

## **LIMITES ENERGETIQUES A LA CROISSANCE ECONOMIQUE**

**Jean-François Fagnart (CEREC, Université Saint-Louis, Bruxelles et IRES, UCLouvain)**

**Marc Germain (LEM-CNRS (UMR9221), Université de Lille 3 et IRES, UCLouvain)**

### **Résumé**

Après avoir survolé quelques observations empiriques qui montrent qu'il n'y a pas (eu), au niveau mondial, de croissance économique sans croissance de la consommation d'énergie, nous étudions les implications macroéconomiques d'une transition énergétique caractérisée par le recours à des énergies non renouvelables moins facilement exploitables et par un glissement vers des formes d'énergie renouvelable dont le rendement énergétique est inférieur à ce qui a été historiquement obtenu des énergies fossiles. Nous montrons pourquoi dans une telle transition (qui fait que la production d'énergie secondaire devient plus consommatrice d'énergie), les obstacles à la croissance économique se multiplient. 1) Pour un même niveau d'efficacité dans l'utilisation finale de l'énergie, la transition augmente la quantité d'énergie nécessaire à la création d'une unité de valeur ajoutée; 2) Les progrès technologiques purs se traduisent moins nettement en gains de productivité (mesurés en unités de valeur ajoutée) et sont donc moins porteurs de prospérité. 3) La transition augmente le niveau de capital dont l'économie a besoin pour atteindre un niveau donné de PIB mais ralentit simultanément l'accumulation du capital à taux d'épargne inchangé.

## INTRODUCTION

Après avoir survolé quelques observations empiriques qui montrent qu'il n'y a pas (eu) de croissance économique sans croissance de la consommation d'énergie, cet article s'intéresse aux implications macroéconomiques d'une transition énergétique caractérisée par le recours à des énergies non renouvelables moins facilement exploitables et par un glissement vers des formes d'énergie renouvelable. Nous expliquons pourquoi la seule question énergétique fait qu'à terme, l'économie mondiale dans son ensemble ne peut guère espérer mieux que la stagnation séculaire. Pour des raisons physiques, il ne sera possible ni d'obtenir du progrès technique des gains d'efficacité énergétique illimité, ni de toujours faire croître notre consommation d'énergie. La question de la disponibilité de l'énergie n'est toutefois pas tant une question de rareté physique qu'une question de rareté économique: à l'évidence, diverses sources d'énergie primaire non-renouvelables restent aujourd'hui abondantes et diverses ressources renouvelables sont largement sous-utilisées ; mais la mesure dans laquelle ces ressources peuvent contribuer à la croissance économique dépend crucialement de la facilité avec laquelle l'homme pourra les transformer en une forme d'énergie secondaire mobilisable dans les activités productives.

Aujourd'hui déjà, les conditions dans lesquelles l'homme est capable de produire un volume toujours plus grand d'énergie (ingrédient nécessaire à la croissance économique) se compliquent et cela, indépendamment même de toute considération liée aux dégradations environnementales qui découlent de la consommation des énergies fossiles. D'un côté, les ressources énergétiques non renouvelables de la meilleure qualité (celles dont la densité énergétique est la plus élevée et l'exploitation la plus aisée et donc la moins coûteuse) s'épuisent progressivement et la prospection et l'exploitation de nouvelles ressources (éventuellement non-conventionnelles comme les gaz et pétrole de schiste) s'accompagnent d'une baisse du rendement énergétique global de leur exploitation.<sup>1</sup> D'autre part, l'exploitation de formes d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien ne semble pas pouvoir offrir des rendements énergétiques aussi élevés que celui des énergies fossiles conventionnelles. En d'autres termes, il semble inévitable que la transition énergétique en marche (le recours à des énergies non renouvelables non-conventionnelles et le glissement vers des formes d'énergie renouvelable) s'accompagne d'une baisse du rendement énergétique qu'offre globalement la production d'énergie.

---

<sup>1</sup> Par rendement énergétique (ou EROEI pour Energy Return On Energy Invested en anglais), nous entendons le ratio entre la quantité d'énergie délivrée par un processus de production d'énergie et la quantité d'énergie que ce processus a directement ou indirectement consommée. Cette consommation indirecte d'énergie est celle qui a été nécessaire pour la réalisation des équipements et infrastructure utilisés dans ce processus productif et par la production et le transport des consommations intermédiaires qui lui sont nécessaires.

On comprend aisément que le rendement du mode de production d'énergie d'une société soit un vecteur de sa prospérité: des économies qui ont accès à des modes de production d'énergie à haut rendement peuvent allouer relativement plus de capital et plus de travail à d'autres activités que la production d'énergie. Elles ont ainsi un plus grand potentiel d'expansion économique et/ou de diversification. A l'inverse, la transition vers des modes de production d'énergie à rendement plus faible réclame de consacrer relativement plus de ressources à la production d'énergie et vient contraindre le processus d'expansion économique.

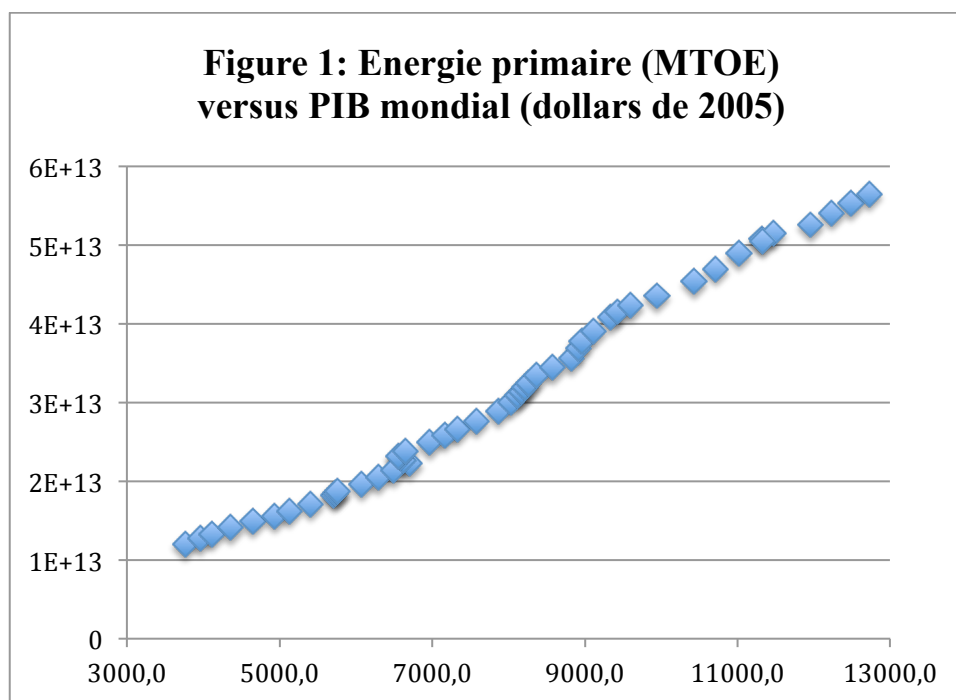
Diverses contributions montrent le rôle essentiel mais sous-estimé par l'économie néoclassique- que l'énergie joue dans la croissance économique. On citera notamment Ayres et Warr (2009), Stern (2011), Ayres *et alii* (2013). Dans ce court article, nous montrons comment et pourquoi la transition énergétique affecte l'intensité en énergie de la production finale (ou encore l'efficacité énergétique) quelque soit les perspectives de progrès technique et, partant, les gains de productivité des autres facteurs. Une telle transition intensifie les besoins en capital de l'économie (tant dans les secteurs de la production finale que dans le secteur énergétique). Elle impacte ainsi tant le rythme d'accumulation du capital que le taux de croissance de l'économie à taux d'épargne inchangé.

Même si l'existence de limites environnementales à la croissance dépasse évidemment la seule question de l'énergie, nous n'aborderons que celle-ci. Nous délaisserons la problématique des dégradations environnementales et celle de l'exploitation (et du recyclage) d'autres ressources non-renouvelables essentielles comme les métaux. Notons toutefois avec Bihouix (2014) qu'il existe une sorte de circularité entre les tensions qui existent sur les ressources énergétiques et non énergétiques. Comme les ressources énergétiques fossiles, les métaux restent probablement très abondants sous terre mais leur condition d'accessibilité et la qualité des ressources extraites se dégradent. Il faut alors plus d'énergie pour extraire des métaux plus difficiles d'accès et moins concentrés. Il faut simultanément plus de métaux pour construire les infrastructures nécessaires à l'exploitation des ressources énergétiques moins accessibles et moins conventionnelles ou pour développer celles nécessaires à l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables. On entrevoit dès lors qu'aborder la question des ressources non énergétiques n'embellirait pas le portrait que nous allons dresser.

## 1. PIB ET ENERGIE, UN LIEN TRES ETROIT: QUELQUES FAITS

Les faits attestent que la croissance économique est consommatrice d'énergie: l'énergie étant nécessaire à toute opération de transformation (et donc à toute opération de création de valeur ajoutée), la hausse de l'activité économique réelle au cours du temps s'est accompagnée inexorablement d'une hausse de la consommation d'énergie primaire (en millions de tonnes équivalent pétrole ou MTOE), comme l'illustre

au niveau mondial la Figure 1 ci-dessous pour la période 1965 (point le plus en bas à gauche) à 2013 (point le plus en haut à droite).<sup>2</sup>



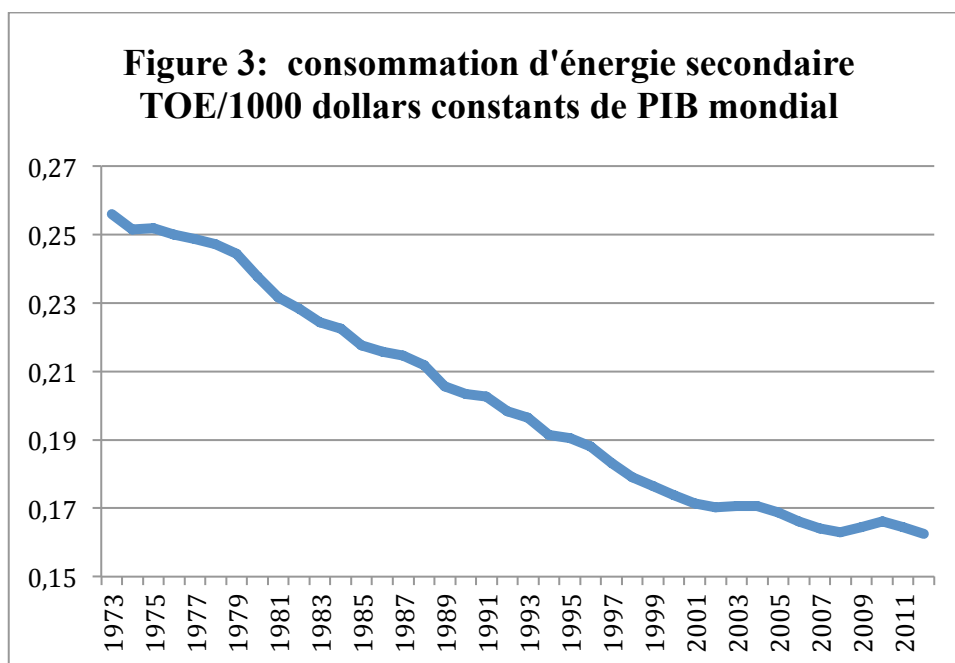
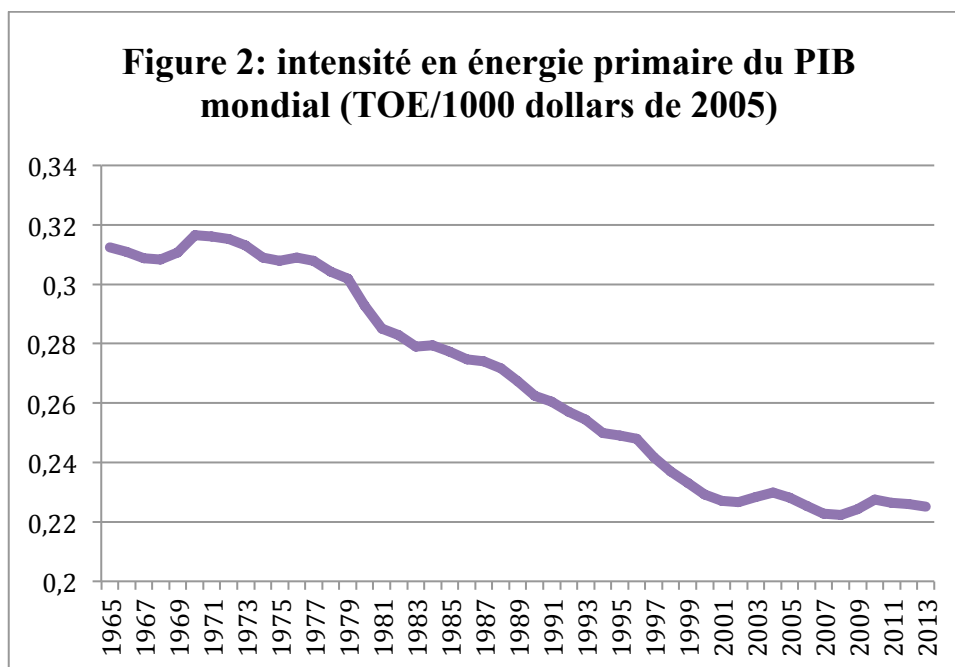
Un examen purement visuel de ce graphique pourrait faire croire à une relation quasi linéaire entre les deux variables. Toutefois, dans la foulée des efforts d'économie d'énergie qui suivent le premier choc pétrolier de 1974, la dépendance de l'activité économique mondiale envers l'énergie s'est réduite jusqu'à l'aube du troisième millénaire. La Figure 2 qui utilise les mêmes chiffres que la Figure 1 montre en effet une réduction assez régulière de l'intensité en énergie primaire d'une unité de PIB mondial de 1974 à 2000. Ces gains d'efficacité énergétique ont cependant marqué le pas depuis l'entrée dans le nouveau millénaire: entre 2000 et 2013, il n'y a plus eu, au niveau mondial, de gain d'efficacité énergétique significatif. Cette tendance récente suggérerait presque un nouveau paradoxe de productivité appliqué à l'énergie: malgré une certaine dématérialisation de l'économie, malgré la poursuite d'innovations technologiques dans le domaine des économies d'énergie, malgré l'adoption de technologies plus efficaces, notamment dans les pays émergents, la productivité de l'énergie primaire mesurée en unités de PIB mondial créées ne s'est plus significativement améliorée depuis l'an 2000.

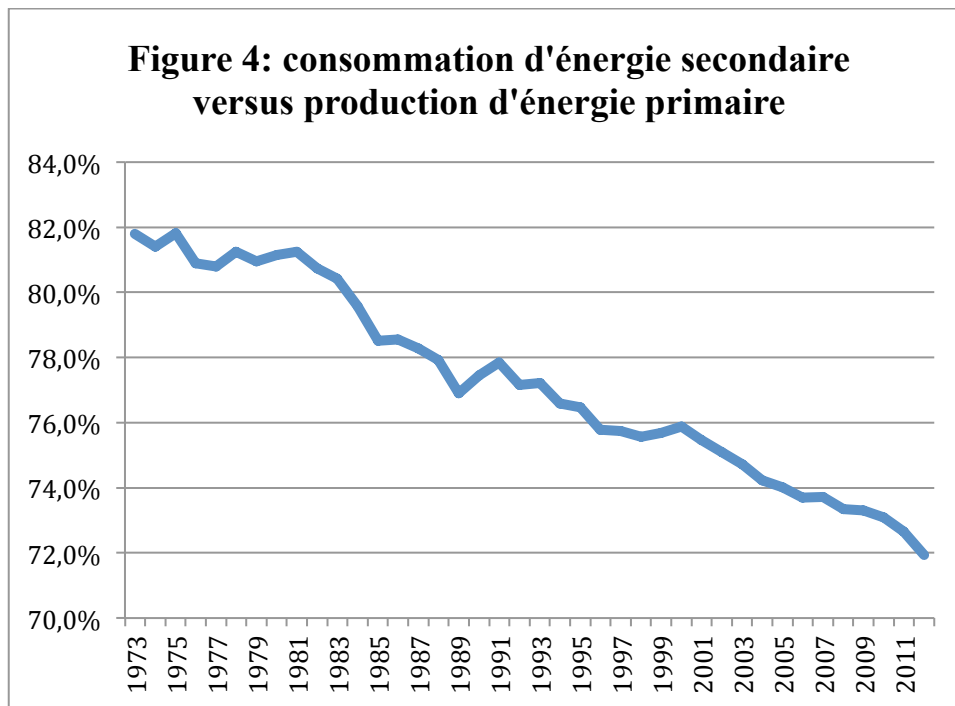
L'évolution de l'intensité d'une unité de PIB mondial en énergie secondaire (c'est-à-dire directement utilisable dans la production non énergétique ou pour un emploi final) montre néanmoins que des gains d'efficacité dans l'utilisation de l'énergie secondaire ont bien continué après 2000 au niveau mondial, mais à un rythme plus lent que durant les deux décennies antérieures (voir Figure 3, source pour l'énergie secondaire: International Energy Agency, World Energy Outlook). Ceci veut aussi dire que la quantité

---

<sup>2</sup> Sources: Banque Mondiale pour le PIB mondial et British Petroleum Statistical Review of World Energy pour l'énergie primaire.

d'énergie primaire qu'il a fallu extraire ou capter pour produire un même volume d'énergie secondaire utile à nos activités économiques (autres que la production d'énergie) a augmenté pendant la même période. De fait, il en va tendancielllement ainsi depuis au moins 30 ans (Figure 4) et la tendance s'est accélérée ces dernières années. Ce dernier constat traduit notamment que la production d'énergie secondaire est de plus en plus consommatrice d'énergie.





## 2. LIMITES ENERGETIQUES A LA CROISSANCE ECONOMIQUE

### 2.1 Quelques idées simples à propos du (très ?) long terme

Nous admettrons -mais seul un économiste de mauvaise foi pourrait contester ce postulat- que l'énergie est un facteur de production essentiel à la création de valeur ajoutée (essentiel au sens où l'entend la littérature: sans énergie la production est nulle quelles que soient les quantités engagées des autres facteurs).<sup>3</sup> Pour faire simple, nous ferons comme si toutes les formes d'énergie utiles à l'activité économique étaient des substituts parfaits les uns des autres dans les opérations de production finale, ce qui est une hypothèse beaucoup trop optimiste mais évite les complications qu'impliquerait l'analyse d'une substitution limitée.

Appelons  $E$  la quantité d'énergie utilisée et  $Y$  le PIB réel obtenu. On peut évidemment toujours écrire (en omettant les indices de temps pour la simplicité des notations):

$$Y = x \cdot E \quad \text{avec} \quad x = \frac{Y}{E}$$

où  $x$  est donc la productivité moyenne de l'énergie (l'efficacité énergétique) ou encore l'inverse de l'intensité moyenne en énergie d'une unité de PIB. Bien que tautologique, cette décomposition souligne que la poursuite de la croissance économique réclame soit toujours plus d'énergie à  $x$  donné, soit toujours plus d'efficacité énergétique à volume d'énergie  $E$  donné.

<sup>3</sup> Cette formulation est une sorte d'oxymore puisque sans énergie, l'idée même qu'on puisse mobiliser d'autres facteurs de production n'a en fait aucun sens.

Les lois de la thermodynamique nous apprennent que les gains d'efficacité énergétique qui peuvent être attendus des innovations et du progrès technologique sont inévitablement bornés supérieurement: il est physiquement impossible que  $x$  tende vers l'infini. Autrement dit, même si l'intensité en énergie des productions humaines (l'inverse de  $x$ ) peut se réduire dans le temps, notamment sous l'effet du progrès technique, elle ne peut pas tendre vers zéro: une unité de valeur ajoutée ne peut pas être totalement "dés-énergisée".<sup>4 5</sup>

La productivité  $x$  de l'énergie étant bornée supérieurement, le seul espoir d'une croissance perpétuelle repose donc sur l'utopie d'un accès illimité à l'énergie. Mais si l'on reconnaît que tant  $x$  et  $E$  sont des nombres finis, on renonce simultanément au rêve d'une croissance économique sans limite. A long terme, l'homme ne pourrait donc espérer mieux qu'une stagnation économique séculaire, la croissance économique observée depuis quelques siècles n'étant qu'un épisode transitoire permis par un accès croissant (mais temporaire) à des sources d'énergie abondantes et aisées à exploiter et, accessoirement, par des gains d'efficacité énergétique.

En tant qu'économistes, nous avons peu à dire sur l'ampleur des gains d'efficacité énergétique que le progrès technique rendra encore possible à l'avenir. Il n'est pas non plus aisé de se prononcer sur la valeur limite du  $E$  sur lequel l'humanité pourrait compter. A fortiori, il n'est donc pas simple d'indiquer l'échelle de temps au delà de laquelle la croissance économique cesserait. Un tel exercice (qui relève de la prospective et ne pourrait s'envisager sans la contribution d'énergéticiens) n'est donc pas l'objet du présent article. Nous chercherons seulement à préciser la nature des contraintes que la transition énergétique peut dès maintenant faire peser sur nos économies et leur croissance.

## 2.2 Quelques réflexions sur le plus court terme : quels impacts macro-économiques de la transition énergétique ?

La discussion ci-dessus peut laisser penser que l'évolution de  $x$  dans le temps résulte surtout de l'effet du progrès technologique. Les choses sont moins simples: les conditions dans lesquelles l'énergie secondaire

---

<sup>4</sup> On trouvera notamment chez Anderson (1987) et Baumgärtner (2004) une démonstration que les fonctions de production qui rendent possible une productivité illimitée d'une ressource comme l'énergie violent les lois de la physique.

<sup>5</sup> On pourrait vouloir distinguer ici les dimensions quantitative et qualitative de la croissance: la croissance économique ne prend pas seulement la forme d'un accroissement des quantités produites mais aussi de l'apparition de nouveaux produits/services et de l'amélioration de la qualité des produits/services. Mais Fagnart-Germain (2015a) montre que les conditions de la poursuite d'une croissance purement qualitative ne sont pas fondamentalement moins exigeantes que celle d'une croissance quantitative.

est produite affectent aussi l'efficacité énergétique au niveau macroéconomique, et, partant, la productivité des autres facteurs. La transition énergétique en marche apporte ici son lot d'inquiétudes.

Produire de l'énergie secondaire réclame directement ou indirectement de l'énergie. En effet, prospector les sources d'énergie primaires, les capter (d'une manière ou d'une autre selon leur nature), les transformer en énergie secondaire utile et transporter celle-ci jusqu'à son point d'usage sont des activités consommatrices d'énergie. Directement parce le fonctionnement des outils de prospection, de captation et de transformation de l'énergie primaire (en énergie secondaire) consomme de l'énergie. Indirectement aussi (et souvent surtout) parce que la fabrication de ces équipements de prospection, de captation, de transformation et la réalisation des infrastructures de transport de l'énergie ont aussi réclamé de l'énergie. Tous ces équipements indispensables à la production et à la distribution d'énergie secondaire ont donc un contenu énergétique (parfois appelé énergie grise). Enfin, les activités de gestion et maintenance de tous ces équipements et infrastructures sont elles-mêmes consommatrices d'énergie.

Lorsque produire un certain volume d'énergie secondaire devient plus consommateur d'énergie, ce même volume d'énergie crée aussi moins de valeur ajoutée comme nous allons le voir, ce qui augmente encore la quantité d'énergie dont l'économie a besoin pour soutenir un même niveau de valeur ajoutée. Le recours à une approche de type input-output permet d'illustrer ce point de manière transparente. En suivant et simplifiant quelque peu Fagnart-Germain (2015b), considérons une économie mondiale formée de deux secteurs, un secteur énergétique qui produit de l'énergie secondaire en quantité  $E$  et un secteur qui produit un bien à tout faire en quantité  $Q$ . Pour la simplicité de la présentation (mais sans conséquence qualitative importante), nous supposons qu'il n'y a pas de livraison directe du secteur énergétique à la demande finale. Le secteur à tout faire livre donc toute la demande finale (ou le PIB),  $Y$ , qui se répartit en dépenses de consommation finale et dépenses d'investissement. Le tableau ressources-emplois ci-dessous résume les livraisons intermédiaires et finales de chaque secteur.

|                      | Output | Emplois intermédiaires |                      | Emplois finals |
|----------------------|--------|------------------------|----------------------|----------------|
|                      |        | Secteur énergétique    | Secteur à tout faire |                |
| Secteur énergétique  | $E$    | $E_e$                  | $E_q$                | 0              |
| Secteur à tout faire | $Q$    | $Q_e$                  | $Q_q$                | $Y$            |

Les variables  $E_e$  et  $E_q$  (respectivement  $Q_e$  et  $Q_q$ ) représentent les livraisons intermédiaires du secteur énergétique (respectivement du secteur à tout faire) aux 2 secteurs productifs:  $E_e$  est l'autoconsommation d'énergie par le secteur énergétique et  $E_q$  la consommation d'énergie du secteur à tout faire;  $Q_e$  sont les



livraisons en bien à tout à faire du secteur énergétique et  $Q_q$  l'autoconsommation du secteur à tout faire. Introduisons les coefficients techniques associés à ces livraisons intermédiaires:

$$e_e = \frac{E_e}{E}, e_q = \frac{E_q}{Q}, q_e = \frac{Q_e}{E} \text{ et } q_q = \frac{Q_q}{Q}$$

Ainsi, par exemple, le coefficient technique  $e_q$  donne le contenu en énergie d'une unité d'output du secteur à tout faire et le coefficient technique  $q_e$  donne le contenu en bien à tout faire d'une unité d'output du secteur énergétique. En utilisant ces coefficients techniques, on peut écrire l'équilibre ressources-emplois des deux productions comme suit :

$$E = e_e E + e_q Q$$

$$Q = q_e E + q_q Q + Y$$

Toutes les variables qui apparaissent dans ces deux équations (et donc aussi les quatre coefficients techniques) dépendent du temps (mais nous omettons les indices de temps pour la simplicité des notations). Ainsi, le progrès technique qui améliore l'efficacité de l'utilisation de l'énergie secondaire dans les productions humaines réduit  $e_q$  et augmente la productivité moyenne de l'énergie dans le secteur à tout faire.

#### *a) Les déterminants de la productivité de l'énergie*

En résolvant ce système de deux équations (et en éliminant  $Q$ ), on obtient une explicitation de la relation (introduite dans la sous-section 2.1) entre le PIB et la quantité d'énergie que sa production a réclamée, compte tenu des interdépendances sectorielles:

$$Y = x E \quad \text{où} \quad x = \frac{(1 - e_e)(1 - q_q) - e_q q_e}{e_q}.$$

*Implication 1: les conditions de la production de l'énergie secondaire affecte la valeur ajoutée qui peut être créée avec une unité de cette énergie.*

En effet, l'examen de l'expression de la productivité  $x$  de l'énergie secondaire exprimée en unités de PIB montre qu'elle est le produit de deux termes. Elle dépend évidemment positivement de la productivité de l'énergie dans le secteur final  $1/e_q$ . Mais elle dépend aussi de la part de l'énergie secondaire qui est effectivement disponible pour les productions finales: compte tenu des besoins des deux secteurs en consommations intermédiaires et des interdépendances entre les deux productions, une partie de l'énergie secondaire produite est en effet absorbée par les productions des deux branches d'activité. Le numérateur  $(1 - e_e)(1 - q_q) - e_q q_e$  donne précisément la fraction d'une unité d'énergie secondaire produite qui n'est pas absorbée dans les consommations intermédiaires et est effectivement disponible pour la

production finale.<sup>6</sup> La valeur ajoutée qui peut être créée au départ d'une unité d'énergie secondaire est donc le produit de la fraction de cette unité disponible pour les productions finales et de la productivité de l'énergie dans le secteur à tout faire.

L'explicitation de  $x$  nous montre donc que pour une même efficacité dans l'utilisation finale de l'énergie, la réalisation d'un certain volume de PIB réclamera d'autant plus d'énergie secondaire que les interdépendances sectorielles (en termes de consommations intermédiaires) sont fortes. Elle permet aussi d'établir le constat suivant:

*Implication 2 : le progrès technique qui améliore éventuellement l'efficacité de l'utilisation finale de l'énergie (et réduit donc  $e_q$ ) ne suffit pas à garantir que la productivité de l'énergie mesurée en unités de valeur ajoutée créées augmente globalement.*

En effet, si en même temps que ce progrès technique opère, la production de l'énergie devient plus gourmande en énergie (hausse de  $e_e$ ) ou en production du secteur à tout faire (hausse de  $q_e$ ) ou encore si le secteur à tout faire auto-consomme davantage de sa production (hausse de  $q_q$ ),  $x$  subira des pressions vers le bas;  $x$  ne pourra alors s'améliorer que si le progrès technique est suffisamment fort pour compenser l'effet de l'accroissement des interdépendances sectorielles.

Notons que nous n'avons pas pris en compte ici que la production des deux secteurs réclame aussi des équipements productifs dont l'obsolescence progressive fait que les deux secteurs consomment du capital fixe et donc du bien à tout faire par ce biais. Si l'on s'intéresse au produit intérieur net de l'économie et non au produit intérieur brut, il faut considérer cette consommation de capital fixe comme une consommation intermédiaire supplémentaire et corriger en conséquence les coefficients techniques relatifs au bien à tout faire: le contenu en bien à tout faire d'une unité de production de chaque secteur doit être augmenté pour intégrer le contenu en biens à tout faire qui correspond à l'obsolescence. En reprenant notre raisonnement avec ces coefficients techniques élargis, on établit aisément une relation entre le produit intérieur net et l'énergie secondaire qui lui a été nécessaire. La productivité de l'énergie secondaire mesurée en unités de valeur ajoutée nette est évidemment inférieure à  $x$  (qui néglige le contenu en énergie de la consommation de capital fixe). Ceci renforce évidemment le constat dressé dans l'implication 2: le rythme de progrès technique (dans l'utilisation finale de l'énergie) qui est nécessaire pour augmenter la productivité de l'énergie mesurée en unités de valeur ajoutée nette est d'autant élevé que la production d'énergie devient intensive en capital.

---

<sup>6</sup> Dit dans l'autre sens, pour qu'une unité d'énergie secondaire soit effectivement disponible pour la production finale, il faut avoir produit  $[(1 - e_e)(1 - q_q) - e_q q_e]^{-1} > 1$  unités d'énergie secondaire.

Comme nous l'avons déjà évoqué, la transition énergétique (le recours à des ressources non renouvelables plus difficilement exploitables et le recours à des ressources renouvelables offrant un moins bon rendement énergétique que les énergies fossiles conventionnelles) implique que la production d'énergie devient davantage consommatrice d'énergie, soit directement, soit indirectement (consommation d'énergie supplémentaire engendrée par la hausse des besoins du secteur énergétique en bien à tout faire). On comprend donc qu'à rythme constant de gain d'efficacité dans l'utilisation finale de l'énergie, la transition énergétique réduit le rythme de croissance de la productivité de l'énergie (a fortiori si elle est mesurée en unités de valeur ajoutée nette). Elle freine ainsi la réduction de la dépendance de la croissance économique envers l'énergie. Il en découle encore l'implication suivante :

*Implication 3: une transition énergétique qui rend la production d'énergie directement ou indirectement plus consommatrice d'énergie éloigne l'économie mondiale de la perspective d'un découplage (absolu) entre croissance économique et croissance de la consommation d'énergie.*

En effet, un découplage absolu entre croissance et énergie (qui rappelons-le ne s'est jamais observé jusqu'ici) ne pourrait, dans une telle transition, s'observer que dans des conditions plus restrictives encore s'agissant du niveau minimal de progrès technique à atteindre pour l'obtenir. Si comme les énergéticiens l'affirment, les progrès technologiques en matière de gains d'efficacité énergétique sont amenés à ralentir, on comprend que cette condition minimale ne sera pas aisément remplie.

#### *b) L'impact de l'énergie sur la productivité totale des facteurs travail et capital*

La production de l'énergie secondaire comme celle du bien à tout faire réclame de façon complémentaire d'autres facteurs de production comme le travail et le capital. Notons  $K_e$  et  $L_e$  (respectivement  $K_q$  et  $L_q$ ) les quantités de capital et de travail allouées à la production d'énergie (respectivement du bien à tout faire). La production de  $E$  unités d'énergie réclame une combinaison des facteurs travail et capital telle que

$$A_e \cdot F(K_e, L_e) = E,$$

où  $F(K_e, L_e)$  représente la manière dont doivent être combinés capital et travail dans le secteur de l'énergie et  $A_e$  est le facteur de productivité de cette combinaison (mesuré en unités d'énergie). De façon analogue, la production de  $Q$  unités du bien à tout faire réclame une combinaison des facteurs travail et capital telle que

$$A_q \cdot G(K_q, L_q) = Q,$$

où  $G(K_q, L_q)$  représente la manière dont doivent être combinés capital et travail dans le secteur à tout faire et  $A_q$  est le facteur de productivité de cette combinaison (mesuré en unités du bien à tout faire).

En combinant ces équations à celles du système ressources-emplois de l'économie à deux secteurs, on montre aisément que pour atteindre un niveau donné de production finale, il faut engager, dans chacun des deux secteurs, des quantités de capital et/ou<sup>7</sup> travail d'autant plus grandes que la productivité  $x$  de l'énergie est faible :

$$F(K_e, L_e) = \frac{1}{x A_e} Y$$

$$G(K_q, L_q) = \frac{1}{x A_q} \frac{1 - e_e}{e_q} Y$$

Il s'en suit l'implication suivante :

*Implication 4 : Lorsqu'on la mesure en unités de valeur ajoutée, la productivité du mixte capital/travail de chaque secteur d'activité dépend positivement de la productivité de l'énergie.*

L'impact de la productivité de l'énergie sur les besoins en mixte capital/travail des deux secteurs de l'économie est intuitif. Si  $x$  est plus faible, produire un niveau donné d'output final réclame de produire davantage d'énergie. Pour ce faire, le secteur énergétique a davantage besoin 1) d'unités du mixte capital/travail et 2) d'unités de biens à tout faire comme consommation intermédiaire. En conséquence, le secteur à tout faire doit lui-même produire davantage d'unités du bien. Il a donc aussi besoin de davantage d'unités du mixte capital/travail pour atteindre un même niveau de production finale. Mesurée au niveau macroéconomique, la productivité totale des facteurs travail et capital (ce qu'on appelle encore le résidu de Solow) apparaît donc plus faible. Dans une perspective dynamique, il en découle encore ce qui suit :

*Implication 5: En freinant les gains de productivité de l'énergie, une transition énergétique qui rend la production d'énergie directement ou indirectement plus consommatrice d'énergie ralentit aussi les gains de productivité des facteurs capital et travail et donc la croissance économique qu'on peut espérer d'un rythme donné de progrès technique.*

### *c) Energie, accumulation du capital et croissance*

Pour simplifier la suite de la discussion<sup>8</sup>, nous ferons abstraction du facteur travail et supposerons que  $F(K_e, L_e) = K_e$  et  $G(K_q, L_q) = K_q$ .

<sup>7</sup> La précision «et/ou» renvoie à la possibilité technologique de substituer plus ou moins facilement capital et travail. Par quantités plus grandes de capital et/ou travail, nous entendons des combinaisons  $(K, L)$  qui permettent d'atteindre des niveaux de production plus élevés dans chaque secteur.

<sup>8</sup> Si nous maintenions le facteur travail, la discussion qui suit pourrait rester pratiquement identique si l'on fait l'hypothèse que les fonctions  $M(K, L)$  sont homogènes de degré 1 et si on raisonnait à rapport capital/travail constant et donc à prix relatifs constants de ces deux facteurs.

Notons que cette hypothèse technologique n'est pas particulièrement pessimiste puisqu'elle implique que la productivité marginale du capital dans un secteur donné est constante lorsqu'on la mesure en unité d'output de ce secteur. Dans un modèle de croissance uni-sectoriel (et donc sans énergie), elle serait de nature à impliquer une croissance endogène perpétuelle.

Sous cette hypothèse, les deux équations liant le mixte capital/travail de chaque secteur à la valeur ajoutée macroéconomique montrent que le besoin en capital de chaque secteur augmente lorsque la productivité  $x$  de l'énergie s'affaiblit et qu'on veut atteindre un même niveau de PIB. En additionnant ces deux équations, on obtient alors une relation donnant le besoin total en capital de l'économie en fonction du niveau de PIB à atteindre

$$K = K_e + K_q = \frac{1}{x} \left[ \frac{1}{A_e} + \frac{1}{A_q} \frac{1 - e_e}{e_q} \right] Y \quad (1)$$

On vérifie aisément que tout élément qui affaiblit  $x$  (et en particulier les coefficients techniques  $e_e$  et  $e_q$  qui interviennent dans l'expression ci-dessus par un autre canal que leur seul effet sur  $x$ ) augmente les besoins en capital de l'économie (en fait des deux secteurs de l'économie) à  $Y$  donné.

*Implication 6: En pesant sur  $x$ , la transition énergétique augmente les besoins en capital de l'économie pour un même niveau de PIB à atteindre. Elle augmente donc le rapport capital/output agrégé  $K/Y$ .*

Mais la transition interagit aussi avec l'accumulation du capital en la ralentissant à taux d'épargne inchangé. En effet, si nous supposons un taux de dépréciation  $\delta$  constant et identique dans les deux secteurs, on peut écrire la variation temporelle du stock de capital comme  $\dot{K} = sY - \delta K$  où  $s$  est le taux d'épargne de l'économie. En taux de croissance donc,

$$\frac{\dot{K}}{K} = s \frac{Y}{K} - \delta$$

A taux d'épargne donné, l'accumulation du capital est d'autant plus rapide que le rapport  $Y/K$  est élevé. Or nous venons de voir que tout ce qui pèse sur  $x$  pèse aussi sur  $Y/K$  (cfr. Implication 6).

*Implication 7: à même taux d'épargne, l'accumulation du capital est d'autant moins rapide que la productivité de l'énergie est faible. Autrement dit, une économie où la productivité de l'énergie est moins élevée doit épargner davantage pour atteindre le même taux de croissance de son stock de capital.*

On peut encore réécrire l'équation (1) comme une équation liant la croissance économique à l'accumulation du capital, à la croissance de la productivité  $x$  de l'énergie et au progrès technique portant

sur les variables  $A_e$  et  $A_q$ . On voit donc qu'en pesant sur l'évolution de la productivité de l'énergie et en ralentissant l'accumulation du capital, la transition énergétique freine la croissance économique *ceteris paribus*.

## CONCLUSION

Malgré son caractère stylisé et incomplet, l'analyse qui précède montre que les obstacles à la croissance économique se multiplient dans une phase de transition énergétique (c'est-à-dire dans une phase où la production de l'énergie devient directement ou indirectement plus consommatrice d'énergie). 1) A efficacité donnée dans l'utilisation finale de l'énergie, la transition augmente la quantité d'énergie nécessaire à la création d'une unité de valeur ajoutée. 2) Les progrès technologiques purs se traduisent moins nettement en gains de productivité (mesurés en unités de valeur ajoutée) et sont donc moins porteurs de prospérité. 3) Pour croître, l'économie a d'autant plus besoin de capital que la transition pèse sur la productivité de l'énergie (mesurée en unités de valeur ajoutée) mais, simultanément, la transition freine aussi l'accumulation du capital. Maintenir un même taux de croissance (à supposer que ceci fut possible) réclamerait que l'économie dans son ensemble alloue une fraction plus grande de sa production à l'investissement. Une telle croissance nourrirait donc aussi moins les consommations finales (privées ou publiques).

Dans ce qui précède, nous avons souligné que la croissance allait devenir plus difficile et qu'elle s'arrêterait même inévitablement un jour. Mais nous n'avons pas exclu qu'elle puisse se poursuivre pour ne s'éteindre que lentement. Cependant, comme nous écartons la perspective d'un découplage absolu (cfr. implication 3), cela supposerait que l'économie mondiale puisse, jusqu'à un certain point, continuer à produire toujours plus d'énergie secondaire. En ce sens, il ne s'agirait donc pas seulement de substituer les énergies fossiles par des énergies renouvelables; il s'agirait aussi de produire, grâce aux énergies primaires renouvelables, plus d'énergie secondaire que ce que nous faisons aujourd'hui. Quand on sait que l'approvisionnement énergétique mondial en énergie primaire repose aujourd'hui encore à plus de 85% sur le fossile et à moins de 10% sur le renouvelable (dont l'hydroélectricité pour la très grande part), on mesure l'ampleur du basculement à accomplir.

## BIBLIOGRAPHIE

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

Ayres R.U. and B. Warr (2009), *The economic growth engine: How energy and work drive material prosperity*, Edward Elgar.

Ayres R.U., J. van den Bergh, D. Lindenberger and B. Warr (2013), “The underestimated contribution of energy to economic growth”, *Structural Change and Economic Dynamics*, 27, 79-88.

Baumgärtner S., (2004), “The Inada conditions for material resource inputs reconsidered”, *Environmental and Resource Economics* 29, 307 – 322.

Bihouix Ph., (2014), *L'âge des Low-Tech: Vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, collection Anthropocène.

Fagnart J.-F. et M. Germain (2015a), “Energy, complexity and sustainable long-term growth”, *Mathematical Social Sciences* 75, 87-93.

Fagnart J.-F. et M. Germain (2015b), “Net Energy Ratio, EROEI and the Macroeconomy”, CEREC Working Paper 2015/1, à paraître dans *Structural Change and Economic Dynamics*.

Stern D.I. (2011), “The role of energy in economic growth”, *Annals of the New-York Academy of Sciences* 1219, 26-51.