propose une typologie distinguant entre limites environnementales (tant en termes de ressources que de pollutions), limites physiques et limites technologiques. Au contraire de ces dernières (qui sont déterminées par les connaissances humaines), les limites environnementales et physiques sont déterminées par la Nature. Le progrès technique élargit l'espace des possibilités de production de l'économie en reculant les limites technologiques avec le temps, mais demeure borné par les limites physiques. Ce sont les limites technologiques qui déterminent l'espace des possibilités de l'économie pour les décennies qui viennent.

La section 3 illustre les différentes limites dans le cadre d'un modèle « qualitatif » avec trois grandes activités (exploration/exploitation des ressources naturelles, production de biens et services, recyclage/traitement des déchets et pollutions). Dans la section 4, on aborde la question de la faisabilité de la croissance verte à travers les trois instruments de découplage que sont le progrès technique, la substitution entre facteurs et le recyclage. La section 5 résume quelques résultats de la littérature découlant de la « rencontre » entre croissance économique et limites. La conclusion revient sur la polémique autour de la faisabilité de la croissance verte décrite ci-dessus, tout en faisant le lien avec la question de la sortie ou non du capitalisme.

Destruction créatrice et croissance

Dans une économie capitaliste, un mécanisme fondamental à la base de la croissance est le processus de *destruction créatrice*. Selon Aghion et al. (2020, p.11), la destruction créatrice est « le processus par lequel de nouvelles innovations se produisent continuellement et rendent les technologies existantes obsolètes, de nouvelles entreprises viennent constamment concurrencer les entreprises en place, et de nouveaux emplois et activités sont créés et viennent sans cesse remplacer des emplois et activités existants ». C'est la concurrence entre les entreprises qui les pousse à essayer d'innover, de façon à augmenter leurs profits présents et futurs. Ceteris paribus, une innovation (à condition d'être réussie) leur permet d'augmenter leur richesse (leurs fonds propres) et ainsi leurs chances de survie. A moins d'être protégée de la concurrence, une entreprise qui ne jouerait pas le jeu ou serait durablement moins innovante que ses rivales finirait par disparaître.

D'une façon générale, une innovation réussie augmente la compétitivité des entreprises qui en bénéficient, ce qui accroît leurs débouchés et donc leur permet de produire plus³. Cette hausse de la production se traduit par une série d'effets « multiplicateurs » (notamment via le surplus de revenus qu'elle induit), engendrant d'autres hausses de la production dans le reste de l'économie.

Par ailleurs, n'étant pas passifs et étant placés dans un contexte capitaliste caractérisé par la propriété privée des moyens de production et le chacun pour soi, les entrepreneurs et travailleurs éliminés par l'innovation se doivent de réagir, soit en créant de nouvelles activités, soit en offrant leurs temps et compétences à d'autres, qui pourront ainsi accroître leurs activités. Cet effet, que l'on qualifiera par la suite d'*effet induit de la destruction créatrice*, repose sur la liberté d'entreprendre (seul ou en association) et le salariat, deux fondements du capitalisme.

Schématiquement, dans le cadre d'une économie capitaliste, on a la chaîne de causes à effets suivante : **concurrence → innovations → destruction créatrice → croissance**

³ Par exemple parce que l'innovation réduit leurs coûts de production (ce qui leur permet de baisser leurs prix) ou parce que l'innovation améliore la qualité de leurs produits (ce qui les rend plus attractifs).

Cette séquence est une des causes fondamentales de l'« addiction » à la croissance d'une économie capitaliste, même si elle n'est pas la seule (cf. Encadré 1). Dès lors que la croissance est supposée associée au progrès matériel, ce processus est considéré comme vertueux par ses avocats, et ce d'autant plus qu'il existe encore de grandes zones de pauvreté dans le monde.

Le raisonnement précédent ignore cependant l'environnement naturel dans lequel toute économie est insérée. La production de biens et services (B&S) est non seulement un processus de création de valeur, mais aussi un processus de transformation de matières et d'énergies (provenant de l'environnement) par les facteurs humains (travail et capital), un processus soumis aux lois de la Nature (par exemple la loi de conservation de la matière).

La finitude de l'environnement et les lois de la Nature imposent des limites à l'économie. En faisant croître l'économie, le processus de destruction créatrice va faire en sorte qu'elle se rapproche de ces limites, voire en dépasse certaines. La trajectoire de l'économie est alors déterminée par l'interférence entre destruction créatrice et limites (et non pas seulement par la destruction créatrice).

Encadré 1 L'addiction à la croissance

Outre la destruction créatrice, la croissance démographique et la rivalité entre Etats (exacerbée par la globalisation) contribuent également à la croissance économique. Comme l'écrit Cassiers : « L'addiction à la croissance dépasse largement l'individu : elle affecte aussi les institutions et les collectivités » (Cassiers, p.22). En particulier, chaque Etat veille à maintenir ou améliorer la compétitivité de son économie via le soutien à la Recherche et Développement (y compris dans le domaine militaire). Outre la nécessité pour un Etat de garder (au minimum) son rang, la lutte contre le chômage est régulièrement avancée comme une raison majeure pour encourager la croissance au niveau macroéconomique.

Pour écouler le surplus de production induit par la destruction créatrice, les entrepreneurs se doivent d'étendre leurs débouchés, notamment via l'extension de la société de consommation. C'est le rôle de la publicité, des stratégies de vente (par exemple les promotions), de la mode, de l'obsolescence (programmée ou non), du crédit à la consommation, via la « stimulation » des besoins de consommation des ménages. Comme la croissance est continue, il s'agit d'alimenter une véritable addiction à la consommation. Celle-ci « commence dès l'école maternelle, par l'effet de mode que créent les marques et le besoin de comparaison sociale » (Cassiers, p.22). Elle se poursuit à l'âge adulte par la mise en pratique des comportements appris dans l'enfance, et par leur transmission à la descendance, contribuant ainsi aux mécanismes de reproduction sociale (Brugvin, p.34).

Depuis longtemps, et en particulier depuis l'émergence de la société de consommation, la publicité et le marketing utilisent les enseignements de la psychologie pour flatter les besoins de domination, de possession, de reconnaissance, de narcissisme... tout en adaptant leurs messages en fonction des catégories sociales (Brugvin, p.26). Sur ce point, voir aussi Dubuisson-Quellier (2022) et sa distinction éclairante entre consommation ostentatoire pour les nantis, consommation réfléchie pour la classe moyenne éduquée et consommation contrainte pour la classe laborieuse.

Catégorisation des limites

L'expression « limites à la croissance économique » fait référence à des contraintes susceptibles de brider la croissance d'une économie, voire de l'amener en décroissance.

Limites environnementales et physiques (limites I, II, III)

Les limites imposées par la Nature sont environnementales et physiques. Trois catégories de limites peuvent être distinguées :

I) *les limites en ressources naturelles*, c.-à-d. les quantités existantes de matières et énergies, renouvelables et non renouvelables (par exemple le flux d'énergie solaire arrivant sur Terre).

II) *les limites en termes de pollutions*, liées à la capacité limitée de l'environnement à absorber et « retraiter » toutes les pollutions induites par l'activité économique.

III) *les limites physiques* qui, en lien avec la *loi de conservation de la masse* et les *lois de la thermodynamique*, imposent un minimum absolu strictement positif aux quantités de matières et d'énergies exigées par la production de tout bien ou service.

En outre, la loi de conservation de la masse impose qu'au cours de toute transformation physique ou chimique (à l'exception des réactions nucléaires), la masse se conserve, mais aussi que le nombre d'atomes de chaque élément chimique se conserve. Cette loi, associée à la célèbre citation « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » a une conséquence importante pour notre propos : toute matière extraite de l'environnement finit tôt ou tard par y retourner sous forme de déchet ou pollution. Les limites environnementales regroupent les catégories I et II et sont liées à la finitude de l'environnement terrestre au sein duquel évolue l'économie. Elles peuvent être définies à un niveau local (ex : la capacité de charge en têtes de bétail d'une prairie) ou global (la planète). A ce dernier niveau, à la suite de Rockström et al. (2009) et Steffen et al. (2015), neuf limites ont été quantifiées, en rapport avec : l'acidification des océans, la couche d'ozone, le changement climatique, les cycles de l'azote et du phosphore, l'eau douce, la biodiversité, l'affectation des sols, les nouvelles entités (métaux lourds, substances synthétiques et radioactives), la charge atmosphérique en particules. En 2022, seules les deux premières n'avaient pas été franchies, la dernière n'étant pas encore quantifiée au niveau mondial⁴.

Dans la littérature en rapport avec les limites à la croissance, ce sont le plus souvent les limites environnementales qui sont évoquées. Or, dans un monde fini, c'est la conjonction des limites environnementales *et* physiques qui implique que, même dans des conditions idéales, une croissance indéfinie est impossible. L'identité suivante liant production et consommation de matière l'illustre simplement :

$$Y = T / m_y$$

où Y, T et m_y désignent respectivement la production de B&S, la consommation de ressources et l'intensité en ressource d'une unité de B&S. Pour que Y croisse indéfiniment, il suffit que (i) T croisse indéfiniment ou que (ii) le progrès technique (PT) fasse tendre m_y vers zéro. La conjonction des limites I et III rend une telle

⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites_plan%C3%A9taires

croissance impossible : T est borné supérieurement et m_y est borné inférieurement par une constante strictement positive (cf. infra). L'action d'une seule de ces deux limites ne suffit pas. Un raisonnement similaire peut être tenu concernant la pollution, à partir de l'identité suivante :

$$Z = m_z Y$$

où Z et m_z désignent respectivement la pollution totale générée par la production de B&S et la pollution par unité de B&S. Les limites II exigent que Z soit borné supérieurement. Si Y croît indéfiniment, cela n'est possible que si le PT permet à m_z de tendre vers zéro simultanément. Or les limites III (en particulier le principe de conservation de la masse) empêchent qu'il puisse en être ainsi (cf. infra).

Certaines limites sont lointaines

Le résultat du paragraphe précédent, qui épouse le sens commun⁵, est en pratique d'un intérêt relatif. La position de l'économie mondiale actuelle par rapport aux limites environnementales varie en effet grandement. Si nombre de ressources sont déjà surexploitées (ex : ressources halieutiques) et plusieurs limites II sont déjà dépassées à l'échelle planétaire, certaines ressources sont en revanche présentes dans l'environnement en quantités gigantesques par rapport aux besoins de l'économie mondiale actuelle. En voici trois exemples :

- le flux solaire arrivant sur Terre représente à peu près 9000 fois la consommation mondiale d'énergie primaire actuelle⁶.
- Un grand nombre de métaux sont présents dans nos jardins, y compris ceux nécessaires à l'industrie électronique⁷. Plus généralement, les matières premières minérales sont partout dans la croûte terrestre ou dans les océans. Même si les estimations des stocks existants varient grandement selon les sources, ceux-ci représenteraient au minimum des milliers d'années de production actuelle.
- Alors qu'il ne représente que 3 % de l'eau sur terre, le stock d'eau douce représente plus de 13000 années de consommation actuelle (Boutaud et Gondran, 2020)⁸.

De même, certaines technologies du futur suggèrent que les limites physiques sont encore lointaines. Dans sa première promenade, Bihouix (2019) parcourt ainsi une

⁵ Et qui a conduit à la fameuse boutade attribuée à Kenneth Boulding : « Celui qui croit que la croissance peut être infinie dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste ».

⁶ Selon le GCEP, le flux solaire se monte à 162000 TW (http://gcep.stanford.edu/pdfs/GCEP_Exergy_Poster_web.pdf). Selon BP, la consommation mondiale d'énergie primaire en 2019 (avant la crise du covid) valait 581,51EJ (<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energyeconomics/statistical-review/bp-stats-review-2021-primary-energy.pdf>).

⁷ Source : « Terres rares et métaux critiques. Pénurie ou incurie ? », présentation de E. Pirard au Collège de Belgique en 2013, p.21 (<https://orbi.uliege.be/handle/2268/160057>).

⁸ Selon ces auteurs, le stock et la consommation d'eau douce mondiaux sont respectivement estimés à 35 millions km³ et 2600 km³/an (p. 67 et 70).

multitude de promesses technologiques dans les domaines de l'énergie (dont la fusion nucléaire), des transports, des villes, de l'agriculture, des ressources naturelles, des nouvelles technologies de l'information et de la communication et de l'intelligence artificielle, de la robotique, de la médecine, sans oublier celles qui permettraient de réparer les dommages à l'environnement.

Au vu des deux paragraphes précédents, moyennant substitution de ressources abondantes à celles qui sont surexploitées, les limites I et III ci-dessus ne semblent constituer un obstacle à la poursuite de la croissance qu'à très long terme (au-delà du siècle voire beaucoup plus). Il existerait donc encore un gros potentiel de croissance, et en consacrant une part suffisante de l'activité économique au recyclage et au traitement des pollutions, cette croissance pourrait être suffisamment verdie pour être compatible avec les limites environnementales de type II.

D'ailleurs, sommes-nous vraiment dans un monde fini ? Les ressources de l'espace paraissent a priori infinies et certains anticipent une exploitation minière de l'espace dans les vingt ou trente prochaines années⁹...

Limites technologiques (limites IV)

Malheureusement, toutes les ressources naturelles ne sont pas ou plus disponibles en quantité gigantesque (ex : l'espace habitable, nombre d'espèces vivantes) et la substitution entre elles n'est pas toujours simple. Par ailleurs, la disponibilité réelle d'une ressource ne dépend pas seulement de sa quantité dans l'environnement, mais aussi de sa « qualité » (en termes d'accessibilité, de concentration...).

En outre, certaines limites environnementales déjà franchies appellent à une réaction « urgente », qui ne peut pas attendre les technologies du futur évoquées plus haut. La question de la poursuite et du verdissement de la croissance se pose donc aussi à *moyen terme* (au cours des prochaines décennies).

Dans ce cadre, il importe de prendre en compte non pas les limites physiques mais les *limites technologiques*, c.-à-d. celles qui sont déterminées par les meilleures technologies *actuelles ou prévisibles* à court et à moyen termes. Celles-ci sont plus strictes que les limites physiques, même si l'écart diminue avec le temps grâce au PT (cf. infra).

A cause de ces limites technologiques, les énormes ressources évoquées ci-dessus sont loin d'être toutes exploitables. Ainsi, en écho aux trois exemples du point 2.2 :

- Sur le plan énergétique, Dupont (2021) montre que le potentiel éolien et solaire mondial serait compris entre 1061 EJ/an et 2016 EJ/an, à comparer avec une production d'énergie primaire en 2019 de 581,51 EJ. On serait donc dans le meilleur des cas dans un rapport de 3,5/1, très loin du rapport 9000/1 mentionné plus haut.

⁹ <https://www.science.lu/fr/nouvelle-dynamique-dans-lespace/pourquoi-l'exploitation-miniere-spatiale-semble-soudain-possible>

- Nombre de gisements sont hors d'atteinte ou à des concentrations beaucoup trop faibles pour être exploitables. Selon les estimations de Halloy (2018), la grande majorité des pics de production d'une trentaine de métaux ou substances chimiques surviendront durant le 21ème siècle.

- La quantité maximale d'eau exploitable est évaluée entre 12000 et 15000 km³ (Boutaud et Gontran, 2020, p.70), à comparer avec une consommation mondiale évaluée à 2600 km³.

Dans certains cas, le problème est ailleurs. Les ressources sont abondantes et pourraient être extraites de l'environnement à un coût acceptable, mais on ne sait pas (encore) les transformer en un usage utile. Un exemple est celui du deutérium pour la fusion nucléaire¹⁰.

Quand les ressources sont utiles, leur disponibilité pour l'économie dépend, à cause des limites technologiques, autant de leur « qualité » (en termes d'accessibilité, de concentration...) que de leur quantité dans l'environnement. Autrement dit, c'est la technologie qui détermine la qualité minimale que les ressources doivent avoir pour être exploitables.

Les limites technologiques dont il a été question ci-dessus concernent les ressources. Mais c'est encore la technologie qui détermine la production maximale de B&S qui peut être obtenue des ressources exploitées, ainsi que les potentiels du recyclage et du traitement des pollutions.

Au final, à un certain moment du temps t , c'est la *conjonction* des limites environnementales et technologiques qui fixent la *frontière* de l'espace des possibilités de production de l'économie.

Les contraintes en capital

En pratique, une économie n'est jamais sur cette frontière, à cause de la disponibilité limitée en travail et capital. Ce dernier facteur est notamment soumis aux contraintes suivantes :

- Tous les équipements installés au temps t n'intègrent pas la technologie la plus récente (ex : parcs automobile et immobilier). En effet, il faut du temps et des moyens pour renouveler le capital existant.

- La technologie en vigueur ne détermine pas seulement ce qui est techniquement faisable, mais aussi le coût en capital de toute activité économique. Par exemple, le coût d'exploitation d'une ressource est une fonction décroissante de la qualité et devient prohibitif quand celle-ci tend vers son niveau minimal pour que la ressource soit techniquement exploitable. Il en découle que la rareté du capital au temps t contraint les agents économiques à faire des choix, avec entre autres la conséquence

¹⁰ Qui arrivera trop tard pour contribuer à la transition énergétique des prochaines décennies, nécessaire pour remplacer les énergies fossiles afin de lutter contre le réchauffement climatique.

que des ressources techniquement exploitables ne sont pas exploitées, et que des déchets/pollutions ne sont pas recyclés ou traités.

La technologie en vigueur (effectivement utilisée), la quantité disponible de facteurs humains (notamment de capital), les choix dans l'allocation de ces facteurs déterminent conjointement ce qui est exploité, produit, recyclé, retraité, et donc la place de l'économie à un moment donné au sein de l'espace des possibilités de production.

On terminera cette section par deux remarques. Tout d'abord, au vu des paragraphes précédents, il découle que trois raisons expliquent que la production effective à la date t est inférieure à la production maximale de B&S permise par les limites physiques :

- le potentiel de production correspondant aux limites technologiques à la date t est inférieur à celui des limites physiques ;
- à cause du temps nécessaire à leur renouvellement, l'ensemble des facteurs humains (en particulier le capital) à la date t n'intègre pas les meilleures technologies disponibles à cette date ;
- les contraintes en capital disponible qui font que certaines activités techniquement réalisables ne le sont pas ou plus (parce que devenues trop coûteuses par rapport à d'autres¹¹).

Par ailleurs, on soulignera que les limites à la croissance ne sont pas un « mur » auquel l'économie finirait par se heurter à un certain moment. En effet, outre que certaines se déplacent avec le PT,

- leur effet peut se faire ressentir progressivement (par exemple via la hausse des coûts d'exploitation des ressources).
- au niveau environnemental, il peut y avoir dépassement de la limite (par exemple, un stock renouvelable peut être surexploité ou la capacité de charge de l'environnement peut être dépassée).

Modélisation de l'économie et des limites

Le but du modèle décrit ci-dessous est de mettre schématiquement en évidence les limites environnementales, physiques et technologiques de l'économie. C'est pourquoi il est purement physique et ignore les flux monétaires et financiers.

Description générale

Du point de vue de la production, une économie peut être considérée comme un vaste ensemble d'activités très diversifiées. Celles-ci sont regroupées en trois secteurs de

¹¹ A l'exemple de l'exploitation charbonnière de Wallonie ou du Nord-Pas de Calais abandonnée pour des raisons économiques et non d'épuisement.

production¹² :

- exploration et exploitation de ressources naturelles (e)
- production de B&S (y)
- recyclage et traitement de la pollution (r)

Outre ces trois secteurs, le modèle distingue également l'activité des ménages (m).

La figure 1 décrit les quatre secteurs et les interactions entre eux et avec leur environnement. Elle montre que l'économie est entièrement insérée dans son environnement. Comme il est mondial, l'ensemble du système est *fermé* (au sens thermodynamique), c'est-à-dire sans échange de matière avec l'extérieur mais ouvert au niveau énergie (comme en témoignent les flèches « rayonnement solaire » et « rayonnement infrarouge » de la figure). Les flux et stocks de ressources ou de B&S sont représentés comme des agrégats mais sont en réalité vectoriels, avec de nombreuses composantes.

Dans la tradition de l'économie écologique, toutes les activités produisent en utilisant deux grandes catégories de facteurs :

- les *facteurs transformés* qui se retrouvent en tout ou en partie dans la production. Il s'agit de flux de matières/énergies venant de l'environnement (pour le secteur e), de déchets (pour le secteur r) et de la consommation intermédiaire (pour tous les secteurs). Une partie de la consommation intermédiaire est transformée (ex : farine), une autre est dissipée en chaleur ou transformée en déchets/pollutions (ex : lubrifiant, électricité).
- les *facteurs humains ou transformants* qui résultent de la combinaison du capital physique (les équipements), du capital humain et de la force de travail.

Facteurs humains (FH) et transformés jouent des rôles très différents au sein du processus de production. Les premiers (produits par l'activité humaine) extraient et transforment les seconds pour en faire des B&S destinés à être consommés. Il en découle que facteurs humains et transformés sont fondamentalement complémentaires (les possibilités de substitution entre ces derniers sont très limitées).

Pour agir, le capital physique doit être alimenté par de l'énergie finale. En effet, extraire des matières premières, stocker des informations, offrir un service en ligne, fondre, découper, plier, assembler, transporter... imposent, par les lois de la physique, la consommation d'une certaine quantité d'énergie. L'état de la technologie, décrit par vecteur de paramètres technologiques A, conditionne l'efficacité avec laquelle les FH agissent sur les facteurs transformés.

¹² Dans la figure 1 et le texte, le mot secteur est identifié à activité, et non à un secteur industriel précis. Une entreprise donnée peut combiner plusieurs activités. Pour simplifier le modèle, on a regroupé en un seul secteur l'exploration et l'exploitation de ressources naturelles d'une part, le recyclage et le traitement des pollutions d'autre part.

Comme le principe de conservation de la masse s'applique pour chaque secteur, toutes les activités produisent des déchets. Ceux-ci ont deux destinations possibles :

- une partie est envoyée au secteur r pour recyclage (ex : métaux) ou traitement avant rejet dans l'environnement (ex : eaux usées).
- le reste contribue au stock de polluants P .

Le principe de conservation de la masse s'applique aussi à l'ensemble de l'économie. Au vu de la figure 1, on a :

$$E = \mu(\Delta K) + Z_p + Z_t$$

Où ΔK est la variation de K et $\mu(\cdot)$ désigne la masse de son argument. Le flux entrant de matière E se répartit en une augmentation de la matière incorporée dans le stock de capital ($\mu(\Delta K)$) et une sortie de matière ($Z_p + Z_t$). Selon Krausmann et al. (2018), ces quantités avaient en 2015 les valeurs suivantes : $E = 89$ Gt, $\mu(\Delta K) = 31$ Gt, $Z_p + Z_t = 58$ Gt (Gt : gigatonne). Un tiers de la matière entrante s'accumule donc dans l'économie (essentiellement dans les bâtiments et infrastructures¹³).

Afin d'alléger la figure 1 :

- le capital K et l'état de la technologie A sont regroupés en un seul stock. Cela permet aussi de mettre en lumière le fait que la technologie est incorporée dans le capital. Mais il s'agit bien de deux quantités différentes (cf. infra).
- la consommation intermédiaire non énergétique (produite par le secteur y) des différents secteurs, ainsi que certains flux de matières (ex : oxygène de l'air utilisé pour la combustion) et services fournis gratuitement par l'environnement (ex : pollinisation) ne sont pas représentés.
- les impacts négatifs du stock de pollution P affectent l'économie en général, sans autre précision.

Les secteurs d'activité

Secteur e (exploration et exploitation)

Ce secteur a deux fonctions :

- Il explore l'environnement de façon à trouver de nouvelles ressources naturelles. Ce faisant, il produit le flux de reconstitution D du stock de réserves exploitables S .
- Il exploite le stock S et fournit le flux X de matières premières (ex : pétrole brut, minerais, électricité d'origine solaire, eau, blé...) au secteur y .

Le stock de réserves S :

- Il a de multiples composantes renouvelables ou non. Différentes grandes

¹³ Au niveau de la ressource « terre », la reconstitution du stock vient de la transformation de territoires sauvages en territoires exploitables.

composantes peuvent être distinguées : les ressources alimentaires, la terre, les sols, l'eau, les forêts, la flore et la faune sauvage, les ressources énergétiques, les matières (dont les métaux).

- S est renouvelé par deux flux : (i) le flux de découvertes D résultant de l'activité humaine¹⁴ et (ii) le flux naturel F fourni gratuitement par la Nature (ex : biomasse produite par la photosynthèse).

- La « qualité » de S est un paramètre complexe qui dépend, selon la ressource considérée, de facteurs variés (ex : accessibilité, concentration, fertilité...). Elle varie avec le temps en fonction des découvertes et/ou exploitations successives.

Les flux :

- h_d et h_x désignent les quantités de FH (cf. point 3.2.4) attribuées aux deux fonctions exploration et exploitation (tel que $h_e = h_d + h_x$). a_e est l'indicateur d'efficacité des FH relatif au secteur e.

- Le flux de ressources extrait de l'environnement E se répartit en une fraction utile X livrée au secteur y (ex : pétrole brut destiné à être raffiné) et une fraction perdue Z_e sous forme de déchets ou pollutions (ex : stériles). La loi de conservation de la masse implique que $E = X + Z_e$. Z_e dépend des propriétés de la ressource considérée, par exemple de la concentration du gisement. Dans ce cas, ce flux est d'autant plus important que la concentration est faible.

Secteur y (transformation)

Ce secteur transforme (i) les matières et énergies primaires (minerais, pétrole brut, électricité d'origine solaire, eau, blé...) achetées au secteur e et (ii) les matières recyclées par le secteur r, pour en faire des B&S à usages final et intermédiaire.

Les flux :

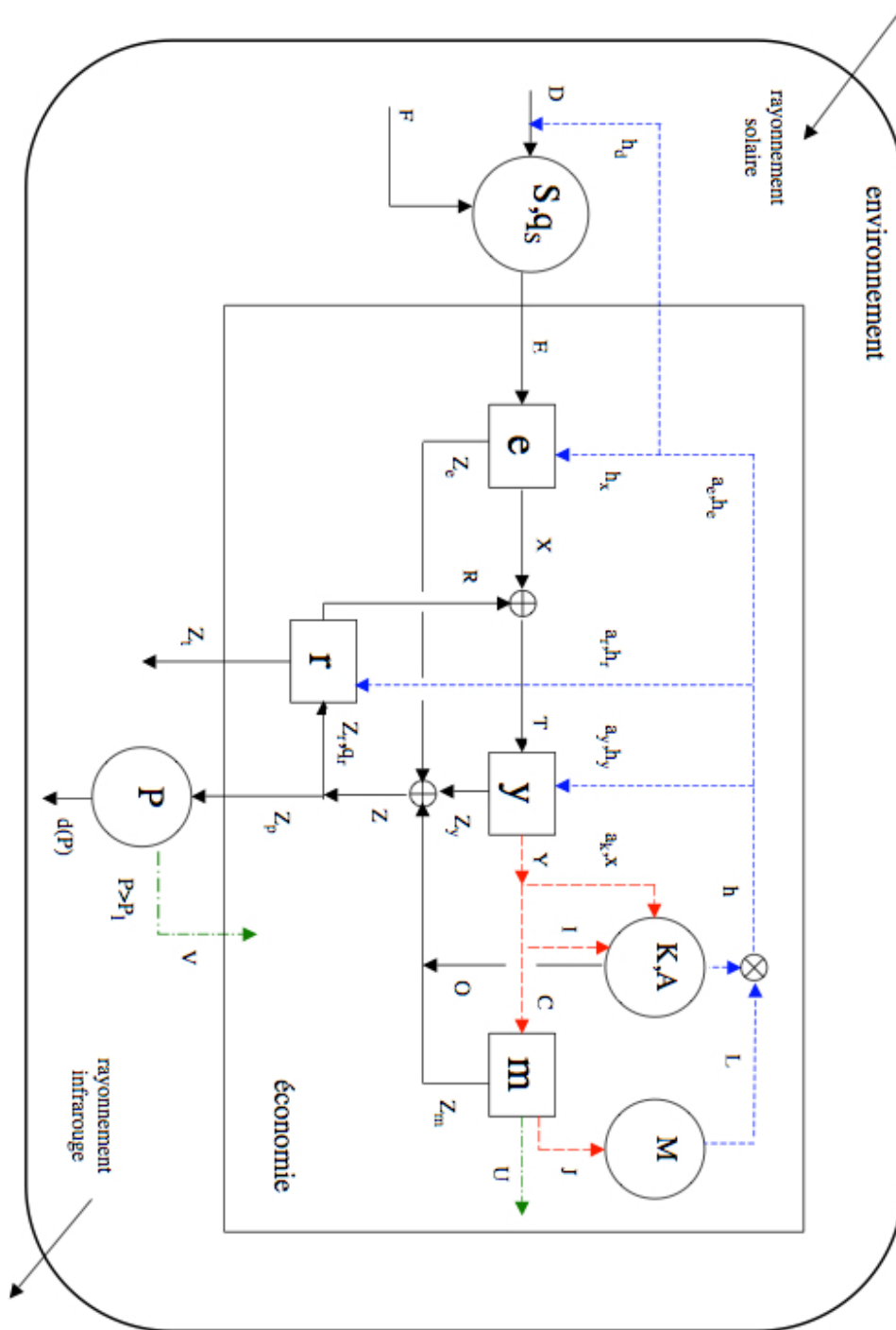
- Y est la production de B&S, h_y la quantité de FH utilisés par le secteur et a_y l'indicateur de leur efficacité.

- T est la quantité totale de ressource consommée, vierge et recyclée. T se répartit en deux flux, $\mu(Y)$ et Z_y qui désignent respectivement le contenu en ressource incorporé dans Y et la quantité de déchets générés. La loi de conservation de la masse impose que $T = X + R = \mu(Y) + Z_y$.

- La production Y se répartit en consommation intermédiaire, investissement I et consommation domestique C ($Y = C + I + x$). Dans la Figure 1, seule la consommation intermédiaire énergétique x est représentée.

¹⁴ Au niveau de la ressource « terre », la reconstitution du stock vient de la transformation de territoires sauvages en territoires exploitables.

Figure 1 : Le modèle



Légende :

- flux de matière/énergie
- - - - - flux de BS
- - - - - « services » des FH ou contribution aux « services »
- - - - - (dés)utilité
- ⊕ opérateur d'addition
- ⊗ opérateur de combinaison

Liste des indices, variables et paramètres du modèle

- Indices

e : secteur d'exploration/exploitation
y : secteur de transformation
r : secteur de recyclage/traitement de la pollution
m : secteur domestique
k : capital

- Variables

D : flux de découvertes
S : stock de ressources naturelles exploitables (réserves)
F : flux de renouvellement naturel du stock S
E : flux d'exploitation du stock S
X : flux de ressources vierges livrées au secteur y
R : flux de ressources recyclées livrées au secteur y
T : flux total de ressources livrées au secteur y
Y : production de B&S
 $\mu(Y)$: contenu en ressource *incorporé* dans Y
x : consommation intermédiaire énergétique
C : consommation de B&S par le secteur domestique
U : utilité générée par l'activité domestique
I : investissement de l'industrie (en nouveaux équipements)
J : contribution nette à la reproduction de la population et à sa formation
L : travail fourni par la population
K : stock de capital
A : « stock de connaissance »
O : flux de déchets/pollutions générés par le stock K
 $d(K,V)$: taux d'« obsolescence » du stock K
 Z_i : flux de déchets/pollutions du secteur i (i=e,y,r,m)
Z : flux total de déchets/pollutions
 Z_r : flux de déchets/pollutions recyclés ou traités
 Z_p : flux de déchets/pollutions non recyclés ou traités
 Z_t : flux de déchets/pollutions traités mais non recyclés
P : stock de déchets/pollutions
V : désutilité générée par le stock P
 $d(P)$: dégradation naturelle des déchets/pollutions
h : flux total de services rendus par les FH
 h_i : part de h allant au secteur i (i=e,y,r,m)
 h_x, h_d : parts de h_e allant respectivement à l'exploration et à l'exploitation

- Paramètres

a_i : indicateur d'efficacité des FH dans le secteur i (i=e,y,r)
 a_k : indicateur d'efficacité énergétique relatif au stock K
 $a_{ir}(t)$: borne supérieure de a_i au temps t
 a_{ia} : borne supérieure absolue de a_i
 q_s : indicateur de qualité des ressources naturelles
 q_r : indicateur de recyclabilité des déchets
 P_1 : seuil à partir duquel les pollutions entraînent des dommages

Secteur r (recyclage et traitement des pollutions)

Ce secteur a deux fonctions : (i) il recycle une partie des déchets matériels et (ii) neutralise une partie des pollutions provenant des autres secteurs. Les déchets récupérés deviennent des matières secondaires (ex : mitraille) exploitables par le secteur y. La part des déchets et pollutions non traitée alimente le stock de pollution P.

Les flux :

- La quantité totale de déchets Z provient des différents secteurs et de l'obsolescence du stock de capital O ($Z=Z_e+Z_y+Z_m+O$). Z_r est la part de Z qui peut être recyclée ou traitée. Le reste Z_p contribue au stock de pollution P.

- R est la production de matières secondaires (recyclées). h_r désigne la quantité de FH utilisés par le secteur et a_r est l'indicateur de leur efficacité. Z_t désigne les déchets et pollutions traités mais non recyclés. Ceux-ci retournent sans danger à l'environnement (ex : eaux épurées).

Le stock de capital et l'état de la technique

Couplé avec le travail, le stock de capital K fournit un flux extrêmement varié de « services » h, permettant de réaliser les différentes activités. Le capital a une composante informationnelle (les logiciels).

L'état de la technique est décrit par le vecteur de paramètres $A = (a_i ; i=e,y,r,x)$. A évolue en fonction du PT et du remplacement progressif des anciens équipements par de nouveaux équipements correspondant aux limites technologiques. Il importe de souligner que A ne se confond pas avec celles-ci car le renouvellement du capital prend du temps.

Les flux :

- Pour fonctionner, le stock K consomme la quantité d'énergie finale x (ex : électricité), provenant du secteur y. a_k est l'indicateur d'efficacité énergétique du stock K.

- Combiné avec le travail fourni par la population (L), le capital fournit le flux de « services » h, qui se répartit entre les secteurs e, y, r.

- K et A sont renouvelés par le flux d'investissements I.

- Le flux $O = d(K,V)K$ mesure la dépréciation du stock de capital et contribue au flux total de déchets Z. $d(K,V)$ désigne le *taux* d'« obsolescence » du stock K. La dépendance par rapport à K renvoie au déclassement des biens d'équipement. L'obsolescence est physique (ex : machine hors d'usage) et surtout économique (ex : ordinateur fonctionnant encore mais technologiquement dépassé à cause du PT). La dépendance du taux d'obsolescence par rapport à V renvoie à la perte de capital due aux impacts de la pollution (ex : destruction d'infrastructures due au réchauffement climatique).

Le secteur domestique (les ménages)

Les ménages consomment la quantité de B&S C (qui comprend l'essentiel des services non marchands) en provenance du secteur y. Cette consommation fournit de l'utilité aux ménages, participe à la reproduction du stock population P, et génère des déchets et pollutions.

Les flux :

- la consommation C, le plus souvent après transformation dans le cas de biens (ex : cuisson d'aliments), génère le flux d'utilité U pour les ménages et contribue à la reproduction de la population et à sa formation (via le flux J).
- M désigne la population humaine et L la quantité de travail qu'elle fournit. Combiné avec le stock de capital K et l'état de la technologie A, L génère les « services » rendus par les FH aux différents secteurs d'activité.
- $Z_m = \mu(C)$ désigne la quantité de déchets générés par le secteur domestique, où $\mu(C)$ est le contenu en ressource *direct* de C. Z_m résulte notamment de l'usure des biens détenus par les ménages, qui peut être aggravée par d'autres facteurs comme la publicité, la mode ou la non-réparabilité délibérée de ces biens.

Le stock de pollution

La partie non traitée des déchets Z_p contribue au stock de pollution P. Ce stock (qui doit être compris dans un sens très diversifié) a en retour des impacts négatifs sur l'économie et l'environnement.

Les flux :

- $d(P)$ désigne la fonction de dégradation naturelle du polluant. Cette fonction varie grandement selon le polluant, entre l'infini pour les pollutions qui ne s'accumulent pas (ex : bruit, odeurs) et (quasi) zéro pour certains déchets radioactifs (ex : plutonium) ou matières synthétiques « ignorées » par la Nature et donc non biodégradables (ex : polluants organiques persistants). Une fois devenus des déchets, certains produits sont d'autant plus problématiques qu'ils ont été conçus pour résister à la dégradation naturelle (ex : feutres géotextiles imputrescibles utilisés dans le bâtiment, revêtements anti-corrosion).
- V mesure l'impact négatif (la désutilité) de P et P_1 est un seuil (éventuellement nul) en dessous duquel $V=0$. V peut être réinterprété comme l'ensemble des externalités environnementales. Elles sont partout dans l'économie¹⁵ car (i) étant consommatrice

¹⁵ Comme l'exprime bien Martinez-Alier, « L'économie monétaire est un petit bateau qui tangue dans un océan d'externalités incertaines et futures » (cité par Petit et al., « Economie écologique. Une perspective européenne », de Boeck, 2022, p.281). En fait, cet océan est aussi constitué d'innombrables externalités présentes et certaines, et évolue avec le temps en fonction de l'activité humaine et des technologies utilisées.

de matières et d'énergie, toute activité est source d'externalités et (ii) dans un contexte de laisser-faire, les entreprises n'ont pas intérêt à les internaliser spontanément. Le faire augmenterait leurs coûts de production, réduirait leur profitabilité et les fragiliserait (et ce d'autant plus dans un cadre concurrentiel).

Les limites dans le modèle

Les limites environnementales

Il s'agit des limites en ressources naturelles et en termes de pollutions, c'est-à-dire des limites I et II selon la typologie de la section 2. Dans la Figure 1, les limites en ressources sont figurées par la surface entourant le rectangle « économie » et par le rayonnement solaire. Cependant, à cause des limites technologiques, les ressources naturelles techniquement exploitables par l'économie se réduisent au stock de réserves S et à une petite fraction du flux solaire.

Les limites en termes de pollutions sont représentées par le seuil P_1 en dessous duquel la désutilité de la pollution V est nulle. Au-delà du seuil P_1 (qui dépend grandement de la toxicité du polluant considéré), P impacte négativement l'environnement mais aussi l'économie, notamment en réduisant la production des secteurs, en affectant les FH (ex : impacts sur la santé) ou les apports de la Nature (ex : destruction de ressources ou de services écosystémiques).

Les limites physiques et technologiques

Les limites physiques et technologiques (c.-à-d. les limites III et IV selon la typologie de la section 2) sont respectivement déterminées par les paramètres a_{ia} et a_{ir} . Ceux-ci vérifient les inégalités suivantes :

$$0 < a_i < a_{ir} < a_{ia}, i = e, y, r, k \quad (1)$$

Dans ces inégalités,

- les paramètres renvoient soit à l'efficacité des FH au sein du secteur i (si $i = e, y, r$), soit à l'efficacité énergétique du stock de capital (si $i = k$).
- a_i mesure l'efficacité observée, a_{ir} correspond à celle de la meilleure technologie disponible et a_{ia} définit un plafond indépassable.

La deuxième inégalité indique qu'en pratique, l'efficacité observée a_i est inférieure à la limite technologique a_{ir} , par exemple parce que d'anciens équipements sont toujours en activité. L'efficacité technologique augmente donc avec le temps via le remplacement d'anciens équipements par des équipements correspondant à la frontière, celle-ci se déplaçant elle-même grâce au PT (cf. infra).

Concernant la 3ème inégalité :

- Dans le cas de l'usage du capital ($i=k$), le fait que toute activité requiert une quantité minimale d'énergie implique que $a_{kr} < a_{ka}$, où a_{ka} est fini et fixé par la physique.

- Il en va de même si i désigne un secteur ($i = e,y,r$). Dans l'usage des FH, la limite technologique a_{ir} est nécessairement bornée supérieurement par une limite physique finie a_{ia} . En effet, s'il en était autrement, une quantité infinitésimale de FH h_i finirait, grâce au PT (cf. infra), par être suffisante pour transformer les facteurs transformés en output (par ex. T en Y). Une quantité infinitésimale d'énergie (nécessaire pour alimenter le capital qui avec le travail fournit h_i) serait alors suffisante pour transformer les facteurs transformés en output, ce qui est physiquement impossible en vertu de l'argument précédent.

Les paragraphes suivants reviennent sur les limites physiques et technologiques au niveau des différentes composantes de l'économie.

* Secteur e (exploration et exploitation)

Les limites technologiques concernent à la fois l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles. L'exploration, au fur et à mesure des découvertes, se fait dans des endroits toujours plus reculés ou difficiles d'accès (ex : fonds marins), d'où des rendements décroissants en termes de découvertes (ceteris paribus). Une hausse des FH consacrés à l'exploration (en quantité via h_d et/ou en qualité via a_e) permet de contrecarrer cette décroissance, du moins jusqu'à un certain point. Malgré des efforts d'exploration croissants/ou et des technologies toujours plus perfectionnées (ex : imagerie satellite, forage profond), les nouvelles quantités découvertes finissent par baisser. Au niveau exploitation, la qualité du stock de ressources S (q_s) est une fonction décroissante de l'exploitation cumulée, car en principe les réserves sont exploitées dans l'ordre de leur qualité décroissante. La baisse de q_s implique que le stock de réserves S devient plus coûteux à exploiter (ceteris paribus, le rapport h_x/X augmente). A contrario, une hausse des FH consacrés à l'exploitation (en quantité via h_x et/ou en qualité via a_e) permet une double augmentation de X à travers (i) une hausse du flux extrait de l'environnement E et (ii) un meilleur partage de E en faveur de X au détriment de Z_e . Ce 2ème effet s'affaiblit au fur et à mesure que l'on s'approche des limites technologiques. La hausse de l'efficacité des FH peut provenir de l'usage d'équipements plus efficaces permettant d'augmenter le taux d'exploitation d'une réserve (par exemple les filets dérivants) ou de rendre exploitable une réserve qui ne l'était pas auparavant (par exemple la fracturation hydraulique).

* Secteur y (production de B&S)

Le rapport $m_y = T/Y$ définit le besoin *total* en ressource d'une unité de B&S¹⁶.

¹⁶ Besoin total en ressource (m_y) et contenu en ressource incorporé d'une unité de B&S ($\mu(Y)/Y$) sont reliés par la relation suivante : $m_y = \mu(Y)/Y + Z_y/Y$, où le dernier terme désigne la part non incorporée (perdue).

Au temps t , m_y vérifie l'inégalité suivante :

$$0 < m_{ya} < m_{yr}(t) < m_y(t) \quad (2)$$

où $m_{yr}(t)$ correspond au besoin total minimum permis par la meilleure technologie au temps t , lui-même supérieur au besoin minimum absolu m_{ya} (déterminé par la physique et qui ne dépend pas de t).

Il existe des limites absolues induites par les caractéristiques du produit, qui impliquent que $m_{ya} > 0$:

- Ainsi, un pain d'un kg exige des ingrédients pesant au minimum un kg.
- Dans toute réaction chimique, il existe des proportions précises entre réactifs et produits de la réaction. Par exemple, la fabrication de la chaux (un prérequis du ciment) à partir du carbonate de calcium obéit dans des conditions idéales à l'équation suivante : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Celle-ci montre qu'il est impossible de produire une molécule de chaux sans consommer une molécule de carbonate de calcium et sans produire en même temps une molécule de CO_2 (le principal gaz à effet de serre).

Remarquons en passant que T étant borné (dans un monde fini), une croissance indéfinie de Y supposerait que m_y et donc aussi m_{ya} puissent diminuer indéfiniment vers zéro, ce qui est impossible en vertu de l'argument du paragraphe précédent.

A cause de toute une série d'imperfections (liées à des comportements sous-optimaux ou au temps de renouvellement des équipements par exemple), $m_y(t)$ est supérieur à $m_{yr}(t)$. Une hausse des FH (en quantité via h_y et/ou en qualité via a_y) permet d'augmenter la production Y à T donné, ce qui entraîne une baisse de m_y (autrement dit une forme de « dématérialisation » de la production) et de Z_y . Cet effet s'affaiblit au fur et à mesure que m_y se rapproche de m_{yr} .

* Secteur r (recyclage et traitement des pollutions)

Le recyclage et le traitement des pollutions permettent d'atténuer les limites en termes de pollution jusqu'à un certain point. Le potentiel de ces activités dépend de l'indicateur de recyclabilité des déchets q_r et de la technologie disponible. Notons que q_r est une donnée pour le secteur r , car la recyclabilité des déchets dépend des activités en amont. Une baisse de q_r implique un renchérissement du recyclage (ceteris paribus, le rapport h_r/R augmente). A contrario, une hausse des FH (en quantité via h_r et/ou en qualité via a_r) permet un meilleur partage de Z_r en faveur de R au détriment de Z_t . Par leur nature, certains flux polluants (repris dans Z_p) échappent au secteur r , notamment les rejets dispersifs de matières (ex : usure des pneus, titane dans le dentifrice, émission de méthane par les herbivores). De même, l'énergie consommée est dissipée et n'est pas recyclable.

* Consommation énergétique du capital

Il existe des limites absolues au niveau énergétique, qui imposent que a_{ka} soit borné supérieurement. Par exemple :

- Les moteurs thermiques (voitures, centrales thermiques) sont devenus beaucoup plus performants avec le temps, surtout au cours du XX^{ème} siècle, grâce à de nombreuses recherches menées dans ce domaine. Cependant, malgré des budgets de recherche croissants, les gains sont devenus de plus en plus faibles et finalement marginaux au XXI^{ème} siècle car la technologie s'approche de la limite physique (imposée ici par le second principe de la thermodynamique).
- Les éoliennes sont soumises à une limite physique de conversion imposée par le théorème de Betz, limite quasiment atteinte par les machines actuelles.
- La quantité d'énergie nécessaire pour une opération de calcul par un microprocesseur est bornée inférieurement par la limite de Landauer¹⁷.

A cause de toute une série d'imperfections, a_k est inférieur à a_{kr} (lui-même nécessairement inférieur à a_{ka}). Par exemple, il existe certains domaines pour lesquels des technologies ou procédés plus économes en énergie existent mais n'ont pas encore été mis en œuvre à large échelle, car le renouvellement des installations est lent suite à de longues périodes d'amortissement¹⁸. Selon Cullen et Allwood (2010), il existerait au niveau mondial un gros potentiel d'économie au niveau des dispositifs de conversion d'énergie, puisque ceux-ci n'auraient qu'une efficacité moyenne de 11 %¹⁹. Ces gisements d'économie d'énergie pourraient permettre un certain découplage temporaire entre K et x dans le futur.

* Secteur domestique (les ménages)

En pratique, il existe un grand potentiel d'amélioration du processus de transformation de la consommation C en utilité U ²⁰. Un bon exemple est le chauffage domestique, une consommation énergétique importante pour les ménages. Celle-ci pourrait être fortement réduite sans affecter le confort des habitants mais cela demanderait un renouvellement ou une rénovation profonde de l'habitat existant.

La présence de ce grand potentiel provient du fait que, contrairement aux secteurs marchands, le secteur domestique n'est pas soumis au jeu de la concurrence. Il n'y a pas de sanction du marché car un ménage consomme sa propre production. Cette absence de sanction explique aussi une autre inefficacité notable du secteur des ménages (surtout dans les pays riches), à savoir le faible taux d'utilisation des biens d'équipement domestiques comparé à celui observé dans l'économie marchande.

¹⁷ <https://www.cristal.univ-lille.fr/profil/jdelahay/pls:2017:280.pdf>

¹⁸ Bihouix (2019, p.97) utilise l'expression « effet de parc installé » pour désigner l'inertie du système technique existant à se transformer en fonction du PT.

¹⁹ Remarque : le potentiel calculé par ces auteurs est obtenu sur base de l'hypothèse (forte) d'une efficacité cible (target efficiency) égale à 1 (Cullen et Allwood, 2010, p.2066).

²⁰ Représenté comme un processus de transformation de B&S en d'autres B&S à l'image du secteur y , le secteur domestique est également soumis aux formules (1) et (2). Une telle représentation a été appliquée dans une version précédente de ce papier. Voir <https://hal.science/hal-03913177>

Progrès technique, substitution, recyclage

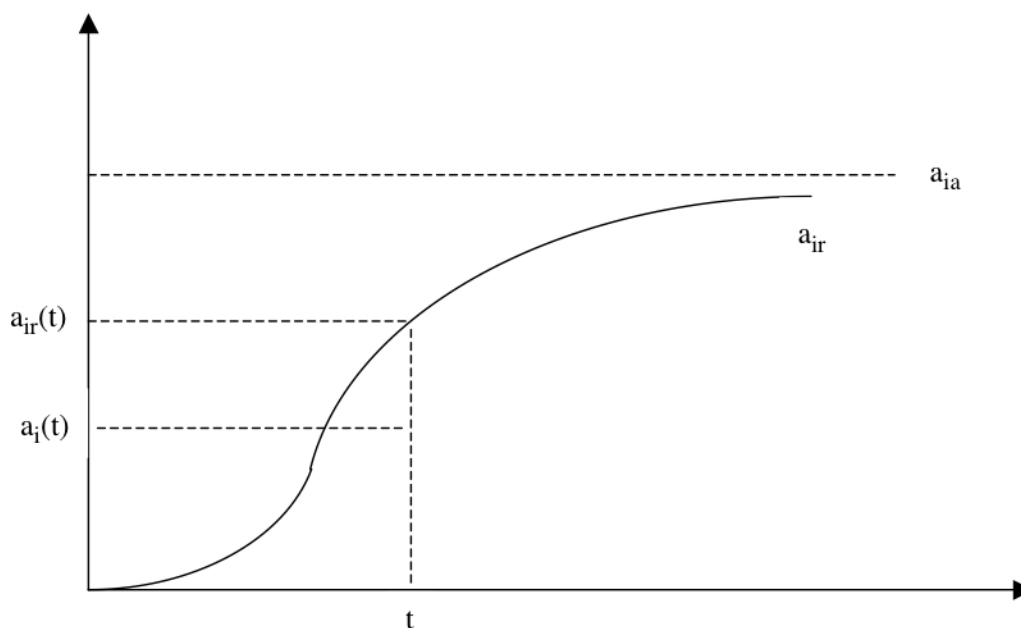
Dans cette section, on aborde les trois instruments de découplage que sont le progrès technique, la substitution entre facteurs et le recyclage, tout en les confrontant avec les limites.

Le progrès technique

Représentation

Dans le cadre du modèle, le PT se traduit avec le temps par une augmentation des paramètres a_{ir} ($i=e,y,r,x$). Généralement, l'efficacité théorique de nombreuses technologies majeures évolue en forme de sigmoïde, dont la limite asymptotique est a_{ia} (Figure 2). L'allure de la sigmoïde indique que les progrès nouveaux deviennent de plus en plus faibles et difficiles à obtenir car la technique s'approche de limites physiques infranchissables. On remarque que la figure reproduit bien les inégalités de la formule (1) (cf. point 3.3.2).

Figure 2 : Evolution des paramètres technologiques ($i = e,y,r,k$)



Comme le PT est le résultat des activités de recherche et développement (incorporées au secteur y dans le cadre du modèle), la Figure 2 suggère que celles-ci ont des rendements décroissants, ce que confirment notamment Strumsky et al. (2010). Il importe de remarquer que le PT dont il est question dans cette section concerne l'exploitation et la transformation des ressources naturelles, ainsi que le traitement des pollutions. Il ne concerne pas les innovations visant les seuls FH, en particulier celles innombrables visant à améliorer la productivité du travail. Le remplacement du travail par le capital semble sans limite, comme en témoigne la robotisation ou l'intelligence

artificielle. Mais même un processus entièrement automatisé est soumis aux limites illustrées par la Figure 2 dès lors qu'il est question des facteurs transformés. En outre, le PT qui ne concerne que le mix travail-capital n'est pas sans impact négatif sur l'environnement, puisqu'il nourrit la croissance à travers le processus de destruction créatrice (comme expliqué à la section 2).

PT avec couplage

Remarquons que certaines formes de PT n'impliquent pas de découplage et augmentent au contraire la pression sur l'environnement. C'est particulièrement vrai au niveau du secteur e :

- Au niveau exploration, une hausse de a_{er} permet de reculer les frontières de l'environnement exploré, au détriment de l'environnement non exploré.
- Au niveau exploitation, une hausse de a_{er} augmente le potentiel d'extraction du stock de réserves S. En outre, dès lors que l'on se rapproche de conditions d'extraction idéales (a_{er} proche de a_{ea}), toute hausse de E s'accompagne d'une hausse du flux de déchets/pollutions Z_e engendrés par le secteur e.

Meadows et al. (2012, ch.6) donnent l'exemple éclairant des pêcheries pour illustrer comment le PT peut avoir des effets délétères sur l'état des ressources (notamment via le développement de la réfrigération à bord ou de nouveaux systèmes de localisation des stocks par sonar ou par satellite). Cependant, le modèle montre que le PT peut théoriquement favoriser via plusieurs voies le découplage entre (i) la production de B&S Y et (ii) le flux d'extraction E et/ou la pollution Z_p .

PT avec découplage entre Y et E

Ceteris paribus et moyennant son incorporation dans le capital installé, le PT implique au niveau du

- secteur e, une hausse de a_{er} qui augmente la fraction utile de l'extraction X/E au détriment de la fraction inutile Z_e/E ;
- secteur r, une hausse de a_{rr} qui augmente la fraction recyclée R/Z_r au détriment de la fraction perdue Z_t/Z_r ;
- secteur y, une hausse de a_{yr} qui permet une dématérialisation de la production en diminuant le besoin total en ressource m_y d'une unité de B&S, et réduit donc l'apport de ressource T à production Y donnée.
- stock K, une hausse de l'efficacité énergétique a_{kr} qui diminue la consommation énergétique par unité de capital.

Ces formes de PT permettent de réduire E à production Y constante. Cependant, le modèle montre également que ces potentialités de découplage absolu sont limitées :

- les fractions utiles de l'extraction et du recyclage sont bornées supérieurement par 1,

et le plus souvent par des valeurs (très) inférieures à 1 (comme dans le cas des minerais métalliques) ;

- m_{yr} est borné inférieurement par m_{ya} , en vertu de (2) ;

- a_{kr} est borné supérieurement par a_{ka} , en vertu de (1).

Par ailleurs, si on prend en compte les effets *indirects* (à travers une analyse d'équilibre général intégrant tous les effets en cascade au sein de l'économie), un choc de PT est malgré tout susceptible d'être accompagné d'une hausse de E. En effet, la baisse initiale de E due au choc est contrebalancée par différents effets *rebonds* (bien documentés par Parrique et al., 2019) impliquant une hausse de Y, avec en conséquence une hausse induite de E neutralisant tout ou partie de la baisse initiale. Parmi ces effets rebonds, il y a notamment le fait (relevé à la section 2) qu'un choc de PT améliore la rentabilité des entreprises et incite donc à une hausse de la production. En outre, aux effets rebonds, il faut ajouter l'*effet induit par la destruction créatrice* qui oblige les acteurs affectés par innovation à réagir (cf. section 2). Enfin, le PT est également susceptible d'induire une hausse de E dans le futur. En effet, la hausse de Y induite indirectement par le choc entraîne (à comportement d'épargne inchangé) l'augmentation de l'investissement I et donc la croissance de K. Celle-ci permet alors une nouvelle hausse de Y, se traduisant par une hausse de X, et donc de E (*ceteris paribus*). Il s'agit là d'un *effet rebond dynamique*.

PT avec découplage entre Y et Z_p

Une augmentation de la qualité des déchets (q_r) augmente la part recyclable Z_r au détriment de la part non recyclable Z_p (par ex. à travers un meilleur tri des déchets ou à travers une meilleure conception des biens en termes de recyclabilité). Mais là encore il y a une limite liée au fait qu'une fraction de Z n'est pas recyclable (même dans des conditions idéales). Et d'une façon générale, le PT ne s'accompagne pas nécessairement d'une meilleure qualité des déchets, comme en témoignent les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Le PT peut également consister à augmenter la dégradabilité naturelle des déchets, à l'exemple de certains plastiques (d'où une baisse de Z_p et une hausse de Z_t). Il importe cependant de considérer l'expression « plastique biodégradable » avec précaution²¹.

Substitution

Etant donné son caractère agrégé, le modèle ne permet pas de représenter explicitement les substitutions *au sein* d'une même catégorie de facteurs (c-à-d entre FH ou entre ressources naturelles). Mais certains enseignements peuvent quand même être formulés.

²¹ <http://www.chem4us.be/environnement/biodegradation/>

Concernant les FH, (i) la recombinaison continue du mix travail et capital et (ii) le PT affectant ces deux facteurs se traduisent par l'augmentation des FH tant en quantité qu'en qualité, autrement dit par une hausse simultanée de h et des différents paramètres d'efficacité a_i ($i = e, y, r, k$). Les effets de ces hausses ont été étudiés ci-dessus. La substitution entre ressources naturelles est plus délicate à interpréter, vu qu'elles sont agrégées dans le cadre du modèle. Elle est cependant importante car, pour lutter contre la raréfaction d'une ressource ou traiter certains déchets et pollutions, une alternative est de changer les processus de production des différentes activités. Mais la substitution de certaines ressources est parfois difficile, sinon coûteuse et on déplace le plus souvent les problèmes. Un bon exemple est fourni par le développement des énergies éolienne et solaire dans le cadre de la transition énergétique. Si elles permettent de diminuer drastiquement les émissions de CO_2 , elles ont plusieurs inconvénients non négligeables :

- de par leur caractère diffus (non concentré), elles (i) occupent de grandes surfaces, d'où des conflits d'usage de la terre avec d'autres activités et (ii) sont très capitalistiques, d'où la consommation de grandes quantités de matériaux (en particulier de métaux) provenant de ressources non renouvelables ;
- ces deux problèmes sont exacerbés par leur caractère intermittent, qui oblige à installer des capacités de production excédentaires et de stockage ;
- leur taux de rendement énergétique, déjà sensiblement inférieur à celui des énergies fossiles « historiques », décline avec leur extension sur des territoires de moins en moins favorables (Dupont, 2021)²² ;
- elles ne sont pas exemptes d'externalités négatives (ex : atteintes aux paysages).

Le recyclage

Cette activité, un des fondements de l'économie circulaire, n'est pas indépendante du PT ou de la substitution entre facteurs, comme on l'a vu ci-dessus. Si le recyclage peut contribuer au découplage entre Y et E et/ou Z_p , il a aussi ses limites :

- Rappelons qu'il ne concerne pas l'énergie ni les usages dissipatifs des matières. En conséquence, au niveau agrégé, on aura toujours $Z_r < Z$ et $Z_p > 0$.
- Malgré le PT qui permet un meilleur partage de Z_r en faveur de R au détriment de Z_t , les coûts finissent par augmenter avec le taux de recyclage ou de dépollution. Un recyclage à 100 % est physiquement impossible ou devient économiquement prohibitif²³. En outre, dans certains cas (papier, plastique), le recyclage implique une

²² Cette baisse du rendement avec l'extension territoriale des énergies éolienne et solaire est désignée par l'expression « effet localisation » par Dupont et al (2017).

²³ Dans le cas du fer par exemple, il a été démontré qu'un recyclage intégral exigerait une énergie infinie (B. Hannon repris par S. Schilizzi (1987), « L'Énergie dans les systèmes de production : réexamen théorique et étude de deux cas fortement contrastés : les systèmes rizicoles camarguais et rubifluviens », thèse de doctorat, EHESS, Paris).

dégradation inévitable des matières, d'où des usages de moins en moins nobles et un nombre fini de cycles (Parrique et al, 2019, p.46).

- Pour certaines matières, le recyclage est rendu plus compliqué par la tendance à la miniaturisation et à la multiplication des alliages (en particulier dans l'industrie numérique). En revanche, certaines entreprises (notamment automobiles) travaillent depuis longtemps à augmenter la recyclabilité des biens qu'elles produisent²⁴.

- Selon Grosse (2010), le recyclage n'a un effet notable sur la préservation d'une ressource non renouvelable que si le taux de croissance de sa consommation est inférieur à 1 %. Si le taux de croissance de l'économie devait être supérieur à 1 %, il faudrait donc que le recyclage soit accompagné d'une dématérialisation de la production pour obtenir un découplage absolu.

Cette dématérialisation appelle deux remarques :

- un changement structurel vers une économie de services n'implique pas une véritable dématérialisation, car elle « ne peut être qu'au-dessus d'une économie matérielle et non à sa place » (Parrique et al, 2019, p.45 (notre traduction)). Si les services ont un contenu matériel direct nul, leur contenu matériel indirect (via les équipements et consommations intermédiaires nécessaires à leur production) est loin d'être nul. Et ce contenu matériel indirect est lui soumis aux limites physiques et technologiques. En témoigne le fait que la tertiarisation des économies occidentales ne s'est pas accompagnée par un découplage massif entre PIB et consommation matérielle.

- l'économie de la fonctionnalité est souvent avancée comme un moyen de découplage majeur. En remplaçant la vente d'un bien par la vente de son usage, elle permet de réduire la quantité de biens nécessaires pour obtenir une utilité donnée. Cependant, si l'on tient compte des effets rebonds et du fait que les agents économiques éliminés par le passage à l'économie de la fonctionnalité doivent se reconvertir (via l'effet induit de la destruction créatrice expliqué à la section 2), il n'est pas garanti qu'elle implique seule plus de durabilité²⁵.

Conclusion de la section

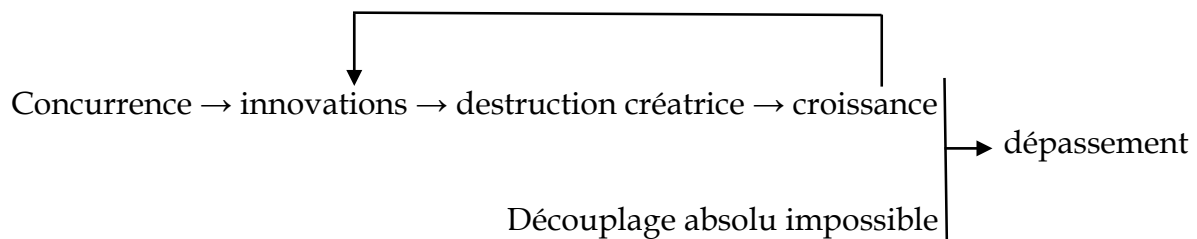
Vu de ce qui précède, il apparaît que le PT, la substitution et le recyclage ne garantissent pas un découplage absolu dans le cadre d'une économie de laisser-faire (sauf cas isolé dans le temps et l'espace). On retrouve là les conclusions de Parrique et al. (2019). En lien avec la section 2, on peut conclure qu'en reculant les limites

²⁴ Dans le cas de l'automobile, le passage à la voiture électrique pourrait cependant impliquer une baisse du taux de recyclage car un véhicule électrique contient beaucoup plus d'électronique que son équivalent thermique. Pour des limites générales à l'éco-conception, voir Bihoux (2019, p.151).

²⁵ Remarquons au passage qu'il peut y avoir opposition entre recyclage et fonctionnalité dans la mesure où cette dernière, en augmentant la durée de vie des biens et en diminuant leur flux, réduit les gisements de matières recyclables (Grosse, 2010). Sur les limites de l'économie de la fonctionnalité, voir aussi Bihoux (2019, p.153).

technologiques, le progrès technique (résultant du flux continu d'innovations) élargit l'espace des possibilités de production de l'économie. La destruction créatrice qui va de pair avec le PT pousse l'économie à croître et à occuper cet espace supplémentaire, avec en conséquence une hausse de son empreinte écologique, qui la rapproche des limites environnementales I et II. Ce sera encore plus le cas si les limites technologiques IV sont proches des limites physiques III. Donc l'économie se rapproche de ses limites environnementales et finit par dépasser certaines d'entre elles. Dans certaines activités, en particulier celles soumises aux limites I, ce dépassement se traduit par une baisse de profitabilité qui incite à de nouvelles innovations pour contrecarrer cette baisse, ce qui encourage la destruction créatrice, d'où une exacerbation des contradictions entre croissance et dépassement, et ainsi de suite.

Le raisonnement du paragraphe précédent peut être résumé en complétant la chaîne de cause à effet de la section 2 :



Au niveau mondial, le dépassement est globalement bien confirmé, tant par le Global Footprint Network²⁶ sur base de l'empreinte écologique, que par les études sur base des limites planétaires (cf. note 4).

Encadré 2 Limites des technologies de l'information et de la communication et autres « révolutions technologiques »

Le rôle de la microélectronique et de l'informatique dans la production est fondamentalement différent de celui des moteurs et autres machines qui fournissent un travail (au sens physique). Si on prend l'exemple d'une voiture, leur rôle est de transférer l'information permettant de gérer le moteur et de commander des dispositifs tels que les essuie-glaces, les phares, les freins... Les progrès dans ce domaine ont permis d'augmenter le rendement des moteurs et de les approcher des limites physiques. Mais ce n'est ni la microélectronique ni l'ordinateur de bord qui font avancer la voiture, c'est le couple moteur-carburant. Plus généralement, s'ils permettent d'augmenter les rendements des équipements, ils ne modifient pas les plafonds de ces rendements (les limites physiques).

Selon Bonaiuti (2018), dans la mesure où elle porte sur l'information, la 3ème révolution industrielle (associée aux nouvelles technologies de l'information et de la communication) serait d'une nature différente des deux premières, qui portent sur la transformation de l'énergie²⁷. Sur la base d'une analyse de l'évolution de la productivité totale des facteurs (TFP) depuis 1750, l'auteur montre que les deux premières révolutions ont permis une croissance de cet indicateur plus forte et surtout bien plus longue que la 3ème.

²⁶ <https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot>

²⁷ La 1ère révolution industrielle est associée à la vapeur, tandis que la 2ème l'est aux moteurs thermiques et à l'électricité.

Il ne faut donc pas attendre des nouvelles technologies de l'information et de la communication des « miracles », si la ressource limitante est l'énergie.

Le raisonnement des paragraphes précédents s'applique aussi à d'autres « ruptures » telles que l'impression en 3D, les nanomatériaux ou l'intelligence artificielle. Pour un survol éclairant de ces « ruptures » et de leurs limites, le lecteur intéressé consultera utilement les ouvrages de Bihouix (2014, 2019).

De même, rien que pour des raisons de coûts, il est illusoire de penser à l'espace comme possible réservoir de ressources naturelles ou réceptacle de pollutions dans les prochaines décennies²⁸.

Enfin, les nouvelles technologies de l'information et de la communication sont loin d'être immatérielles et leur impact sur l'environnement va croissant. A titre d'exemple, selon le Shift Project, la part du numérique (production et usage) dans les émissions mondiales de GES a augmenté de 2,5% en 2013 à environ 4% en 2020, et pourrait atteindre 7 à 8 % en 2025 dans un scénario de laissez-faire²⁹.

Conséquences économiques du dépassement des limites

Les résultats de la « rencontre » entre l'économie en croissance et les limites environnementales n'évoquent pas ceux d'un véhicule qui heurterait brutalement un obstacle. Deux grands types de trajectoire de l'économie sont possibles (cf. Figure 3).

A : la croissance ralentit progressivement et tend vers zéro. L'économie converge de façon monotone vers un état conforme aux limites, autrement dit en équilibre avec l'environnement.

B : après une phase de croissance, l'économie passe par un pic de production, puis décroît, avant de converger vers un état conforme aux limites. Il y a dépassement (overshoot), au sens où la production dépasse à un moment donné, son niveau de long terme³⁰. La décroissance est *forcée ou subie* et non choisie.

En lien avec la section 2, la Figure 3 illustre la portée différente des limites physiques et technologiques sur la trajectoire de l'économie et donc l'intérêt de les distinguer :

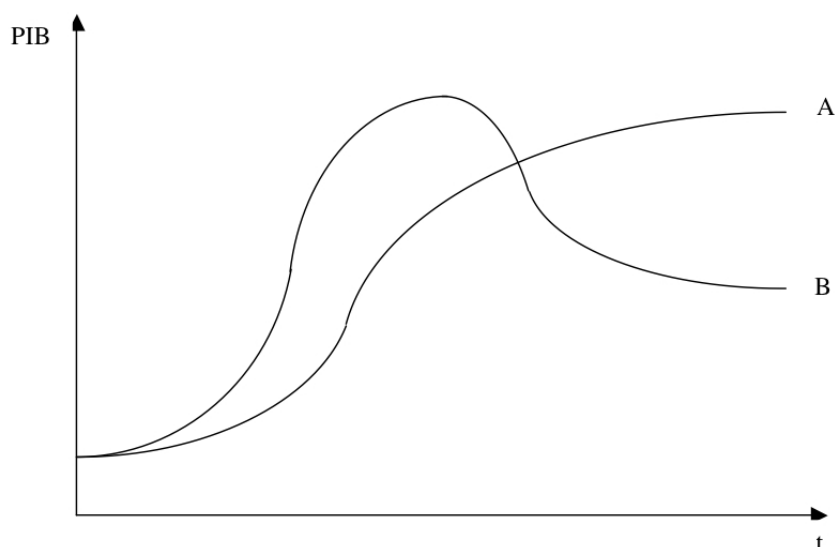
- à très long terme, les limites physiques imposent une valeur asymptotique bornée du PIB ;
- les limites technologiques conditionnent la trajectoire à court et à moyen termes et, éventuellement, amènent l'économie en décroissance pendant un certain intervalle de temps (cas de la trajectoire B).

²⁸ Même si les coûts de lancement ont beaucoup baissé ces dernières années grâce à Space X, ils demeurent très élevés. Acheminer 1kg via cette entreprise coûterait 18000\$, selon la revue Socialter, n°57, p.84, avril-mai 2023.

²⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_environmental_du_num%C3%A9rique#cite_ref-Indiff%C3%A9rence_27-0

³⁰ Remarque : il ne s'agit pas ici de dépassement des limites environnementales (dans le cadre du modèle, du dépassement du seuil Pl), mais de dépassement de l'état d'équilibre.

Figure 3 : Types de trajectoire de l'économie



La phase de décroissance peut être plus ou moins profonde, et dans les cas extrêmes, il y a effondrement, par exemple à cause d'effets de seuil (la trajectoire se rapproche alors de l'axe horizontal). Dans certains cas en revanche, il y a un rebond de l'activité après la phase de décroissance et la convergence vers l'état stationnaire est ascendante (contrairement à la Figure 3).

La vigueur de la croissance induite par la destruction créatrice détermine le type de comportement de l'économie. Si la phase croissante initiale est suffisamment faible (resp. forte), la trajectoire est de type A (resp. B). Il s'ensuit que la vitesse avec laquelle les innovations se déploient depuis le début de la trajectoire est un déterminant essentiel de l'allure de celle-ci. En particulier, l'éventuelle remontée de la production après la période de décroissance dépend du potentiel de progrès technique résiduel (c.-à-d. de l'écart entre limites technologiques et limites physiques après la phase de décroissance).

Le mécanisme fondamental à la base du ralentissement de la croissance (et éventuellement de son retournement) repose sur deux effets :

- *effet d'impact* : la pollution se traduit par des impacts toujours plus négatifs sur les FH, en particulier sur le capital K. Dans le cadre du modèle, ces impacts sont représentés par la dépendance de l'obsolescence $O=d(K,V)K$ à V.

- *effet d'éviction généralisée* : la répartition des FH évolue de façon défavorable pour le secteur y, à cause des besoins croissants des autres secteurs en ces mêmes facteurs. Dans le cadre du modèle, h_y décline à cause de la nécessité de lutter contre (i) la raréfaction des ressources naturelles et la diminution de leur qualité et (ii) l'augmentation des pollutions. Le point (i) oblige à augmenter h_e et h_r afin d'explorer et de recycler plus, tandis que le point (ii) implique d'augmenter h_r pour neutraliser plus de pollution. La multiplication des besoins en FH à travers l'économie au détriment du secteur qui produit ces facteurs justifie le qualificatif *généralisée*.

Moyennant le choix de certaines relations entre variables du modèle, l'encadré 3 illustre formellement comment ces effets affectent le PIB et le taux de croissance de l'économie.

A un niveau global, les simulations en situation de laisser-faire faites avec des modèles qui intègrent les effets précités montrent plutôt des trajectoires de type B avec un pic d'activité suivi d'une période de décroissance³¹. La date de la survenance du pic varie bien sûr selon le modèle et ses hypothèses. Ainsi par exemple, le pic est atteint chez Meadows et al (2012) entre 2020 et 2060 en fonction du scénario étudié. Capellan et al. (2020) « prévoient » une croissance mondiale négative à partir du milieu du siècle. Sur base d'hypothèses plus favorables, Germain (2020) obtient un pic pendant le dernier quart du siècle.

Cette littérature montre également que le PT n'a pas toujours des effets positifs sur la trajectoire de l'économie si celle-ci est de type B. S'il est favorable à la croissance pendant la phase ascendante et conduit l'économie à un pic de production plus élevé (par rapport à son absence), la phase de décroissance qui suit le pic peut n'en être que plus profonde. En présence de limites liées à la pollution, trop de progrès technique peut même amener l'économie à franchir un seuil au-delà duquel les effets de la pollution conduisent à l'effondrement (Germain, 2012).

Encadré 3 : Effets d'éviction et d'impact, PIB et taux de croissance

Rappelons que FH et ressources sont des facteurs complémentaires, vu leurs rôles très différents dans les processus de production. Moyennant certaines hypothèses sur les fonctions de production du modèle et sur les impacts de la pollution, on peut établir les relations suivantes (le détail des calculs est fourni en annexe) :

$$\text{PIB} = [a_y [1 - f_e - f_r] f(L/K) - 1/a_k] K \quad (b1)$$

$$g_K = K'/K = s [a_y [1 - f_e - f_r] f(L/K) - 1/a_k] - [d_K + d_v(V)] \quad (b2)$$

où :

- PIB est le produit intérieur brut de l'économie et $s = I/\text{PIB}$ le taux d'épargne macroéconomique ;
- g_K est le taux de croissance du stock de capital ;
- $f(L/K) = h/K$ est la quantité de services fournis par les FH par unité de capital ;
- $f_i = h_i/h$ désigne la fraction des FH dévolue au secteur i , avec $0 < f_i < 1$ ($i = e, y, r$) et telle que

$$f_y = 1 - f_e - f_r \quad (b3)$$

- $d_K + d_v(V)$ est le taux d'obsolescence du capital, où d_K est un paramètre positif et d_v est une fonction croissante des dommages de la pollution.

Au vu de (b1) et (b2), on voit que PIB et g_K dépendent négativement de f_e et f_r , les fractions de FH attribués aux secteurs e et r .

³¹ Ces modèles reposent sur des méthodologies diverses, les uns appartenant à la théorie des systèmes (à l'exemple de Meadows et al (2012) et Capellan et al. (2020)), d'autres à la théorie économique de la croissance « orthodoxe » (à l'exemple de Germain (2012, 2020)). Ces deux dernières contributions montrent qu'il n'est pas nécessaire de sortir du cadre néoclassique pour générer des trajectoires similaires à celles de la figure 3.

Ces formules permettent d'illustrer le rôle des effets d'impact et d'éviction dans la détermination du PIB et/ou du taux de croissance du capital (celui-ci étant un déterminant essentiel du taux de croissance du PIB avec le PT) :

- l'effet d'impact est fonction de la pollution V à travers le terme $d_V(V)$ dans (b2). Comme $d_V'(V) > 0$, un renforcement de cet effet se traduit par une baisse de g_K .
- l'effet d'éviction généralisée résulte d'une hausse de f_e et/ou f_r au détriment de f_y (en vertu de (b3)), ce qui affecte négativement PIB et g_K .

L'effet d'éviction peut s'exercer via différents canaux : *ceteris paribus*,

- pour lutter contre la raréfaction des ressources naturelles et la baisse de leur qualité, l'économie se doit d'augmenter l'activité d'exploration/extraction, ce qui signifie augmenter f_e .
- dans le même but et à la place d'augmenter f_e , l'économie peut accroître l'activité de recyclage, ce qui implique d'augmenter f_r .
- pour réduire l'effet d'impact $d_V(V)$, l'économie peut accroître l'activité de traitement des pollutions, ce qui se traduit par une hausse de f_r .

Une diminution suffisamment forte de f_y est à la base des résultats de décroissance (subie) obtenus par la littérature intégrant les effets d'impact et/ou d'éviction.

Comme le montrent (b1) et (b2), le PT peut compenser les effets d'impact et d'éviction à travers une hausse des paramètres a_i . Mais le PT est le résultat des efforts de recherche et développement, qui sont caractérisés par des rendements décroissants (cf. Figure 2). Dès lors, à efforts de recherche inchangés, la compensation offerte par le PT tend à s'affaiblir avec le temps (et plus encore si les paramètres a_i sont proches de leurs limites absolues).

Maintenir le même taux de PT (la même croissance des paramètres a_i) serait possible en augmentant les investissements en recherche (compris dans la variable I dans le cadre du modèle). Mais il en découlerait alors un nouvel effet d'éviction, cette fois au détriment de la consommation des ménages, qui demeure le but ultime de l'activité économique à travers l'utilité qu'elle leur procure. Comme le montre (b2), on aurait le même problème si l'on voulait maintenir l'accumulation du capital g_K malgré la baisse de f_y en augmentant le taux d'épargne s .

Conclusion

En réponse au caractère insoutenable de la croissance brune actuelle a été proposé le concept de croissance verte. Ce concept de croissance supposé compatible avec la préservation de l'environnement est notamment défendu par

- des scientifiques et ingénieurs (relayés par des personnalités médiatiques comme Jeremy Rifkin, avocat de la troisième révolution industrielle) qui font miroiter d'incessantes nouvelles ruptures scientifiques ou technologiques ;
- des économistes qui, s'appuyant sur les précédents, pensent qu'il est possible de réconcilier croissance et limites environnementales grâce à des mécanismes d'incitation destinés à corriger les comportements non vertueux (par exemple la taxe carbone pour lutter contre le changement climatique).

Mais l'insoutenable de la croissance brune actuelle fait partie d'une problématique plus large, qui dépasse la préservation de l'environnement. Aggravation des inégalités, multiplication des impacts environnementaux, croissance atone, pandémie, autant de graves dysfonctionnements qui font dire à Aghion et al (2020, p.387) dans leur conclusion que « le capitalisme affronte une crise d'identité comme il n'en a jamais connu auparavant ». Faut-il pour autant sortir du capitalisme ?

Pour les défenseurs de la croissance verte, il n'est pas nécessaire de sortir du système capitaliste, qui doit au contraire être conservé dans la mesure où il engendre spontanément la

croissance à travers le mécanisme de destruction créatrice (comme expliqué à la section 2), une croissance jugée désirable car associée au progrès matériel.

Cependant, pour être pérenne et « sauver » le capitalisme, la croissance verte se doit de répondre aux dysfonctionnements mentionnés ci-dessus. Outre une régulation environnementale qui verdit la croissance en limitant l'exploitation des ressources naturelles et les pollutions à des niveaux soutenables, il faut :

- une régulation économique qui encourage et préserve le mécanisme de destruction créatrice afin de relancer la croissance, en garantissant notamment la concurrence et la protection (temporaire) des inventions ;
- une régulation sociale qui accompagne les perdants de la destruction créatrice et préserve ainsi la cohésion au sein de la société.

Selon les avocats du capitalisme, ces régulations pourraient conduire à une croissance vertueuse, justifiant ainsi le maintien du système.

Au vu des sections précédentes, un tel scénario est impossible à très long terme à cause des limites physiques et environnementales. Mais il ne paraît pas faisable non plus à moyen terme. Etant donné les limites technologiques et l'urgence induite par le fait que nombre de limites environnementales sont déjà dépassées au niveau mondial, ambitionner dans les prochaines décennies une transition de l'actuelle croissance brune vers une croissance verte est pour le moins discutable.

Par le mécanisme de la destruction créatrice, le système capitaliste engendre inévitablement la croissance *tant que les limites environnementales ne s'y opposent pas trop*. Tôt au tard, la croissance finit par être bridée par ces limites, à cause des effets d'impact et d'éviction généralisée mentionnés à la section 5. Si les innovations permettent continuellement de repousser les limites technologiques (avec des rendements décroissants à cause des limites physiques), elles exacerbent au final les contradictions entre croissance et limites environnementales. Loin de seulement constituer la solution, les innovations sont aussi la source des problèmes parce que, *dans le cadre d'une économie capitaliste*, elles sont inscrites au coeur de la destruction créatrice à la base de la croissance.

La littérature fondée sur les modèles intégrant les limites montre que celles-ci sont susceptibles non seulement de ralentir la croissance mais aussi d'amener l'économie en décroissance à moyen terme. En conclusion, pour remplacer la croissance brune, l'alternative n'est pas (comme le suggèrent certains économistes « mainstreams ») entre croissance verte et décroissance, mais entre décroissance subie et décroissance choisie. On retrouve là une conclusion de Bihouix (2014, p.113).

Le paragraphe précédent conduit à la question suivante : au final, vaut-il mieux (i) garder un système économique en multipliant les outils de régulation pour tenter de maintenir et verdir la croissance qu'il porte « dans ses gènes » (outils qui de toute façon n'empêcheront pas celle-ci de s'éteindre à cause des limites), ou plutôt (ii) chercher un système alternatif qui intègre spontanément les limites (notamment via un contrôle alternatif des entreprises) et permette d'organiser une décroissance choisie ?

Vu les grandes inégalités entre individus, que ce soit en termes de revenus (Chancel et Piketty, 2021) ou d'empreinte environnementale (Chancel, 2022), une politique de décroissance choisie

doit être ciblée si elle se veut équitable. Dans ce cas, elle se heurtera à l'opposition d'intérêts socio-économiques puissants, en particulier si par leurs pouvoirs, privilèges et influences, ceux-ci comptent s'abriter des impacts de la décroissance subie et les laisser aux autres groupes sociaux. Ces intérêts peuvent être partisans du statu quo (à l'exemple de ceux qui alimentent le climato-scepticisme) ou au contraire à la pointe de la transition vers un « capitalisme vert », avec l'anticipation de profits juteux (Morena, 2023). Comme mentionné plus haut, le refus d'une politique de décroissance choisie viendra également de ceux qui croient en la faisabilité de la croissance verte.

Actuellement, force est de constater que les discours soutenant la croissance verte sont dominants, comme en témoignent leurs relais dans de grandes institutions internationales. Ils ont l'avantage d'être attrayants car à première vue, la croissance verte (i) n'est pas associée à l'idée de « sacrifice », comme l'est celle de la décroissance choisie, et (ii) paraît naturellement être la voie à suivre dans un monde où subsistent de larges poches de pauvreté.

Cependant, cette position dominante pourrait s'affaiblir si les épisodes de croissance mondiale négative (comme en 2009 et 2020) devaient se multiplier à l'avenir. Et ce d'autant plus qu'une croissance moindre ou pire une décroissance subie pourrait se traduire par une exacerbation des tensions autour du partage du « gâteau », notamment entre travailleurs et détenteurs du capital.

Bibliographie

AGHION P. et al. (2020). *Le pouvoir de la destruction créatrice*, Odile Jacob.

BIHOUIX P. (2014). *L'âge des Low Tech*, Editions du Seuil.

BIHOUIX P. (2019). *Le progrès était pour demain*. Editions du Seuil.

BONAIUTI M. (2018). "Are we entering the age of involuntary degrowth? Promethean technologies and declining returns of innovation", *Journal of Cleaner Production*, 197.

BOUTAUD A., GONTRAN N. (2020). *Les limites planétaires*, Repères Ecologie, Editions La Découverte.

BRUGVIN T. (2010). « Les causes psychosociologiques de l'addiction dans une société capitaliste », *Pensée Plurielle*, n°23.

CAPELLAN-PEREZ I. et al. (2020). « MEDEAS : a new modeling framework integrating global biophysical and socioeconomic constraints », *Energy Environmental Science*, 13, 986.

CASSIERS I. (2018). « La croissance, une addiction ? », *Revue Projet*, n° 362, février.

CHANCEL L., PIKETTY T. (2021). « Global income inequality, 1820-2020 : The persistence and mutation of extreme inequality », *Journal of the European Economic Association*, 19(6).

CHANCEL L. (2022). "Global carbon inequality over 1990-2019", *Nature Sustainability*, 29/9/2022, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00955-z>.

CULLEN J., ALLWOOD J. (2010). "Theoretical efficiency limits for energy conversion devices", *Energy*. Volume 35, Issue 5, May, p. 2059-2069

- DEMAILLY D. (2013). "Croissance verte vs. Décroissance : sortir d'un débat stérile", Policy Brief n° 12/13, IDDRI.
- DUBUISSON-QUELLIER S. (2022). "How does affluent consumption come to consumers", *Consumption and Society*, 1(1).
- DUPONT E. et al. (2017). « Transition énergétique et (dé)croissance économique », *Regards Economiques*, n°235, novembre.
- DUPONT E. (2021). *Potential of wind and solar resources and macroeconomic implications of the energy transition*, thèse de doctorat, Université de Louvain.
- GERMAIN M. (2012). « Equilibres et effondrement dans le cadre d'un cycle naturel », *Cahiers Economiques de Bruxelles – Brussels Economic Review*, 55(4).
- GERMAIN M. (2020). « Limits to growth and structural change », *Structural Change and Economic Dynamics*, 55.
- GROSSE F. (2010). "Le découplage croissance/matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage", *Futuribles* n°365.
- HABERL H. et al (2020). "A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part II: synthesizing the insights", *Environmental Research Letters*, 15.
- HALLOY J. (2018). "L'épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques", *La Revue nouvelle*, n°4.
- HICKEL J., KALLIS G. (2020). "Is green growth possible ?", *New Political Economy*, 25:4.
- KRAUSMANN F. et al (2018). "From resource extraction to outflows of wastes and emissions : the socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015", *Global Environmental Change*, 52.
- MEADOWS D. et al (2012). *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Ed. Rue de l'Echiquier.
- MORENA E. (2023). *Fin du monde et petits fours. Les ultra-riches face à la crise climatique*, Ed. La Découverte.
- PARRIQUE T. et al. (2019). "Decoupling debunked. Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability", *European Environmental Bureau*.
- ROCKSTROM J. et al. (2009). "A safe operating space for humanity", *Nature*, 461, 472–475.
- STEFFEN W. et al. (2015). "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet", *Science*, 347, Issue 6223.
- STRUMSKY D. et al (2010). "Complexity and the productivity of innovation", *Systems Research and Behavioral Science*, 27.
- TILTON J. et al. (2018). "Public policy and future mineral supplies", *Resources Policy*, 57.

Annexe : Dérivation des relations (b1) et (b2)

On postule les relations technologiques suivantes :

$$Y = a_y h_y \quad (a1)$$

$$x = K/a_k \quad (a2)$$

$$h = F(L,K) = f(L/K)K \quad (a3)$$

où a_y , a_k sont des paramètres positifs et bornés qui désignent respectivement la productivité des FH dans le secteur y et l'efficacité énergétique du capital. (a3) décrit la production de « services » par les FH à travers une fonction homogène de degré 1 combinant capital et travail. Dans le cadre du modèle (cf. Figure 2), la production à usage final (le PIB) vaut : $PIB = C + I = Y - x = Y - K/a_k$ (a4)

la dernière égalité découlant de (a2).

$$\text{Soit par définition, } f_i = h_i/h \quad (a5)$$

La fraction des FH dévolue au secteur i , avec $0 < f_i < 1$ ($i = e, y, r$).

$$\text{Alors : } f_y = 1 - f_e - f_r \quad (a6)$$

En vertu de (a1), (a3) et (a6), (a4) devient :

$$\begin{aligned} PIB &= a_y h_y = a_y [1 - f_e - f_r] h - K/a_k \\ &= [a_y [1 - f_e - f_r] f(L/K) - 1/a_k] K \quad (a7) \end{aligned}$$

ce qui est l'équation (b1).

Soit $s = I/PIB$ le taux d'épargne macroéconomique ($0 < s < 1$). On suppose que le taux d'obsolescence du capital est séparable en deux composantes :

$$d(K,V) = d_K + d_V(V) \quad (a8)$$

où $d_K > 0$ et d_V est une fonction croissante et positive.

Si on suppose que les effets négatifs de la pollution se limitent au capital à travers la fonction $d_V(V)$, l'accumulation du capital obéit à l'équation suivante :

$$\Delta K = s PIB - d(K,V) K = s [a_y [1 - f_e - f_r] f(L/K) - 1/a_k] K - [d_K + d_V(V)] K$$

La deuxième égalité découlant de (a7) et (a8). Le taux de croissance du stock de capital s'écrit alors :

$$g_K = \Delta K/K = s [a_y [1 - f_e - f_r] f(L/K) - 1/a_k] - [d_K + d_V(V)] \text{ qui est l'équation (b2).}$$