
ÉNERGIE, EROI ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE DANS UNE PERSPECTIVE DE LONG TERME

*Thèse pour l'obtention du
Doctorat ès Sciences Économiques de l'Université Paris Nanterre
Présentée et soutenue publiquement le 18 novembre 2016 par*

Victor Court

RÉSUMÉ LONG

MOTIVATION

L'origine de la croissance économique d'une nation et ce qui dirige la répartition de la richesse entre les individus, sont des sujets qui interpellent peut-être plus que jamais en ce début de XXIème siècle. Ces questions restent en vérité relativement récentes au regard de l'histoire de l'humanité. Pendant des siècles, les réflexions des théologiens et des philosophes ont en effet surtout été centrés sur la compatibilité entre l'harmonie sociale et les libertés individuelles, mais beaucoup moins sur les raisons qui expliquent la grandeur et la décadence des nations. L'économie est devenue un domaine scientifique à part entière depuis seulement deux cents ans. Son but principal est d'étudier la façon dont s'exprime au niveau agrégé (c'est-à-dire, le plus souvent, national) le penchant naturel des individus à « trafiquer, faire du troc et échanger » (Smith 1776).

Les individus « troquent et échangent » des biens et des services qui *in fine*, proviennent de la transformation de matières premières issues de l'environnement. Il s'agit schématiquement de passer des matières premières à divers biens intermédiaires, pour ensuite former des biens et des services finaux. Par convention, on comptabilise une valeur ajoutée positive au cours de chaque traitement successif de la matière ou au cours de traitements de d'information qui se rapportent à des flux de matière distants. L'agrégation de toutes les valeurs ajoutées unitaires représente la production totale de l'économie (en général, le produit intérieur brut ou PIB). La croissance économique se définit formellement comme le taux annuel d'accroissement de cette variable macroéconomique.

De nombreuses personnes semblent consciemment ou non considérer que seuls les économistes peuvent légitimement tenter de répondre aux questions fondamentales suivantes : D'où provient la croissance économique ? Pourquoi est-elle différente d'un pays à l'autre ? Pourquoi certains pays sont-ils bien plus riches que d'autres ? Cette attitude récurrente de partitionnement des questions complexes s'explique parce que ces dernières deviennent de plus en plus spécifiques et exigent des connaissances plus détaillées que jamais. En vérité, face à des

questions de société aussi complexes que celles précédemment énoncées, une approche multidisciplinaire s'avère inévitable. L'objectif de cette thèse consiste à étudier les diverses interactions qui existent entre l'histoire, l'économie, les sciences naturelles, les mathématiques et la physique, afin de répondre à la question essentielle de l'origine de la croissance économique.

Pour la majorité des économistes, une société humaine est un système qui produit des biens et des services à l'aide d'une main-d'œuvre mise à disposition par la population et de l'accumulation passée de capital physique et humain, sans la nécessité évidente d'utiliser des matières premières. Ainsi, pour la plupart des économistes, la possibilité d'augmenter la production économique est principalement définie par l'efficacité avec laquelle les *facteurs de production* que sont le travail, le capital physique et le capital humain, sont combinés. Cette efficacité à combiner les facteurs de productions porte le nom de *progrès technique*.¹ Cette efficacité de combinaison des « inputs » en « output » est assurément une composante essentielle du processus économique, même s'il est difficile de trouver une définition plus précise de ce qu'est vraiment le progrès technique. Par ailleurs, étant donné que le progrès technique a toujours été croissant dans le passé, de nombreux économistes affirment qu'il n'existe aucune raison de penser qu'il n'en sera pas de même à l'avenir.²

Cela étant dit, les économistes s'intéressant à ces questions sont les premiers à reconnaître que le progrès technique et l'accumulation des facteurs de production ne sont que des causes dites *proches* de la croissance économique. Ces causes proches orientent le processus de croissance économique à court terme, mais elles ne peuvent pas expliquer pour quelle raison, voilà environ deux cents ans, certaines régions privilégiées (Europe occidentale et Amérique du Nord) ont suivi une révolution industrielle qui les a progressivement orientées vers des taux de croissance élevés et relativement soutenus. Ces taux de croissance relativement élevés et soutenus contrastaient fortement avec ceux des millénaires précédents, durant lesquels toutes les régions du monde étaient prisonnières d'un état de quasi-stagnation malthusienne. L'une des questions les plus importantes en sciences économiques vise à comprendre pourquoi et comment ces quelques régions du monde se sont échappé du piège malthusien par une industrialisation initiée voilà deux cents ans, alors que d'autres régions n'ont bénéficié que d'un décollage économique plus tardif. Ces régions rattrapent leur retard avec plus ou moins de réussite (l'Asie de l'Est et l'Amérique Centrale et du Sud d'une part, l'Afrique et l'Asie du Sud d'autre part). Pour expliquer ce phénomène nommé *Grande Divergence*, les experts du sujet (économistes et historiens généralement) considèrent que certaines causes désignées comme *fondamentales* (ou *ultimes*), mais qu'il conviendrait mieux de qualifier de *profondes* (ou *lointaines*), doivent être prises en considération. Ces causes profondes peuvent être classées dans l'une des quatre catégories suivantes : biogéographie, culture, institution, et contingence (chance). Naturellement, il n'existe pas de consensus sur l'importance relative de ces facteurs

¹ Dans ma thèse rédigée en anglais, j'utilise préférentiellement le terme de « technological change » et non pas « technological progress ». Dans la littérature sur le sujet, il n'y a pas de distinction formelle entre ces deux expressions mais la notion de « progrès » technique contient une dimension normative dans le sens où chaque modification technologique devrait nécessairement apporter une contribution positive au système économique et, *a fortiori*, au bien-être des individus. Cette vision est à mon avis erronée, mais de toute façon, le terme « changement technique » n'est pas du tout usité en français, si bien que je me conforme à utiliser la locution « progrès technique » dans ce résumé en français.

² J'ai synthétisé ici une idée souvent avancé par Philippe Aghion, expert de renommée mondiale sur la question de la croissance économique. Son point de vue est clair dans cette courte vidéo (en français) : http://www.francetvinfo.fr/economie/croissance/video-est-ce-la-fin-de-la-croissance_809791.html.

pour expliquer pourquoi de nos jours, certains pays sont si riches et d'autres si pauvres. Des débats sans fin ont préoccupé les historiens et les économistes sur ce sujet depuis plus de deux cents ans. Une théorie de la croissance unifiée (*Unified Growth Theory* ou UGT en anglais) a récemment été formulée, elle a permis de faire avancer ce débat sur un terrain mathématiquement plus formalisé. Comme cette thèse le démontre, un aspect primordial du processus de croissance économique a été complètement négligé dans la théorie économique et jusqu'à sa réintégration dans l'UGT, cette dernière restera imparfaite, voire déficiente.

En termes très simples, une société humaine est en vérité un système qui transforme des ressources naturelles en biens et en services que les individus désirent consommer pour satisfaire un niveau de vie donné. L'une des ressources naturelles dont la théorie économique standard ne tient pas assez compte joue pourtant un rôle tout à fait particulier : il s'agit de l'énergie. La première partie de cette thèse montre que la seule cause fondamentale de croissance économique est la capacité de consommation de services exergetiques. L'exergie étant la quantité d'énergie extraite de l'environnement, transformée et consommée sous forme de services (lumière, chaleur, mouvement, etc.). Le rôle de l'énergie (de l'exergie plus précisément) doit être correctement compris pour former la base d'une théorie unifiée de la croissance économique. Construire une telle théorie reste un objectif de recherche de long terme et cette thèse n'en constitue qu'une première étape. Pour l'heure, il est important de préciser la question de recherche qui y est étudiée.

QUESTION DE RECHERCHE

Si le rôle de la consommation de services exergetiques comme cause fondamentale de la croissance économique n'est pas reconnu parmi les spécialistes, la dépendance des économies modernes aux ressources énergétiques fossiles est manifeste dans la sphère publique, et ce depuis les deux crises pétrolières des années 1970. Considérant que les ressources énergétiques fossiles existent en tant que stocks et que leurs quantités sont donc forcément limitées, et compte tenu des fortes pollutions générées par l'utilisation de ces formes d'énergies non renouvelables, la nécessité d'opérer une transition vers des énergies dites renouvelables est désormais bien établie et intégrée dans de nombreuses politiques publiques. Il faut toutefois souligner qu'une ressource renouvelable est également limitée, non pas en termes de quantité totalement récupérable sur plusieurs années, mais en termes de flux disponible à un moment donné, en particulier sur une année. Pour se référer à l'ampleur d'un stock non renouvelable ou d'un flux annuel renouvelable d'énergie, on parle de la *disponibilité* des ressources énergétiques. Les différentes questions relatives à la disponibilité des ressources énergétiques et les mix énergétiques optimaux d'approvisionnement que tel ou tel pays doivent choisir ont monopolisé quasiment toute l'attention sur la question du potentiel de l'énergie comme contrainte économique. Mais une autre dimension majeure de l'énergie, à savoir son *accessibilité*, a été largement ignorée dans ces débats. L'accessibilité d'une ressource énergétique est caractérisée par son taux de retour énergétique, ou *energy-return-on-investissement* (EROI) en anglais. Là où la disponibilité d'une énergie se mesure par la taille de sa ressource dans l'environnement, son accessibilité ou EROI représente la difficulté à extraire cette énergie primaire de l'environnement et à la délivrer à l'économie. Formellement, le EROI se définit comme le rapport entre l'énergie extraite d'une ressource et délivrée à l'économie sur

l'énergie investit (au travers du système énergétique) pour extraire cette énergie de l'environnement. Par ailleurs, l'énergie primaire (sous forme de charbon, de pétrole, de gaz, de rayonnement solaire, etc.) reste en soi de peu d'utilité pour le processus économique, car elle doit être convertie en formes dites finales d'énergie (liquides raffinés, gaz, chaleur, électricité), dissipées pour fournir de l'énergie utile (ou services énergétiques sous forme de lumière, de chaleur, de mouvement et d'électricité). Comme cette thèse le rappelle, les lois fondamentales de la thermodynamique stipulent que seule une partie de l'énergie de ces différentes formes successives (primaire, finale, utile), est productive au sens physique et peut donc être utilisée pour alimenter le processus économique. Cette part productive de l'énergie se nomme *exergie*.

Ces notions ont été conceptualisées par des penseurs d'avant-garde en matière de physique et d'étude des écosystèmes (écologie), et appliquées à de nombreux systèmes, y compris l'économie. Pourtant, les économistes ont largement ignorés l'importance de ces concepts dans leurs théories. Les questions qui découlent immédiatement de ce constat sont les suivantes : Comment des théories qui ne respectent pas la réalité physique du système économique peuvent-elles expliquer les faits passés de la croissance économique ? Pourquoi l'économie standard ne tient-elle pas compte de l'importance des ressources naturelles, et plus particulièrement de l'énergie, pour expliquer le processus de croissance économique ? La disponibilité et l'accessibilité de l'énergie sont-elles vraiment des variables importantes pour expliquer le fonctionnement du processus de croissance économique ? Est-il possible d'assimiler le progrès technologique agrégé de l'économie à l'efficacité de conversion de l'exergie primaire en exergie utile ? Pour résumer, la question fondamentale de recherche de cette thèse est la suivante :

Quelle est l'importance de l'énergie pour la croissance économique ?

Cette thèse se compose de sept chapitres au travers desquels deux questions distinctes mais connexes sont explorées. Les chapitres 1 à 3 forment un essai original qui vise à démontrer que le niveau de consommation d'exergie utile (ou services exergétiques) dirige bel et bien le processus de croissance sur le long terme. Les chapitres 5 à 7 correspondent à des articles publiés qui visent à déterminer ce que la contrainte d'énergie (exergie) nette pourrait impliquer dans un futur opérant une transition complète vers les énergies dites renouvelables. En position centrale, le chapitre 4 fournit des éléments de réponse à ces deux questions.

LA CAPACITÉ DE CONSOMMATION D'EXERGIE UTILE COMME CAUSE FONDAMENTALE DE LA CROISSANCE

Les principaux faits de la croissance économique de long terme

Le chapitre 1 décrit les quatre principaux faits de la croissance économique de long terme : la transition du régime de stagnation à la croissance soutenue, la Grande Divergence, la dynamique en cycles imbriqués et hiérarchisés, et l'interdépendance entre consommation d'énergie et progrès technique. La transition d'une région du monde ou d'un pays, d'un régime de stagnation malthusienne à un régime de croissance élevée et soutenue s'observe par le taux d'accroissement de certaines variables clés telles que le revenu par habitant, la densité de

population, la fécondité, et les niveaux d'industrialisation et d'urbanisation. Le passage d'un régime de stagnation à un régime moderne de croissance soutenue, et la transition démographique qui accompagne une telle transition économique, ont variés en termes de date et d'amplitude pour toutes les régions du monde, ce qui a conduit au phénomène de Grande Divergence. L'Angleterre a sans conteste connu le décollage économique le plus précoce, puisque c'est dans ce pays que la révolution industrielle a été initiée aux environs de 1750-1760, avant de s'étendre à l'Europe occidentale et aux pays d'immigration européenne (États-Unis, Canada, Australie et Nouvelle-Zélande) au cours de la première partie du XIX^{ème} siècle. Le décollage économique de l'Amérique du Sud et de l'Asie de l'Ouest ont eu lieu vers le début du XX^{ème} siècle, alors que les décollages économiques de l'Asie de l'Est et de l'Afrique ont été retardés jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. Par ailleurs, le développement humain vu dans sa totalité semble (auto-)organisé en cycles adaptatifs hiérarchisés et imbriqués, qui définissent à la fois sa structure et son fonctionnement (cycles civilisationnels, séculaires, générationnels, de Kondratieff, de Kuznets, de Juglar, et de Kitchin). La fin de la première partie du chapitre 1 montre que l'amélioration et la diffusion des technologies, en particulier les technologies à usage général (*General Purpose Technologies* ou GPTs en anglais), sont fortement liées à la quantité d'énergie consommée par personne.

Causes profondes et proches de la croissance économique

Dans ce même chapitre 1, les différentes causes profondes de la croissance économique sont présentées en détail. Certains facteurs biogéographiques semblent avoir eu une influence indéniable pour expliquer que l'agriculture a démarré à des dates espacées de plusieurs milliers d'années dans diverses régions du monde. Le démarrage de l'agriculture s'accompagnant d'une densification de la population, d'une division accrue du travail et de l'établissement des premières villes dotées de bureaucraties, le différentiel temporel d'initiation (*differential timing* en anglais) de toutes ces caractéristiques a eu un effet durable quelques milliers d'années plus tard sur la date d'initiation de l'industrialisation dans ces mêmes régions. Les facteurs biogéographiques les plus déterminants pour l'établissement de l'agriculture sont : les conditions climatiques (notamment l'humidité et l'ensoleillement) et surtout la taille et l'orientation de l'axe continental majeur (Est / Ouest pour l'Eurasie vs. Nord / Sud pour l'Afrique et l'Amérique). Ces facteurs ont fortement déterminés le nombre d'espèces animales et végétales sauvages susceptibles d'être domestiquées (et donc adaptées à l'agriculture) dans chaque région du monde. Comparé à l'Amérique et à l'Afrique, l'Eurasie de l'Ouest, et en particulier la région du Croissant Fertile, était bien mieux dotée en espèces animales et végétales sauvages domesticables. Par ailleurs, l'Eurasie se prêtait beaucoup mieux à la diffusion des pratiques agricoles, compte tenu de son orientation Est / Ouest et de sa faible dotation en barrières écologiques majeures (déserts, montagnes, et rétrécissements isthmiens), en comparaison de l'Amérique et de l'Afrique. Ainsi, le fait que l'agriculture soit d'abord apparue dans le Croissant Fertile avant de se diffuser en Europe occidentale n'a rien d'un hasard, mais résulte plutôt d'un déterminisme probabilisable : si rien n'est complètement déterminé dans cet événement, les chances qu'il se déroule de cette manière plutôt que d'une autre étaient bien plus nombreuses. D'autres facteurs biogéographiques ont par la suite eu une influence importante pour expliquer le différentiel de développement des régions du monde. Citons par

exemple la longueur du littoral par rapport à la taille du continent qui impacte le degré d'ouverture au commerce international, l'Europe étant également avantagée sur ce point.

Les attributs culturels et institutionnels d'un pays, sur lesquels les économistes portent préférentiellement leur attention, sont reliés entre eux par une endogénéité qui semble difficilement analysable. Par ailleurs, ces facteurs semblent être en partie des conséquences, et non seulement des causes, de la croissance et du développement économique. Enfin, il est possible que certains événements historiques (colonisation, commerce d'argent entre les Amériques, l'Europe et la Chine de 1500 à 1800) aient générés des contraintes temporaires qui auraient empêché ou retardé les décollages économiques de plusieurs pays.

Afin d'obtenir une description plus complète du processus de croissance économique, le chapitre 2 se concentre sur l'étude des théories relatives au régime de croissance élevée et soutenue atteint par les pays industrialisés. Malgré une littérature considérable, les causes proches de la croissance économique invoquées dans ces modèles théoriques restent toujours les mêmes. Elles consistent en l'accumulation de capital physique et humain, et en l'amélioration de l'efficacité avec laquelle le système économique converti ces facteurs en produit macroéconomique. Cette efficacité du système économique prend le nom de progrès technique. Elle correspond en vérité à une solution « fourre-tout » puisque des caractéristiques très différentes du système économique sont agrégées dans cette variable, alors même que la plupart d'entre elles pourraient être partiellement considérées comme des conséquences ou des facteurs facilitateurs de la croissance économique : la division et la meilleure organisation du marché du travail, la meilleure organisation et efficacité des autres marchés du système économique, l'amélioration des compétences des travailleurs, la contribution des technologies de l'information et de la communication, mais aussi les effets bénéfiques des institutions dites inclusives (qui, par exemple protègent les droits de propriété privée et encourage ainsi l'innovation et la R&D). Sans plus de précisions sur ce concept pourtant central, certains chercheurs ont récemment tentés de construire une théorie de la croissance unifiée qui est également analysée dans ce deuxième chapitre. Cet examen approfondi des théories de la croissance économique montre la déconnexion de l'approche standard de toute réalité biophysique et son incapacité à correctement expliquer le phénomène de croissance économique.

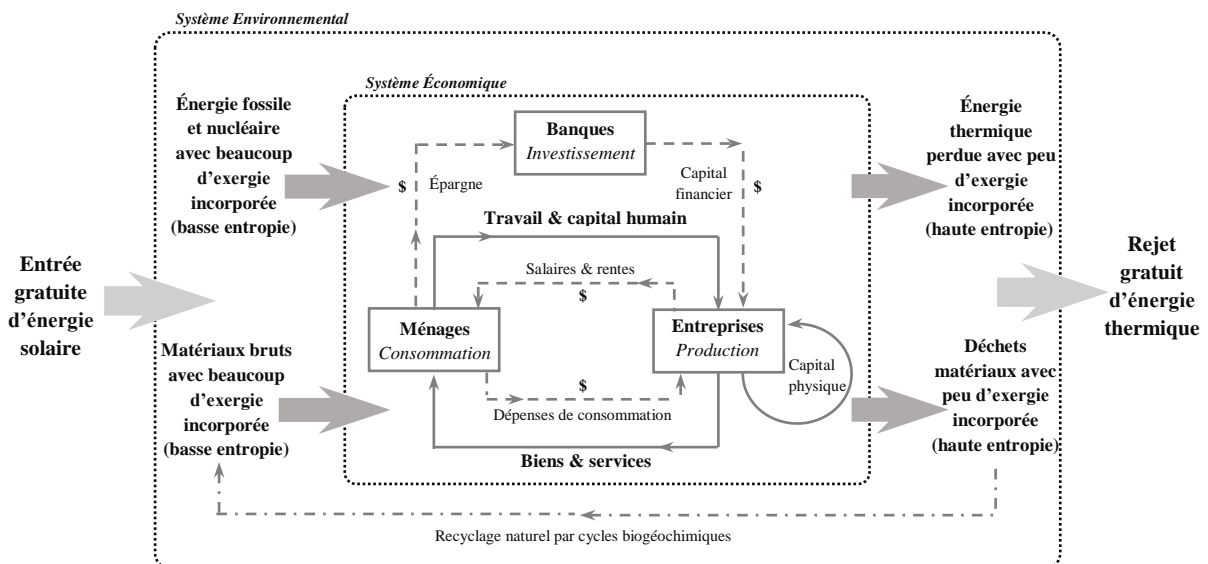
Exergie, entropie et croissance économique

Le chapitre 3 commence par une analyse des raisons du désintérêt de l'approche standard pour les ressources naturelles, et en particulier pour l'énergie. Il est démontré que ces prétendues explications reposent sur des raisonnements extrêmement fragiles. Des concepts essentiels tels que ceux d'exergie et d'entropie sont décrits de manière formelle pour comprendre que les première et seconde lois de la thermodynamique s'appliquent toujours au système économique et façonnent son fonctionnement. Plus précisément, ces lois fondamentales démontrent que les théories de la croissance n'incluant pas le rôle de l'énergie représentent le système économique comme une machine à mouvement perpétuel du premier ordre, c'est-à-dire une machine qui exécute indéfiniment des cycles produisant du travail physique, sans pour autant avoir besoin d'un apport d'énergie. Dans la mesure où l'existence d'une telle machine est absolument impossible dans le monde réel, il suit qu'en économie standard, le système économique reste un artefact conceptuel dont le fonctionnement sans

énergie est par définition lui aussi impossible. L'énergie a une petite part dans le coût total de production non pas parce qu'elle est moins importante que le capital ou le travail en tant que facteur de production, mais plutôt parce que la biosphère et la géosphère génèrent gratuitement le travail physique qui permet de concentrer l'énergie que nous utilisons librement et abondamment.

Comme le dit Atkins (2010, p.22), si la première loi de la thermodynamique était jugée fautive, « *une richesse et des avantages incalculables reviendraient à l'humanité dans une mesure incalculable* ». La deuxième loi de la thermodynamique est essentielle pour comprendre qu'en réalité, le système économique est un système ouvert (au sens thermodynamique) qui extrait et convertit de la matière-énergie de faible entropie (c'est-à-dire ordonnée) en produits d'entropie encore plus faible (encore plus ordonnés) en générant des déchets de haute entropie (très désordonnés) qui sont gratuitement absorbés par l'environnement (voir le Graphique de Synthèse 1). La diminution non spontanée d'entropie (augmentation d'ordre) de la matière lors de la transformation des ressources naturelles en produits finis n'est possible que si une quantité encore plus élevée d'entropie est produite lors de la dégradation de l'exergie contenu dans l'énergie extraite de l'environnement et dissipée pendant la transformation de la matière.

Tenir compte des lois fondamentales de la thermodynamique et des concepts qui y sont associés offre un cadre théorique très différent de l'approche standard pour étudier le système économique. En particulier, cette approche biophysique montre que seule la capacité de consommation de services exergetiques (ou exergie utile) constitue une cause fondamentale de croissance économique sur le long terme. La capacité à extraire de l'exergie primaire de l'environnement et la possibilité de convertir cette exergie primaire en services exergetiques (sous la forme de lumière, de chaleur, d'électricité et de mouvement) semblent clairement être les deux mécanismes associés qui expliquent la croissance économique de long terme.



Graphique de Synthèse 1. Le système économique en tant que machine réel fonctionnant par dégradation d'exergie.

De plus, avec une telle approche biophysique, au lieu de la définition « fourre-tout » de l'approche standard, la notion de progrès technique se définit formellement par des gains

croissants dans l'efficacité agrégée de conversion de l'exergie primaire en exergie utile. On peut alors montrer que les limites structurelles des matériaux définiront la limite ultime du niveau technologique agrégé de l'économie. Celle-ci pourrait être plus proche que prévu car, la stagnation depuis le début des années 1970 de l'efficacité agrégée de conversion de l'exergie primaire en exergie utile des pays industrialisés, associée à un ralentissement de l'approvisionnement d'exergie primaire par personne, semblent donner une explication au ralentissement de la croissance économique subie par ces mêmes pays depuis cette même période.

Consommation d'exergie utile et développement économique

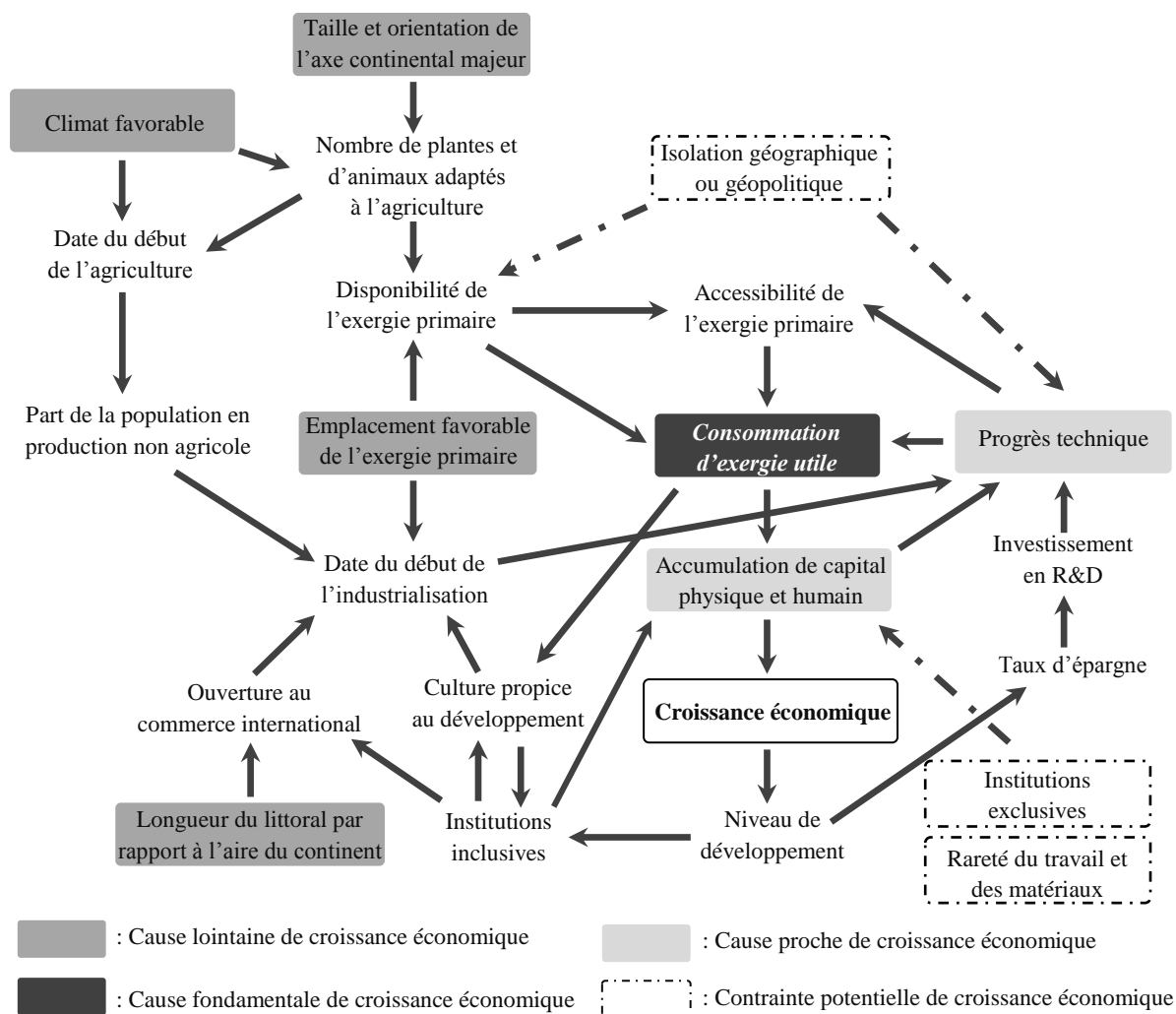
Comme l'a dit Siefertle (1997), « *l'histoire universelle peut être subdivisée en trois parties. Chaque partie se caractérise par son système énergétique dominant [chasse et cueillette, agriculture, combustion de carburants fossiles]. Ce système énergétique définit le cadre général dans lequel se forme les structures de la société, son économie, et sa culture. Ainsi, l'énergie n'est pas un simple facteur agissant parmi les autres. En vérité, il est en principe possible de déterminer les structures de base d'une société à partir des conditions de fonctionnement de son système énergétique* ». En ce qui concerne la relation de cause à effet entre les trois systèmes de capture d'énergie principaux (chasse et cueillette, agriculture, et combustion de carburants fossiles) et les systèmes de valeurs morales adoptés par les sociétés (déterminés par leurs variabilités dans les attributs suivants : hiérarchie politique et économique, inégalités de genre, violence), il est important de souligner que « *ce ne sont pas les individus eux-mêmes qui sont amenés à adopter des valeurs en accord avec le mode de capture d'énergie de leur société. L'idée est plutôt de voir qu'au cours des longues périodes de l'histoire, et par la suite d'expériences sociales innombrables, les sociétés (c'est-à-dire les groupes d'individus) qui sont les mieux organisées pour exploiter le mode de capture d'énergie en vigueur (par leurs structures sociales, leurs institutions économiques et politiques, leurs cultures et in fine leurs valeurs), ont tendance à prospérer au dépens des autres sociétés moins bien organisées. Pour un niveau technologique donné, les formes sociales et les valeurs qui sont mal adaptées à la survie humaine et au confort de ces derniers feront place à des institutions et à des valeurs plus efficaces* » (Stephen Macedo dans l'introduction de Morris 2015, p.XIX).

Ainsi dans les sociétés agraires, la croissance économique dépend d'un côté de la capacité des individus (souvent forcés au travail comme les esclaves ou les serfs) à exploiter une quantité croissante d'exergie solaire sous la forme de nourriture, de fourrage, de mouvement (venant des courants d'eau et du vent qui sont dérivés de l'exergie solaire) et de bois de chauffage (là encore indirectement issu de l'exergie solaire), et d'un autre côté de la capacité de la technologie de ces mêmes individus à transformer ces formes d'exergie primaire en exergie utile sous forme de lumière, de chaleur et de puissance mécanique. Par ailleurs, au cours des deux derniers siècles, le travail des animaux et des humains a été progressivement remplacé par des machines activées par de l'exergie fossile, ce qui a fait baisser le coût des biens et des services, en termes de nombre d'heures de travail nécessaires pour acheter ces produits, et a par conséquent généré une augmentation de la demande et de la production. Il semble que dans les pays maintenant appelés « développés », cette substitution de long terme ait été le principal moteur de la croissance économique depuis la révolution industrielle (Ayres

& Warr 2009, p.168). Plus récemment, les transistors fonctionnant à l'électricité ont eux aussi contribué à réduire les limites biologiques de l'homme car ils aident le cerveau de ce dernier dans le traitement et le stockage de grandes quantités d'informations. Ainsi, dans les sociétés modernes industrialisées, c'est « *l'exergie qui anime les machines dans les mines et sur les sites de forage, dans les centrales électriques, dans les usines et les immeubles de bureaux, sur les rails, les routes et dans les fermes, dans les airs et sur la mer. En bref, l'exergie active tous les processus créateurs de richesses des économies industrielles* » (Kümmel 2011, p.37).

Pour résumer, les soit-disant causes de la croissance généralement invoquées par l'économie standard, telles que la mise en place d'institutions inclusives (protection des droits de propriété, expression démocratique), la présence de traits culturels favorables (état d'esprit scientifique et travailleur), l'existence de caractéristiques smithiennes (marchés concurrentiels, grande variété de produits, division du travail) et d'autres aspects comme l'ouverture au commerce international, devraient plutôt être considérées comme des facteurs facilitateurs, voire des conséquences partielles de la croissance économique. La cause fondamentale de la croissance économique est la capacité à consommer de l'exergie utile, qui réside dans la capacité à extraire de l'exergie primaire de l'environnement, combiné à la possibilité de transformer cette exergie primaire en exergie utile sous la forme de lumière, de chaleur, d'électricité, et de mouvement. Les différences entre causes fondamentales, lointaines et proches de la croissance économique et ses conséquences sont résumées dans le Graphique de Synthèse 2.

La première partie de cette thèse (chapitre 1 à 3) démontre qu'une approche thermodynamique du système économique (appelée économie biophysique) est pertinente pour comprendre le phénomène de croissance économique de long terme. Même si des démonstrations plus formelles restent à être formulées, cette thèse montre que le rôle joué par l'énergie est primordial pour expliquer les quatre faits de la croissance économique de long terme (la transition de la stagnation à la croissance soutenue, la Grande Divergence, l'interdépendance entre consommation d'énergie et progrès technique, et la dynamique en cycles imbriqués et hiérarchisés). La disponibilité de l'énergie primaire, d'abord renouvelable (biomasse, eau et vent) puis non renouvelable (notamment le charbon pour la Grande-Bretagne), a joué un rôle conséquent dans le processus de Grande Divergence. Une disponibilité et une accessibilité accrue de l'énergie en Grande-Bretagne au XVIII^{ème} siècle explique que ce pays ait été le berceau de la révolution industrielle. Ce sont également les différences en matière de disponibilité et d'accessibilité locale de l'énergie, et l'ampleur des différences dans la diffusion des technologies qui permettent une augmentation de l'efficacité agrégée de conversion de l'exergie primaire en exergie utile qui ont principalement défini la direction de la Grande Divergence. En conséquence, la croissance économique future dépendra essentiellement (i) de l'augmentation continue de l'efficacité agrégée de conversion de l'exergie primaire en exergie utile, et (ii) de l'augmentation continue de l'extraction d'exergie primaire disponible. Le premier point a déjà été discuté, mais le second doit être abordé en termes d'énergie (exergie) nette.



Graphique de Synthèse 2. Causes de croissance économique fondamentale, lointaine, et proche.

LA CONTRAINTE D'EXERGIE NETTE AU XXI^{ème} SIÈCLE

Le taux de retour énergétique comme mesure de l'accessibilité d'une ressource

La disponibilité d'une ressource énergétique est représentée par son niveau de ressource ultimement récupérable (*ultimately recoverable resource*, ou URR en anglais) dans le cas d'un stock non renouvelable, et par son potentiel technique (*technical potential*, ou TP en anglais) dans le cas d'un flux renouvelable. En revanche, la facilité à extraire une ressource énergétique, c'est-à-dire son accessibilité, correspond à son taux de retour énergétique ou EROI en anglais. Le EROI d'une ressource énergétique définit la quantité d'énergie qui doit être investi pour exploiter une ressource d'énergie donnée : il représente donc la difficulté à extraire l'énergie de l'environnement et à la délivrer à l'économie. Le EROI des ressources énergétiques est un indicateur crucial du potentiel de développement économique puisque toutes les sociétés ont besoin de ressources énergétiques qui offrent davantage d'énergie que ce qui est investi pour les utiliser. De plus, le surplus énergétique disponible pour faire autre chose qu'exploiter une ressource énergétique est d'autant plus grand que son EROI est élevé. Par ailleurs, il semble logique de penser que toutes les sociétés ont un EROI minimum nécessaire pour maintenir leur

niveau de développement. Le chapitre 4 présente en détail la méthodologie de calcul statique (c'est-à-dire pour une année donnée) du EROI d'un système énergétique donné, ainsi que les différentes controverses entourant un tel calcul, et donc les limites de ce concept. Des études ont déjà montré que les ressources énergétiques fossiles auxquelles les économies modernes sont habituées et dépendantes semblent ne plus générer autant d'énergie nette qu'avant. En effet, toutes les études estimant les EROIs des différents combustibles fossiles au cours du temps présentent les mêmes résultats : des EROIs décroissants sur les dernières décennies avec des EROIs maximum déjà passés. Une méthodologie fondée sur les prix développée dans ce même chapitre apporte une nouvelle perspective sur cette question. Elle montre que les EROIs maximaux ont en effet déjà été atteints au niveau mondial pour la production de pétrole et de gaz. Mais en ce qui concerne le charbon, des gains d'énergie nets sont encore à prévoir grâce à des gains technologiques à venir. D'autre part, des études récentes ont montré que les combustibles fossiles non conventionnels (sables bitumineux, gaz et pétroles de roches mères, etc.) ne génèrent pas autant d'énergie nette que les énergies fossiles dites conventionnelles. Plus important encore, les technologies dites renouvelables pour lesquelles de nombreux décideurs politiques et experts voient un avenir prometteur, présentent des EROIs qui sont actuellement bien inférieurs aux EROIs passés et actuels des combustibles fossiles, en particulier lorsque la nature intermittente de ces technologies renouvelables est prise en compte. Bien entendu, il existe des possibilités d'amélioration pour ces technologies immatures, mais pour elles aussi, le principe consistant à utiliser les meilleures ressources avant de se tourner vers celles de qualité inférieure s'applique. Par conséquent, il semble que les systèmes économiques futurs finiront par se diriger vers un régime où une part croissante de l'énergie extraite de l'environnement est investie dans le système d'extraction énergétique de l'économie, ce qui (à production brute équivalente) diminue nécessairement la quantité d'énergie nette délivrée à la société pour soutenir d'autres activités que l'exploitation de ressources énergétiques.

EROI et appauvrissement qualitatif des métaux

Comme indiqué dans le chapitre 5, la construction des technologies renouvelables nécessite également de plus grandes quantités de matériaux, et en particulier de métaux, que les technologies de production d'énergie fossile. Le coût énergétique associé à l'extraction de ces métaux augmente à mesure que l'épuisement quantitatif et qualitatif des métaux progresse, suivant une relation fortement non-linéaire (fonction de type puissance inverse). Ainsi, dans le cadre d'une transition complète vers les énergies renouvelables, toutes choses égales par ailleurs, les besoins énergétiques croissants du secteur des métaux en raison de la dégradation de la concentration en métaux des minerais exploités devraient accroître davantage la demande d'énergie renouvelable. Comme l'intermittence de ces technologies implique d'élargir et de renforcer les réseaux de transport et de distribution d'électricité et d'augmenter les capacités de stockage, on peut s'attendre à une demande accrue de métaux pour répondre à ces besoins. En conséquence, dans la perspective d'une transition vers des technologies renouvelables, un cercle vicieux pourrait potentiellement se développer entre les secteurs de l'énergie et des métaux. La fin du chapitre 5 présente les leviers existant pour atténuer l'impact négatif de ce cercle vicieux entre les secteurs de l'énergie et des métaux.

Dépenses d'énergie, croissance économique et EROI minimum

Le chapitre 6 montre comment la contrainte d'énergie (exergie) nette se matérialise à court terme par le biais des dépenses d'énergie qui représentent la part du PIB consommée pour obtenir de l'énergie. Cette variable semble jouer un rôle de « limite à la croissance » puisque, sur les derniers siècles, aussi bien aux États-Unis, en Grande-Bretagne, qu'au niveau mondial, des taux de croissance économique élevés (supérieurs à 2 % - 3 %) n'ont jamais été observés quand les dépenses énergétiques étaient supérieures à 6 % - 8 % du PIB. Plus précisément, pour les États-Unis et l'économie mondiale, les périodes prolongées de forte dépense énergétique par rapport au PIB (1850-1945), ou de sursauts de ces dépenses (1973-74 et 1978-79) sont associés à de faibles taux de croissance économiques, alors que les périodes de faible dépense d'énergie ou de baisse de cette variable sont associées à des taux de croissance économiques élevés et/ou croissants (1945-1973 par exemple). Il est par ailleurs possible de calculer le niveau maximum de dépense énergétique au-delà duquel la croissance économique est négative (en l'absence d'autres limites majeures de type géopolitique ou institutionnelle). Ceci est fait pour les États-Unis sur la période 1960-2010 et on peut déterminer que d'un point de vue statistique, un niveau de dépense énergétique supérieur à 11% du PIB implique un taux de croissance économique négatif pour ce pays. Ce résultat peut aussi se traduire par le EROI minimum requis pour obtenir un taux de la croissance économique positif. Pour les États-Unis, on trouve que ce dernier se situe à 11:1, et on peut montrer que cela correspond aussi à un prix maximum tolérable de l'énergie fossile deux fois plus élevé qu'actuellement. Enfin, des tests de causalité de Granger soutiennent aussi l'idée d'une causalité négative unidirectionnelle du niveau des dépenses énergétiques sur la croissance économique aux États-Unis entre 1960 et 2010.

Croissance économique et transitions énergétiques

Au travers d'un modèle théorique, le chapitre 7 initie un lien entre la théorie endogène de la croissance économique, l'approche de l'économie biophysique, et les nécessaires transitions passées et futures entre formes d'énergie renouvelable et non renouvelable. Le modèle soutient qu'au niveau mondial, les productions historiques d'énergies renouvelable et non renouvelable ont fortement influencé la croissance économique passée. En effet, à partir d'un premier régime où l'approvisionnement énergétique est presque entièrement renouvelable, le modèle reproduit la transition progressive vers l'approvisionnement fossile qui a permis à l'économie mondiale de quitter l'état de quasi-stagnation économique qui a caractérisé la plus grande partie de son histoire. D'autres part, un exercice prospectif de simulation du modèle permet de définir les conditions pour lesquelles une transition vers un système totalement renouvelable pourrait avoir des effets négatifs sur la croissance économique, c'est-à-dire occasionner un pic du PIB mondial puis une phase de décroissance prolongée.

La deuxième partie de cette thèse (chapitre 4 à 7) suggère que le maintien d'un approvisionnement élevé d'énergie nette est susceptible de devenir de plus en plus difficile à l'avenir compte tenu de l'évolution passée des EROIs des combustibles fossiles et des faibles EROIs actuels des énergies dites renouvelable vers lesquelles les pays industrialisés sont censés opérer une transition. Il existe bien entendu des possibilités pour contrecarrer la baisse du EROI sociétal ou s'adapter à la diminution de ce dernier. Mais, d'un point de vue systémique, les sociétés industrialisées semblent ne pas être conçues pour fonctionner avec des ressources

énergétiques de faible densité qui s'accompagnent de faibles EROIs. Jusqu'à preuve du contraire, une croissance économique élevée n'est possible que si des ressources énergétiques de haute densité alimentent le système économique pour permettre l'accumulation de capital physique et humain, la mise en place d'institutions inclusives, une consommation élevée de biens et de services, des temps de loisir importants et de qualité, et en résumé un bien-être plus important pour les individus.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Construire une théorie unifiée de la croissance économique est essentielle pour deux raisons. Tout d'abord, la compréhension du processus moderne de croissance restera toujours incomplète si la théorie de la croissance ne peut représenter dans un cadre unique les différents aspects qualitatifs du développement des sociétés. Tant que le décollage économique précoce de certains pays voilà deux cents ans restera un mystère, la confiance dans la théorie moderne de la croissance économique ne pourra que rester fragile. Deuxièmement, la compréhension des obstacles que les pays moins développés rencontrent aujourd'hui pour atteindre un régime de croissance économique élevée et soutenue ne peut se faire que si les facteurs qui ont conduit la transition des pays désormais développés dans ce même état de croissance moderne peuvent être identifiés, et que leurs implications peuvent être adaptées aux structures des pays en voie de développement.

Les travaux amorcés dans cette thèse nécessitent d'être approfondis pour aboutir à une théorie unifiée de la croissance économique qui respecte les contraintes biophysiques du monde réel. Comme indiqué dans l'introduction de cette thèse, une approche multidisciplinaire semble être nécessaire pour qu'un tel projet soit un succès. Élaborer une véritable théorie unifiée de la croissance économique ne sera possible qu'une fois que le rôle de la consommation d'exergie sera correctement pris en compte et lié avec précision aux autres déterminants du processus de croissance, à savoir les causes profondes et proches de la croissance économique.

REFERENCES

- Atkins, P.W., 2010. *The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction*, Oxford, UK: Oxford University Press.
- Ayres, R.U. & Warr, B., 2009. *The Economic Growth Engine: How Energy and Work Drive Material Prosperity*, Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.
- Kümmel, R., 2011. *The Second Law of Economics: Energy, Entropy, and the Origins of Wealth*, New York, NY: Springer.
- Morris, I., 2015. *Foragers, Farmers, and Fossil Fuels: How Human Values Evolve*, Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Sieferle, R.P., 1997. Das vorindustrielle Solarenergiesystem. In H. G. Brauch, ed. *Energiepolitik*. Berlin, DE: Springer.
- Smith, A., 1776. *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, London, UK: W. Strahan, T.Cadell.