

THÈME 1 : BIENS COMMUNS MONDIAUX



SOUS LA DIRECTION SCIENTIFIQUE DE
Jean-Pascal van Ypersele
Marek Hudon



1^{ER} CONGRÈS INTERDISCIPLINAIRE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

QUELLE TRANSITION POUR NOS SOCIÉTÉS ?

31/01/13
01/02/13

NAMUR



1^{er} Congrès
interdisciplinaire du
développement durable

Quelle transition pour nos sociétés ?

Thème 1

Biens communs mondiaux



Namur, les 31 janvier et 1er février 2013

Le rêve de croissance économique confronté à la réalité des limites physiques et technologiques de l'énergie

Hervé JEANMART¹, L. POSSOZ²

1 Institut de mécanique, matériaux, et génie civil (iMMC), Université catholique de Louvain,
1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

2 Ingénieur conseil, Louvain-la-Neuve, Belgique

1. Introduction

Nos sociétés se sont développées grâce à l'abondance et la disponibilité des ressources énergétiques. Sans des quantités croissantes d'énergie, l'humanité n'aurait jamais pu poursuivre la croissance démographique et économique entamée il y a dix mille ans. Beaucoup d'arguments convergent cependant pour estimer que le niveau actuellement atteint est démesuré. Les combustibles fossiles sont actuellement consommés un million de fois plus rapidement que leur accumulation dans le sous-sol. Le réchauffement climatique et les autres dérèglements de la biosphère menacent la survie des civilisations si pas celle de l'espèce. L'empreinte écologique dépasse nettement les capacités de régénération naturelles.

La croissance moderne a débuté avec le charbon et se poursuit actuellement grâce à l'ensemble des combustibles fossiles. Aujourd'hui, ceux-ci représentent 80% de l'approvisionnement mondial en énergie primaire. Le complément est apporté par les énergies renouvelables et le nucléaire. Lorsque l'ensemble de cette énergie primaire est comptabilisé en équivalent pétrole, la consommation moyenne mondiale actuelle s'élève à 4.5 kep/per/j (kilogramme équivalent pétrole par personne et par jour), avec de très grandes disparités tant entre les régions qu'au sein d'une même région. Après plus de 20 ans de stagnation, la consommation d'énergie per capita a repris sa croissance après le début de ce siècle, sous la poussée de pays dont la consommation reste largement inférieure à la moyenne et en particulier celle des pays émergents asiatiques, et elle s'est à nouveau arrêtée en 2008 [Jancovici 2012]. Au niveau mondial, la consommation totale augmente d'autant plus que la population est toujours en croissance.

Cependant, au delà des enjeux climatiques dont l'acuité ne fait plus de doute, l'énergie sous une forme exploitable¹ se fait de plus en plus rare. Qu'elle soit renouvelable, fossile ou nucléaire, l'énergie est de plus en plus difficile à extraire de la nature, pour différentes raisons, pas uniquement techniques. Ces dernières années, l'économie mondiale n'est même plus arrivée à découvrir de nouvelles réserves d'énergie suffisantes pour simplement remplacer les quantités consommées durant l'année écoulée. La mise au ban pour raisons climatiques des énergies fossiles ne pourra qu'exacerber de manière extrême cette précarité des ressources que l'être humain utilise pour sa survie et son développement.

Dans ce contexte, l'économie peut-elle simplement se passer d'énergie et poursuivre sa croissance? Les progrès technologiques du futur (contrairement à ceux du passé) vont-ils engendrer une économie très sobre en énergie voire largement dématérialisée? Dans

¹ C'est d'énergie qu'il faudrait parler car c'est elle qui mesure effectivement ce qui est consommé. En effet, une quantité d'énergie ne diminue jamais, elle peut seulement être transformée, mais toujours dans le sens d'une dégradation.

l'affirmative, les crises énergétiques, environnementales et sociales pourront être résolues sans changer de paradigme socio-économique. À l'inverse, en cas de réponse négative, l'organisation actuelle de nos sociétés, basée sur la croissance économique, devra être remise en cause.

Les tenants de la croissance économique perpétuelle proposent deux grandes catégories de stratégies pour pallier une limitation de ressources énergétiques. Et les plus optimistes pensent que ces deux stratégies seront spontanément mises en œuvre, par la magie de la *main invisible* du marché chère à Adam Smith, par suite de l'augmentation du prix de l'énergie en réponse aux restrictions d'approvisionnement.

La première idée, assez naturelle, consiste à chercher à utiliser l'énergie de manière toujours plus efficace, permettant ainsi à l'économie de poursuivre sa croissance malgré les contraintes sur les approvisionnements en énergie. Jusqu'où peut-on réduire la quantité d'énergie nécessaire pour produire une tonne d'acier, ou une tonne de ciment? Y a-t-il un minimum inévitable, une quantité d'énergie qui se retrouverait en quelque sorte incluse dans le produit, le reste ayant été perdu dans les différentes étapes du processus de production? Il faut examiner en détail la place de l'énergie dans l'économie, ce qu'est l'amélioration de l'efficacité énergétique ou de manière équivalente, la diminution de l'intensité énergétique du produit intérieur brut (PIB).

La deuxième idée, plus générique, consiste à faire en sorte que la croissance soit assurée par une économie qui n'aurait pas besoin d'énergie. Une économie 'traditionnelle' non croissante, voire décroissante, serait complétée par une nouvelle économie non consommatrice d'énergie. Dans cette catégorie on retrouve le concept de dématérialisation ou celui de qualité (croissance de la qualité plutôt que de la quantité). Dans ce dernier cas, il restera à déterminer ce qu'est réellement l'amélioration de la qualité et en quoi elle se distingue de la simple inflation. Au fond, ce qu'il convient d'analyser c'est le degré de souplesse de la structure de l'économie, à système sociopolitique constant. Il s'agit d'évaluer si une consommation très peu matérielle pourrait se substituer à une autre, beaucoup plus matérielle afin de pouvoir poursuivre la croissance économique sans ses conséquences négatives.

Les deux stratégies sont analysées dans cet article à la lumière des lois et des limitations de la physique, notamment du second principe de la thermodynamique. S'il s'avère que le paradigme de croissance économique indéfinie est illusoire, comme cela a déjà été soutenu il y a plus de quarante ans [Meadows 1972], la question de la paix sociale en l'absence de croissance économique restera cruellement posée.

2. L'efficacité énergétique

Produire, c'est mettre en œuvre de l'énergie pour transformer des matières premières (ou des produits intermédiaires) en produits finis (ou en produits intermédiaires). Économie et énergie sont donc intrinsèquement liées. Sans énergie, pas d'économie. Il existe pourtant une certaine marge de manœuvre consistant à mieux utiliser l'énergie pour effectuer une même transformation. Cependant, en comparaison des énormes progrès déjà réalisés dans le passé, les progrès futurs apparaîtront bien plus modestes. De plus, force est de constater que ces progrès passés n'ont jamais entraîné une diminution de la consommation globale d'énergie.

2.1. Lien entre économie et énergie

L'économie classique considère que toute production, toute transformation d'inputs en outputs, est essentiellement fonction de la combinaison de deux facteurs, le capital et le travail. Dans cette approche économique classique, l'énergie n'intervient pas directement, elle n'est qu'un input comme un autre, lui même produit par un autre secteur de l'économie. Ainsi,

le fonctionnement de l'économie est entièrement découplé des ressources naturelles puisque l'économie est sensée produire ses propres matières premières, issues du secteur minier par exemple. Dans la vision classique de la substituabilité, toute diminution d'un facteur de production (ou input) peut être compensée par l'augmentation d'un autre facteur (ou input). On en conclut naturellement que, en cas d'insuffisance, l'énergie pourrait être remplacée par autre chose, ce que dément la physique.

Il est vrai que l'univers est constitué de manière schématique d'énergie et de matière. Cependant, loin d'avoir un statut équivalent, l'énergie et la matière se complètent. L'énergie est l'élément physique qui anime la matière, la transforme, la met en mouvement. Tout changement d'état de la matière, toute transformation de la matière met en jeu de l'énergie. Pour couper, plier, chauffer, fondre, combiner chimiquement, soulever, accélérer, etc., c'est à dire pour effectuer toute transformation, il faut consommer de l'énergie. L'énergie mise en jeu est une mesure directe de l'ampleur de la transformation.

Pour une entreprise, produire des biens ou des services consiste à transformer certains inputs en outputs en leur ajoutant ainsi de la valeur. Il est logique que si aucune transformation n'est apportée aux inputs, pas même leur simple transport, il n'y a pas d'énergie consommée. Il n'y a également aucune valeur ajoutée et il sera délicat de revendre ce produit non transformé plus cher que son prix d'achat. La production étant une transformation, elle exige donc nécessairement de l'énergie et cette quantité d'énergie consommée, indispensable, reflète l'importance de la transformation réalisée. À l'imperfection d'efficacité énergétique près (voir section suivante), la valeur ajoutée réelle (corrigée de l'inflation) est simplement proportionnelle à l'énergie consommée. Sans énergie, pas de production. La (dé)croissance économique, mesurée par celle du PIB, et la (dé)croissance de la consommation de l'énergie vont donc de pair.

Pourquoi l'économie classique n'a-t-elle pas adopté ce point de vue de l'énergie au centre du processus de production ? Tout simplement parce que l'énergie primaire ne coûte rien, son prix est nul. Seuls comptent les coûts en capital et en travail qu'il faut consentir pour l'extraire de l'environnement. Au départ, l'état propriétaire de l'espace où se trouvent des ressources naturelles peut les consommer sans rien devoir à personne, sauf s'il a transféré tout ou partie de la propriété de cet espace à des personnes ou à des entreprises. La rente de Hotelling ne contredit pas cette idée, elle concerne un arbitrage par le propriétaire de la ressource entre son utilisation immédiate et son utilisation future. Tant que les contraintes sur les quantités de ressources énergétiques ne se faisaient pas réellement sentir, considérer que la production n'était déterminée (limitée) que par les quantités de capital et de travail ne posait que peu de difficulté. Mais une fois que la disponibilité de l'énergie a commencé à se restreindre, elle est apparue comme le carburant indispensable de l'économie, sans lequel capital et travail ne peuvent rien produire. Dans un contexte de restriction, c'est donc la contrainte sur l'énergie qui limite la production et, par conséquent le produit intérieur brut. Depuis des décennies, Robert Ayres et Benjamin Warr posent un regard pertinent sur cette question [Ayres 2009].

2.2. L'efficacité énergétique

Selon le point de vue économique, le débat sur le rapport entre énergie et économie s'exprime classiquement en termes d'efficacité énergétique et d'intensité énergétique du PIB. L'efficacité énergétique est mesurée par la quantité de valeur ajoutée (la contribution au PIB) qu'une unité d'énergie permet de produire. À l'inverse, l'intensité énergétique du PIB est la quantité d'énergie mise en œuvre par unité de PIB. Ainsi par exemple, si l'intensité énergétique pour la production d'acier est de 0,02 GJ/\$ (gigajoule d'énergie par dollar), l'efficacité énergétique, son inverse, est de 50 \$/GJ. Dans cette optique, pour que le PIB puisse croître exponentiellement (figure 1-a, courbe PIB) sans qu'il y ait besoin d'augmenter la consommation

d'énergie, le progrès technologique devrait permettre en parallèle une croissance exponentielle de l'efficacité énergétique ou, ce qui revient au même, une décroissance exponentielle de l'intensité énergétique. Chaque année, il faudrait par exemple 3% d'énergie en moins pour produire un bien ou service donné. On tendrait ainsi progressivement vers une production infinie sans aucune consommation d'énergie, ce qui est physiquement absurde.

Sans être nuls, les progrès réalisables sont assez limités. D'une part il existe dans tous les cas des limites physiques à la quantité minimale d'énergie nécessaire pour une production donnée, une tonne d'acier ou un kilowattheure d'électricité éolienne par exemple (figure 1-a, courbe efficacité énergétique). D'autre part, rentabilité oblige, les industriels ont réalisés des progrès considérables depuis un siècle qui ne laissent plus qu'un espace réduit pour les progrès futurs. Pour donner un exemple simple, si la quantité d'énergie pour produire un bien donné a été divisée par cinq depuis un siècle, il ne reste plus qu'une division par deux avant la limite physique qui, par essence, est inatteignable (figure 1-b). De plus, tous les progrès se font schématiquement à rendement décroissant, les progrès sont de plus en plus modestes tout en exigeant de plus en plus de temps et de travail de recherche.

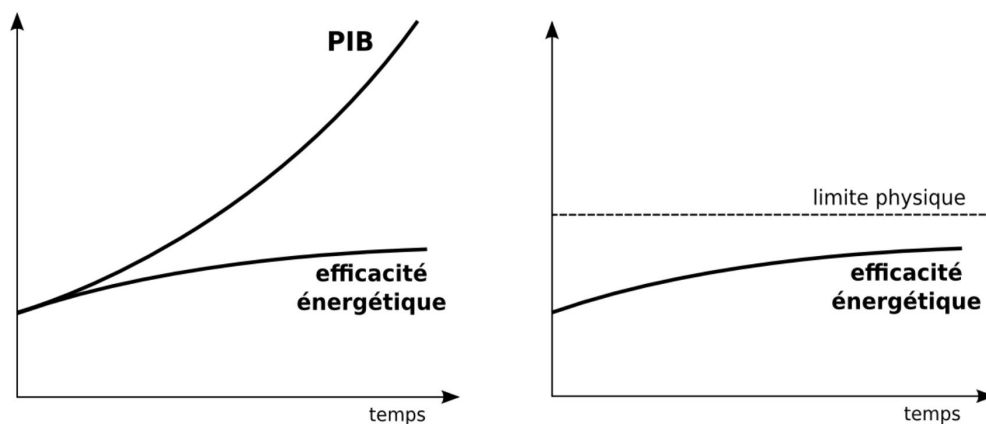


Figure 1: Evolution exponentielle du PIB et évolution asymptotique de l'efficacité énergétique (a, gauche) et comparaison de l'efficacité énergétique et de sa limite physique (b, droite).

Comme on peut le constater sur la figure 1-a, l'écart ne cesse de grandir au cours du temps entre une croissance économique exponentielle – habituellement considérée comme indispensable au fonctionnement harmonieux de nos sociétés – et l'augmentation asymptotique de l'efficacité énergétique. Jusqu'ici, c'est l'augmentation continue de la quantité globale d'énergie consommée qui a permis de combler cet écart grandissant. Cependant, dans une situation où la disponibilité d'énergie n'arriverait plus à croître, il n'y aurait plus moyen de combler cet écart et on assisterait à la fin du rêve dominant de toujours plus de production afin d'assurer un quasi plein emploi.

En résumé, le désaccord entre physique et économie porte sur le potentiel de progrès en matière d'efficacité énergétique (ou d'intensité énergétique). L'économie exige une croissance exponentielle de l'efficacité énergétique (c'est à dire avec des progrès croissants), la physique ne permet qu'une croissance asymptotique (c'est à dire avec des progrès décroissants).

Pour étayer les limites techniques à la décroissance de l'intensité énergétique, l'exemple du moteur à combustion interne est pertinent. Il est sans doute la machine thermique la plus populaire avec plusieurs centaines de millions d'exemplaires dans les voitures, les camions, les bateaux, etc. Les progrès semblent fulgurants ces dernières années avec des consommations au kilomètre qui diminuent constamment. Cette impression cache deux réalités importantes.

D'une part, le rendement des moteurs a fondamentalement peu progressé. D'autre part, les progrès à espérer sont bien plus faibles que ceux déjà acquis.

Les moteurs de bateaux illustrent très bien cette tendance. Dès 1912, le rendement thermique des moteurs (rapport entre énergie à l'arbre de l'hélice et l'énergie du carburant) atteignait 30%. Il s'agit là d'une mesure de l'efficacité économique de l'usage de l'énergie dans le transport maritime puisque ce rendement est une mesure du coût en énergie pour un service donné. Il peut *in fine* s'exprimer en \$/GJ. Aujourd'hui, le record s'établit à 54.4% précisément. Le gain a donc été de 24.4 points de rendement en un siècle, soit une consommation approximativement divisée par deux. Dans les prochaines décennies, l'objectif est d'atteindre 60% au prix du gigantisme des moteurs, tout comme celui des bateaux qui en sont équipés. En gardant le même rythme de croissance, ce qui est improbable, ce seuil ne sera atteint que vers 2040. La diminution de consommation associée sera cependant modeste, de l'ordre de 10%.

Concernant l'automobile, le premier moteur conçu par Diesel avait un rendement proche de 25%, fin du 19^{ème} siècle. Les voitures actuelles ont des moteurs Diesel ayant un rendement maximal un peu au delà de 40%. De nouveau, en considérant un rythme de croissance identique, les rendements resteront inférieurs à 50% en 2040. De nouveau le gain en intensité énergétique ne sera que de maximum 10% dans les décennies à venir.

Les moteurs sont un exemple emblématique mais sont loin d'être seuls à illustrer les développements qui ont déjà été réalisés et qui réduisent les marges de progrès dans le futur. Les éoliennes présentent également une même évolution. Le rendement est limité par le théorème de Betz qui dit qu'au maximum 60% (16/27) de l'énergie cinétique peut être récupérée par une éolienne. Aujourd'hui les meilleures éoliennes s'approchent d'un rendement nominal de 47%. Il est donc illusoire de vouloir doubler le rendement des éoliennes. Tout au plus, pourra-t-on espérer s'approcher de 55%, le gain marginal n'étant toujours que de 10% comme pour les moteurs.

Dans un tout autre domaine, les améliorations de l'efficacité dans le secteur de la production de ciment – production qui génère pas moins de 5 % des émissions mondiales de CO₂ – montrent un comportement analogue à celui illustré à la Figure 1-b, celui d'un progrès qui sature depuis bientôt 25 ans [Worrell 2008], voir figure 2.

La courbe du progrès technologique se présente donc comme une courbe croissante, s'approchant progressivement d'un maximum théorique qui ne pourra jamais être atteint (Figure 1-b et Figure 2). Son inverse, l'intensité énergétique est donc une exponentielle décroissante dont le seuil, qui représente le minimum d'énergie nécessaire pour réaliser une opération, n'est pas nul. Ce talon imposé par les lois de la physique est souvent négligé.

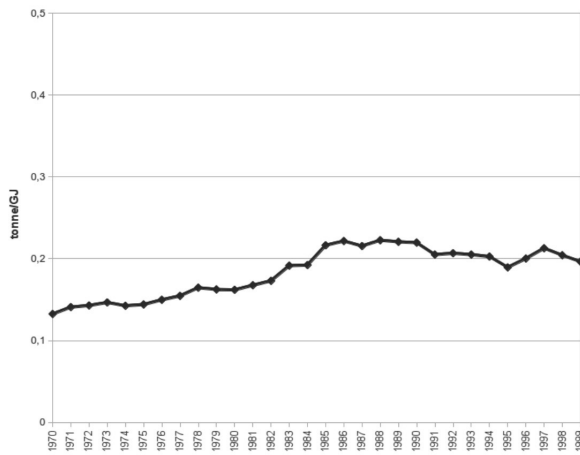


Figure 2 : Evolution temporelle de l'efficacité énergétique de la production du ciment exprimée en tonne de ciment par Gigajoule, adapté de Worrell [Worrell 2008].

La diminution de l'intensité énergétique ne permet pas à elle seule une croissance économique indéfinie à taux constant. Au contraire, les avancées déjà réalisées par la technique indiquent que les gains de ce type seront plutôt faibles dans le futur. Le découplage absolu (conjonction d'une croissance économique avec une décroissance de la consommation d'énergie) est donc impossible et un découplage relatif est une piste très limitée.

2.3. L'efficacité énergétique et la consommation d'énergie

Un autre constat historique vient également obscurcir le paysage de ceux qui prévoient qu'avec des équipements plus efficaces, la consommation d'énergie devrait spontanément se réduire. Ce constat est que les progrès réalisés dans le passé n'ont jamais coïncidé avec une diminution de la consommation d'énergie, globale ou *per capita*. Au contraire, ils ont toujours été concomitants avec une croissance de la consommation d'énergie. Cet effet bien connu, que ce soit sous le nom de paradoxe de Jevons, d'effet rebond ou de postulat de Khazzoom-Brookes, met en évidence le lien entre progrès technologique et croissance économique [Jenkins 2011]. Si le progrès permet une certaine diminution de la consommation d'énergie pour un bien ou service donné, cette économie est réinvestie avec profit dans une nouvelle croissance. C'est là un résultat de ce que Adam Smith a nommé la *main invisible* qui n'est que le résultat de la combinaison d'innombrables décisions individuelles, profitant du progrès pour réaliser de nouveaux projets. Si l'analyse économique contemporaine constate que la croissance stimule le progrès technique (croissance endogène), le progrès technique permet à son tour une nouvelle croissance (effet rebond). Et il en sera ainsi tant que des limites n'auront pas été rencontrées, que ce soient des limites choisies ou des limites subies, des limites exogènes ou des limites endogènes.

Une approche par un point de vue assez différent, partant du facteur travail, du productivisme et des gains de productivité, arrive au même constat de lien entre énergie et économie. Comme l'expose Jean Gadrey [Gadrey 2012], les gains de productivité sont la source majeure de la croissance économique des pays riches. En effet, ils permettent de produire une plus grande quantité de biens et de services avec la même force de travail. On notera au passage qu'un autre usage des gains de productivité aurait pu être la réduction du temps de travail. Gadrey précise plus loin que les fabuleux gains de productivité des Trente Glorieuses ont été fondés surtout sur une exploitation déraisonnable des ressources naturelles à commencer par les ressources énergétiques fossiles. Son raisonnement établit donc un lien très clair entre les ressources énergétiques et la croissance économique par le biais de la hausse

de la productivité. Et on pourrait faire un raisonnement assez analogue à partir du facteur de production qu'est le capital. Finalement, travail et capital sont des facteurs nécessaires à la mise en œuvre d'énergie pour effectuer la transformation de matières premières en produits finis. Chacun de ces trois facteurs est tout aussi indispensable à l'économie que les deux autres [Ayres 2009].

2.4. L'illusion de la décroissance de l'intensité énergétique

Les partisans du découplage absolu mettent régulièrement en avant la diminution de l'intensité énergétique constatée ces dernières décennies dans différents pays, principalement ceux les plus fortement développés. Ce constat est indéniable, l'intensité énergétique ayant été approximativement divisée par deux ces 50 dernières années dans les pays de l'OCDE [Wing 2008]. Il serait donc possible de s'affranchir partiellement de la contrainte entre économie et énergie.

Les causes de cette décroissance sont âprement discutées. En cause, la difficulté qu'il y a à décomposer la diminution de l'intensité énergétique en ses différents facteurs : progrès technologique, dont nous avons vu les limites ci-avant, spécialisation sectorielle ou sous-sectorielle, modifications dans le choix des matières premières ou des produits, etc.

La spécialisation sectorielle ou sous-sectorielle ouvre la possibilité pour un État de sélectionner les secteurs ou sous-secteurs les moins intensifs en énergie tout en externalisant les productions les plus énergétivores (et donc de les émissions de CO₂ associées [Davis 2010]). Développer le secteur des services (la finance par exemple) en cédant une partie de la production industrielle lourde (la sidérurgie par exemple) modifie à la baisse l'intensité énergétique nationale. De même, se concentrer sur la production électrique d'acier à partir de mitraille en remplacement de celle à partir de minerais de fer transformé en fonte dans un haut-fourneau (toutes deux aussi indispensables l'une que l'autre) permet de réduire sensiblement l'intensité énergétique du secteur sidérurgique national [Eichhammer 1997]. Dans les deux cas, il est évident qu'il faut en contrepartie qu'un autre État, le plus généralement parmi ceux en développement, se spécialise dans les secteurs et sous-secteurs les plus énergétivores. Ces spécialisations sont bien sûr sans effet sur l'intensité énergétique mondiale.

Le choix des matières premières peut aussi avoir une influence non négligeable sur l'intensité énergétique d'une industrie. Par exemple, la production d'électricité à partir du gaz est, à contenu énergétique équivalent, potentiellement plus efficace que celle à partir du charbon. Il n'en reste pas moins vrai que les ressources mondiales en gaz sont insuffisantes pour qu'il soit possible de simplement transformer toutes les centrales au charbon en centrales au gaz. D'ailleurs, on peut constater que la majorité des nouvelles centrales en construction aujourd'hui dans le monde sont des centrales au charbon. Cela s'explique essentiellement par sa plus grande disponibilité par rapport au gaz, malgré son moins bon rendement et ses effets plus négatifs sur le climat. D'autres exemples de substitutions de matières premières peuvent être cités tels celui de la production d'aluminium (Al) à partir d'alumine (Al₂O₃) importée plutôt qu'à partir de minerai de bauxite ou encore celui de la production de papier à partir de pulpe importée. Dans tous les cas, l'intensité énergétique diminue car la composition des inputs a été modifiée, en général grâce à l'importation de matières premières déjà pré-transformées ailleurs.

Dans la réalité, les nouveaux progrès en efficacité énergétique ne sont pas mis en œuvre simultanément dans toutes les entreprises d'un secteur donné. Ils s'étalent dans le temps. À un moment donné coexistent différents producteurs ayant chacun atteint un certain niveau d'efficacité par rapport au meilleur état de l'art dans ce domaine et à cet instant. Un rattrapage progressif se produit, avec parfois certaines périodes d'accélération comme celle qu'ont connue

récemment les ex-pays soviétiques qui ont rejoint l'Union européenne. Il y a donc là un réel gisement d'amélioration de l'efficacité énergétique, comme ne manquent pas de le souligner diverses études [IPCC 2011][Teske 2010]. Il faut cependant souligner ici trois dimensions souvent négligées par les méthodologies utilisées pour ces études.

Tout d'abord, ce phénomène de rattrapage technologique a existé de tout temps. Il ne s'agit pas là d'une idée nouvelle qui viendrait d'être découverte. Et force est de constater qu'il n'a jamais correspondu à une diminution de la consommation globale d'énergie, que du contraire. Le rattrapage technologique fait simplement partie du BAU (business as usual) et il est bien sûr l'objet du phénomène d'effet rebond évoqué ci-avant. Considérer les conséquences des progrès futurs tout en négligeant celles des progrès passés constitue à nos yeux une erreur méthodologique.

En deuxième lieu, le rattrapage technologique est un processus lent. Au même titre qu'il paraît irréaliste que toutes les habitations d'Europe deviennent passives dans 10 ans ou dans 30 ans, il est irréaliste que toutes les usines soient rapidement modernisées. De plus, l'obsolescence toujours plus rapide de l'outil industriel ne peut qu'être un facteur de croissance supplémentaire comme l'est aujourd'hui celle des équipements de télécommunication.

Enfin, calculer la consommation globale d'énergie en 2050 avec l'hypothèse que tous les équipements et outils de production soient alors presque parfaitement efficaces, volonté politique oblige, et en déduire que l'on peut ainsi découpler la croissance économique de celle de la consommation d'énergie n'est, si l'hypothèse est réaliste, que temporairement vrai. Une fois le rattrapage technologique effectué, le couplage habituel entre économie et énergie recommencera à faire dépendre la croissance économique de celle de la croissance de la consommation d'énergie. Généralement, les études prospectives s'arrêtent lorsque leur objectif d'efficacité énergétique optimale est atteint, souvent en 2030 ou 2050. La mise à niveau généralisée des processus de production ne peut constituer un moyen de découplage structurel entre économie et énergie et donc assurer une croissance structurelle de l'économie sans augmentation de la consommation d'énergie. Il s'agit tout au plus d'une stratégie conjoncturelle mais en aucun cas d'un nouveau paradigme, d'une nouvelle économie, affranchie de la contrainte énergétique.

3. Transformer l'économie

Poursuivre une croissance économique continue, sans disposer de quantités croissantes d'énergie et avec les modestes gains d'efficacité exposés ci-dessus, représente une véritable gageure. À défaut d'une réponse technique satisfaisante, il reste à examiner les possibilités de transformer l'économie elle-même. Peut-on améliorer le fonctionnement de l'économie sans devoir transformer la société ? Il s'agit pour cela d'analyser la structure de l'économie afin d'évaluer les possibilités de développement d'activités peu dépendantes de l'énergie et de restriction de celles qui le sont plus, de manière à assurer, au total, une croissance économique exponentielle indéfinie tout en restant dans une économie libérale guidée par la main invisible.

3.1. L'augmentation de la qualité des produits

Conscients de la finitude des ressources naturelles et de l'impact négatif de la production économique classique sur l'environnement, certaines propositions plaident pour le passage d'une économie de la quantité à une économie de la qualité. Ce ne serait ainsi plus la croissance des quantités produites qui assurerait la croissance du PIB mais bien celle de la qualité des produits et des services.

Ceci implique non seulement l'hypothèse assez naturelle que la qualité d'un produit ou service puisse toujours être augmentée, sans que la quantité des inputs nécessaires à sa production n'augmente, mais aussi celle, plus problématique, que cette hausse de la qualité s'exprime dans une hausse exponentielle du prix réel du produit ou service, permettant ainsi la hausse exponentielle du PIB. En d'autres termes, qu'à la hausse de qualité corresponde une hausse de la valeur économique réelle.

Pour atteindre cet objectif, il faut que la hausse de qualité ne consiste pas en une complexification du produit car cela impliquerait une plus grande consommation d'énergie, en raison du second principe de la thermodynamique. Il ne faut pas non plus qu'elle consiste à remplacer des matières premières courantes par des matières premières plus rares (limitées) [Bihoux 2010] car leur rareté entraverait la croissance. Seule l'augmentation de qualité sans augmentation ni de matières premières ni de complexité est compatible avec une consommation stable des ressources naturelles.

Cependant, si la production d'un bien ou d'un service de meilleure qualité n'exige pas une plus grande quantité d'inputs (matière et/ou énergie), ni des facteurs de production (capital et/ou travail), pourquoi le prix de ce bien (à l'équilibre du marché) devrait-il croître ? En situation de concurrence suffisante et une fois amortis les coûts de recherche et développement, le prix du produit ou service devrait se situer au niveau du coût marginal de production, c'est-à-dire au coût des inputs et des facteurs de production. Dans un marché concurrentiel, une hausse de qualité pure ne devrait donc pas s'accompagner d'une hausse durable du prix réel (hors inflation). C'est d'ailleurs ce que l'on constate actuellement dans le secteur innovant par excellence, celui des technologies de l'information et de la communication (TIC).

Si donc la hausse de qualité ne correspond pas à une hausse de quantité, comment peut-on l'évaluer ou la mesurer ? Plutôt que de qualité, les économistes parlent de l'utilité d'un produit ou service et considèrent que celle-ci peut être mesurée par le prix que le marché attribue au produit ou service. Mais alors se pose la question de séparer dans les variations de prix ce qui correspond à un changement de valeur réelle de ce qui n'est que de l'inflation. Dans la pratique, déterminer la valeur économique réelle (hors inflation) d'un produit ou service représente un véritable défi pour les statisticiens.

Faire la distinction entre croissance économique et inflation (ou déflateur du PIB) a toujours été un problème particulièrement délicat [Triplet 2004]. Comment évaluer la qualité d'un nouveau produit plus cher qu'un autre du même type, voire un produit d'un type entièrement nouveau ? La plupart des méthodes statistiques préconisent, si les différences ne sont pas trop faibles, de considérer que la différence de prix entre deux produits de même type mais de qualités différentes reflète bien une différence de valeur réelle et ne correspond donc pas à de l'inflation.

Pour beaucoup de produits dont la qualité varie peu ou lentement (une pomme, un crayon, etc.) cette méthode est considérée comme satisfaisante. Par contre, pour des produits en évolution technologique rapide (les TIC par exemple) beaucoup d'organismes statistiques utilisent aujourd'hui un autre outil : les fonctions hédoniques. Ce sont des fonctions mathématiques qui permettent de déterminer le prix théorique d'un produit en fonction de ses caractéristiques, communiquées par le fabricant : vitesse, puissance, fonctions diverses, etc. Ce prix théorique représente la valeur réelle du produit et la différence entre ce prix théorique et le prix effectif représente l'inflation. L'usage par les statisticiens de fonctions hédoniques pour évaluer la qualité des nouveaux produits met bien en évidence le sens qu'il faut donner au mot qualité lorsque l'on parle de croissance économique. Il s'agit bien ici d'une augmentation de certaines grandeurs physiques qui correspond généralement à de plus grandes quantités et/ou à une plus grande complexité.

Il apparaît donc justifié de considérer que la hausse exponentielle du PIB ne peut être entretenue que par une hausse de qualité du produit final liée à une augmentation exponentielle des quantités d'énergie ou de matières premières utilisées pour la production du produit.

3.2. La dématérialisation

Une autre proposition courante envisage de remplacer une partie croissante de la production matérielle par de la production immatérielle afin de pouvoir maintenir la croissance économique exponentielle sans qu'il y ait croissance de la consommation matérielle. Il s'agit de rendre les biens et services virtuels évitant de ce fait une consommation d'énergie associée à la production (transformation) de biens réels. Si l'on entend régulièrement parler du concept de dématérialisation dans les discours tournant autour du développement durable, la mise en œuvre pratique de ce concept semble ne trouver à s'appliquer que dans le seul domaine du remplacement des documents papier par des documents électroniques. Le développement des technologies de l'information et de la communication semble ainsi être une piste prometteuse et exemplative de la dématérialisation. La généralisation de l'utilisation de l'informatique devrait mener à une économie basée sur une réalité virtuelle peu consommatrice d'énergie. Plus d'internet, plus de stockage en ligne, etc. impliquent moins de papier et donc une consommation d'énergie et de matière moindre pour un service équivalent.

Cependant cette hypothèse d'une dématérialisation de l'économie n'est pas confirmée par les faits. En même temps que les TIC se développaient, la consommation de papier a crû plus vite que le PIB. Entre 1991 et 2004, le PIB européen a crû de 25% tandis que la consommation de papier a crû de 40% [Empirica 2006]. Sans que l'on puisse établir un lien de cause à effet, il se pourrait que l'accès à beaucoup plus d'information entraîne qu'une plus grande quantité d'information se retrouve sur du papier. Il n'y aurait donc pas de découplage absolu entre quantité d'information électronique et quantité d'information papier.

La dématérialisation de l'information reste donc actuellement un concept largement hypothétique. De plus, loin d'être neutre énergétiquement, les TIC nécessitent de nombreuses infrastructures et consomment beaucoup d'énergie électrique. Tous les équipements liés à l'information et à la communication ont consommé 8% de l'électricité mondiale en 2007 [Pickavet 2008], soit 2.6% de la consommation énergétique primaire mondiale. On est loin d'une dématérialisation réelle de l'économie qui reste un mythe actuellement.

Bien que cet exemple ne puisse avoir force de loi physique, il reste interpellant car autant il est simple de rendre virtuel un livre ou une facture, autant il est complexe de faire de même avec une habitation, un véhicule ou des vêtements sans affecter la structure de l'économie.

3.3. Structure de l'économie

En dehors de l'examen de stratégies particulières comme celles de l'*économie de la qualité* ou de la *dématérialisation*, la transformation de l'économie peut être envisagée plus globalement par une analyse sectorielle. Poursuivre la croissance économique avec moins d'énergie serait-il possible en passant à une nouvelle économie, moins matérielle, moins énergétique ? Sous cette proposition se retrouve posée la question de la structure de l'économie. Un système économique est composé de multiples secteurs et sous-secteurs dont l'activité collective permet de fournir l'ensemble des biens et services consommés par les êtres humains. Que l'on songe par exemple aux multiples réseaux qui nous permettent de nous déplacer en voiture, train (toujours plus rapides) ou avion, de transporter tout ce que nous acquérons. Que l'on songe aux réseaux qui nous alimentent en eau ou en électricité, à ceux qui nous permettent de communiquer, de correspondre et de nous informer, par ondes, câbles ou fibres. Ces réseaux eux mêmes n'existent que grâce aux produits des industries des

métaux (la sidérurgie par exemple) et de celles des minerais non-métalliques, industries qui elles-mêmes dépendent des industries extractives (mines, puits). Que l'on songe au secteur de la santé, aux hôpitaux, aux véhicules de secours aux appareils d'imagerie médicale, tous dépendant à leur tour d'autres secteurs de l'économie. C'est probablement dans le secteur de l'alimentation humaine qu'il est le plus facile d'imaginer des modifications structurelles.

La question qui se pose est de savoir dans quelle mesure la structure de l'économie peut être modifiée, si elle est plutôt rigide ou plutôt souple. Peut-on assurer une croissance économique tout en consommant moins d'énergie par le développement des secteurs économiques peu intensifs en énergie et par la réduction de taille – absolue et pas seulement relative – des secteurs les plus intensifs? Est-ce que la consommation humaine peut continuer à se développer dans une économie en croissance tout en consommant moins de matière et d'énergie? Le proverbe dit *Qui dort dîne*. Mais peut-on réellement remplacer de la nourriture par du sommeil et dans quelle mesure? Les deux besoins ne sont-ils pas l'un et l'autre indispensables?

Pour la théorie économique, il s'agit d'un problème de substitution. Peut-on remplacer une consommation de biens intensifs en énergie par une consommation jugée tout aussi utile de biens ou de services peu consommateurs d'énergie. Assurer simultanément la croissance économique et la décroissance de la consommation d'énergie? Certaines fonctions dans la théorie économique envisagent que la substitution soit toujours possible entre deux produits différents. C'est le cas de la fonction de Cobb-Douglas, très utilisée en économie (figure 3-a). Avec une fonction de ce type, il est toujours possible de remplacer un produit qui viendrait à faire défaut par un autre produit, fut-ce en quantité très importante, tout en conservant la même utilité globale. À l'opposé, la fonction de Leontieff n'offre aucune possibilité de substitution, aucun supplément d'un produit ne peut compenser un manque de l'autre produit, chacun des deux est indispensable (figure 3-b).

Dans la réalité, on peut penser qu'une certaine marge de manœuvre existe dans le voisinage de l'état d'équilibre actuel mais que cette marge est rapidement limitée (figure 3-c) [Ayres 2009]. Pratiquement toute activité économique qui contribue au PIB exige des bâtiments, des infrastructures, des réseaux, des équipements et des machines. Ceux-ci, à leur tour, exigent des matériaux de base, aciers, métaux et non-métaux ainsi que de l'énergie pour les transformer. Dans la réalité, le développement de l'activité humaine ne saurait se passer ni du développement des réseaux de communication ni de ceux de l'énergie (en particulier de l'énergie électrique), entraînant ainsi tous les secteurs de l'économie. Que ce soit la route, le rail, Internet ou la téléphonie, il en a toujours été ainsi. Affecter un secteur, en le réduisant par exemple, nécessite de revisiter l'ensemble des autres secteurs et donc la structure de l'économie et plus largement celle de nos sociétés.

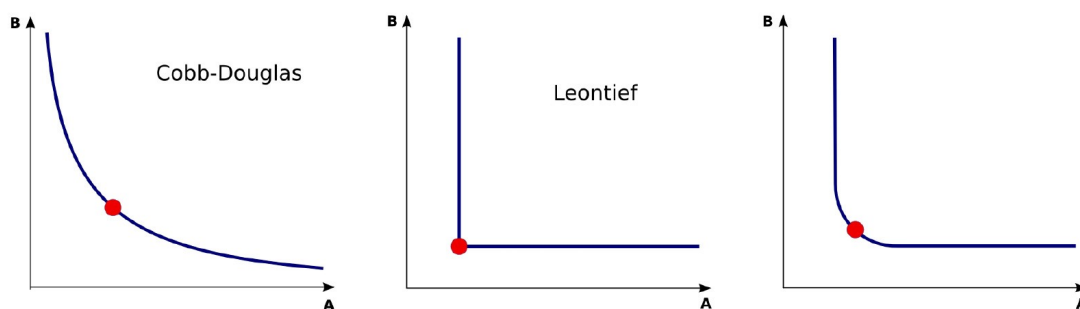


Figure 3 : Illustration de la substitution d'un produit ou service par un autre, à utilité équivalente : (a – gauche) substitution classique, (b – milieu) substitution impossible, (c – droite) substitution limitée.

4. Conclusions

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons tenté de développer les arguments qui établissent que ni des transformations technologiques ni des transformations structurelles de l'économie ne permettront de poursuivre sur le chemin de la croissance économique. C'est bien à une transformation du fonctionnement global de la société qu'il faut s'attendre, de gré ou de force, même si les voies que cette transformation empruntera n'apparaissent pas encore clairement.

L'interrogation qui sous-tend tout cet article porte sur l'adéquation de l'économie capitaliste et libérale avec les contraintes physiques planétaires [Lebeau 2008], avec une poursuite non catastrophique de l'histoire de l'humanité. Il s'agit moins ici d'une interrogation idéologique que d'un questionnement physique sur la compatibilité entre les activités humaines et les limites de la biosphère.

L'économie est capitaliste dans la mesure où elle tolère ou encourage l'accumulation de biens. Depuis le 18^{ème} siècle, les sociétés occidentales sont passées d'une économie de subsistance à une économie d'accumulation, le tabou de la chrématistique ayant été levé par les lumières [Cassiers 2011]. L'économie est libérale en ce sens qu'elle place la liberté individuelle avant le projet collectif, misant avant tout sur le succès de la *main invisible*. Même en l'absence de considérations idéologiques, chacun de ces deux modes de fonctionnement pose un problème de compatibilité avec les limites de la planète.

Le double constat, de plus en plus évident, que les ressources énergétiques mondiales ne sauraient plus croître [Jancovici 2011] et que le couplage entre économie et énergie est physiquement incontournable [Ayres 2009] nous permet d'anticiper un avenir dans lequel la croissance économique ne sera même plus une option. L'évolution de l'économie mondiale commence à montrer la justesse du raisonnement des auteurs des limites de la croissance [Meadows 1972]. Et si la croissance économique a jusqu'ici permis à une bonne partie de l'humanité de subvenir à ses besoins, en permettant une situation de quasi plein emploi, ce ne sera probablement plus le cas à l'avenir. D'autres modes de répartition du travail, des biens et des ressources naturelles doivent encore être imaginés. Quels sont les modes de gouvernement des sociétés qui permettent à chaque être humain d'obtenir dignement un revenu décent, et de subvenir ainsi à ses besoins, dans un contexte de stagnation (de réduction?) de la production et de la consommation?

Pour terminer, il faut ajouter et souligner que les réflexions contenues dans cet article ne doivent pas être isolées de la réflexion globale, interdisciplinaire, mais doivent bien participer au débat général. La réflexion philosophique, celle sur les valeurs, est tout à fait naturelle, légitime et nécessaire car elle s'interroge sur la finalité de toute activité humaine. La littérature sur cette très vaste question est d'ailleurs abondante, tant en sociologie qu'en philosophie [Jonas 1979] [Hösle 1991].

Bibliographie

- [Ayres 2009] Robert U. Ayres & Benjamin Warr, *The Economic Growth Engine - How Energy and Work Drive Material Prosperity*, 2005.
- [Bihouix 2010] Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *Quel futur pour les métaux ?*, 2010.
- [Cassiers 2011] Isabelle Cassiers et al., *Redéfinir la prospérité*, 2011.
- [Davis 2010] Steven J. Davis and Ken Caldeira ; Consumption-based accounting of CO₂ emissions ;PNAS March 23, 2010 vol. 107 no. 12 5687-5692.
- [Eichhammer 1997] W. Eichhammer and W. Mannsbart; Industrial energy efficiency – Indicators for a European cross-country comparison of energy efficiency in the manufacturing industry; *Energy Policy*, Vol. 25, Nos 7-9, pp. 759-772, 1997.
- [Empirica 2006] Empirica, *ICT and e-business in the pulp, paper and paper products industry, e-business watch Sector Report No. 3*, European Union 2006.
- [Gadrey 2012] Jean Gadrey, *Adieu à la croissance*, 2012.
- [Hösle 1991] Vittorio Hösle, *Philosophie de la crise écologique*, 2011.
- [IPCC 2011] IPCC, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2011.
- [Jancovici 2011] Jean-Marc Jancovici, *Changer le Monde – Tout un programme !*, 2011.
- [Jancovici 2012] Jean-Marc Jancovici, *Qu'est-ce que l'énergie, exactement ?*, 2012, <http://www.manicore.com/documentation/energie.html>.
- [Jenkins 2011] Jesse Jenkins, Ted Nordhaus and Michael Schellenberger, *Rebound & backfire: a review of the litterature*, 2011.
- [Jonas 1979] Hans Jonas, *Le Principe de Responsabilité*, 2008.
- [Lebeau 2008] André Lebeau, *L'enfermement planétaire*, 2008.
- [Meadows 1972] D.H. Meadows, J. Randers, D.L. Meadows, W.W. Behrens, *The Limits to Growth*, 1972.
- [Pickavet 2008] M. Pickavet et al., Department of Information Technology (INTEC) of Ghent University; *Worldwide Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking* ; IEEE ANTS 2008 conf., 15-17 December 2008, Bombay (India).
- [Teske 2010] Sven Teske et al., *Energy [r]evolution. Towards a fully renewable energy supply in the EU 27, EREC – Greenpeace*, 2010.
- [Triplett 2004] Jack E. Triplett, *Handbook on Hedonic Indexes and Quality Adjustments in Price Indexes: Special Application to Information Technology Products*, 2004.
- [Wing 2008] Ian Sue Wing; Explaining the declining energy intensity of the U.S. Economy; *ressource and energy economics*, 30 (2008) 21-49.
- [Worrell 2008] Ernst Worrell and Christina Galitsky ; *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making ; An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*, March 2008.