



Université catholique de Louvain
Année académique : 2012 - 2013

Impacts des limites de l'efficacité énergétique
sur la production économique

— VERSION ABRÉGÉE —

Promoteur : Jeanmart Hervé

Mémoire présenté par :
Vermeulen Olivier

en vue de l'obtention du grade d'ingénieur civil mécanicien



École Polytechnique de Louvain

Table des matières

1	Le lien entre l'énergie et le PIB	1
1.1	Le produit intérieur brut	1
1.1.1	PIB et consommation matérielle	2
1.2	Énergie et effet rebond	4
1.3	Effizienz énergétique	4
1.3.1	Intensité énergétique	4
2	Modèle théorique de l'effizienz énergétique	6
2.1	Croissance de l'effizienz	6
2.2	Limite supérieure de l'effizienz énergétique	8
3	Évolution temporelle de l'effizienz énergétique mondiale	10
3.1	Production énergétique	10
3.2	Consommation énergétique	13
3.3	PIB de consommation	14
3.4	Effizienz mondiale	14
3.4.1	Limite supérieure de l'effizienz énergétique	15
4	Prévisions énergétiques et impacts sur le PIB	17
4.1	Prévisions énergétiques	17
4.1.1	Une prévision énergétique en fonction des impératifs climatiques	18
4.2	Les impacts sur le PIB mondial	20
	Conclusion	22
	Bibliographie	24

Chapitre 1

Le lien entre l'énergie et le PIB

Depuis l'aube du temps l'homme utilise de l'énergie pour produire les biens matériels et les services qui l'entourent. L'énergie est indispensable afin de transformer les ressources naturelles et de les rendre utiles. Ces transformations de l'environnement peuvent être des modifications de vitesse, de température, de forme, de composition chimique, de position dans un champ magnétique, de composition atomique ou encore des interactions entre matière et rayonnement [24]. Mais une chose est certaine, il est impossible de produire une richesse sans utiliser d'énergie.

1.1 Le produit intérieur brut

Le PIB (produit intérieur brut) est une représentation de la richesse d'une population, il est défini par Mankiw comme étant la valeur marchande de tous les biens et services finaux produits dans un pays au cours d'une période [29]. Vu la libéralisation du marché et les échanges économiques que cela a entraîné à travers le monde ainsi que les défis environnementaux transfrontaliers, tel le climat et la biodiversité, il va de soi que la question énergétique est une question planétaire, c'est pourquoi ce travail ne parlera que du PIB mondial.

Il y a plusieurs manières de calculer le PIB ; il peut par exemple représenter la consommation totale de la population, ainsi que le total des revenus de la population ou encore la production totale des biens de consommation par les entreprises. Ces différentes sommes

sont évidemment équivalentes puisqu'elles représentent chacune la totalité du flux d'argent qui circule à travers la population et qu'un flux mesuré à des endroits différents dans un circuit fermé est toujours le même.

Un détail assez important en ce qui concerne le PIB est l'inflation de la valeur monétaire. Effectivement, l'argent que gagne un salarié aujourd'hui ne peut être comparé avec le salaire d'il y a 100 ans et le prix d'un kilo de pommes n'est plus le même que dans le passé. C'est pourquoi il est primordial de parler en PIB réel et non en PIB nominal, le premier correspond à la production de biens et services valorisée à des prix constants et le deuxième à des prix courants [29]. Le PIB réel est calculé en choisissant une année comme étant l'année de base pour les prix des biens et services produits, ce PIB réel n'est donc pas affecté par les variations de prix et ne reflète donc qu'uniquement les variations de la production des biens et services dans un système économique.

Bien évidemment, ce travail n'utilisera que le PIB réel afin de pouvoir comparer la production (et donc la consommation) de biens et services de l'économie mondiale à travers le temps avec l'évolution de la consommation énergétique. Ceci permet de ne pas fausser les résultats et d'étudier réellement le pouvoir d'achat en fonction de la consommation d'énergie qui est une donnée physique et ne connaît donc naturellement pas d'inflation. Durant ce travail l'année de base pour toutes les valeurs de PIB est l'an 2011 et la monnaie utilisée le Tera dollar américain (un millier de milliards de dollars américains), dont l'abréviation est TUS\$.

1.1.1 PIB et consommation matérielle

Quand le PIB est calculé via les consommations de la population, il suffit de réfléchir à tous les biens et services achetés quotidiennement pour comprendre ce que représente exactement ce PIB. Ces dépenses sont en ordre aléatoire et de manière non exhaustive : logements, voitures, appareils ménagers, voyages, nourriture, gadgets quelconques, vêtements, loisirs, soins médicaux et cetera. Ces activités consomment toutes de l'énergie, que ce soit directement ou indirectement et donc intuitivement le PIB est déjà fortement lié à la consommation énergétique.

Une recherche plus en profondeur de ce que représente le PIB permet de comprendre encore mieux ce lien entre le PIB et la consommation matérielle, Mankiw [29] explique dans *Principes de l'économie* comment est calculé le PIB d'une nation. De plus, une vulgarisation très éclairante et proposée dans la vidéo "Measuring GDP using the Income Approach and the Expenditure Approach" du site Welker's Wikinomics [42]. Celle-ci exprime très bien ce qu'implique le PIB calculé par le biais des revenus ou des dépenses et que cette dernière approche est effectivement liée directement à la consommation de biens matériels, et donc également à leur production.

En effet, ce PIB est la somme des dépenses des ménages, des entreprises, du gouvernement ainsi que la différence entre l'export et l'import d'une nation. Cette dernière composante peut être retirée quand il s'agit du PIB mondial et les trois premières composantes sont respectivement la consommation de biens et services par la population, les investissements en biens capitaux des firmes c'est-à-dire les stocks et les structures (matières premières, machines, bâtiments, ...) et finalement les dépenses du gouvernement qui sont l'éducation, les infrastructures, les soins médicaux et cetera.

La question qu'il faut donc se poser est si un découplage entre la croissance du PIB et l'augmentation de consommation énergétique est possible. Selon les définitions données par Camara [6], un découplage absolu a lieu quand l'économie croît alors que la consommation énergétique stagne ou diminue et il y a découplage relatif lorsque la consommation énergétique augmente moins vite que les activités économiques.

La notion de découplage absolu paraît donc impossible vu la définition du PIB ci-dessus. En effet, vu que celui-ci comprend des biens matériels nécessitant intrinsèquement une consommation énergétique et que les services qui se trouvent dans le PIB ne sont pas possibles sans un minimum de biens matériels afin de réaliser ces services. Une augmentation des services occasionnera donc également une croissance des biens indispensables à la réalisation de ces services et donc finalement une augmentation de la consommation énergétique à la production de ces biens.

Une économie uniquement basée sur des services et qui importe les biens nécessaires à la réalisation de ses services pourrait donc connaître un découplage absolu, mais vu qu'au

niveau mondial la question d'import et d'export ne se pose pas, il est raisonnable de dire que le PIB au niveau mondial ne peut être découplé de manière absolue de la consommation énergétique.

Néanmoins, le PIB pourrait être découplé relativement de la consommation énergétique en augmentant l'efficacité énergétique de la production des biens matériels indispensables à cette croissance économique.

Cette efficacité énergétique, qui représente le PIB réalisé par rapport à la consommation d'énergie au cours d'un laps de temps, est le sujet de ce travail, mais voici d'abord encore quelques réflexions importantes avant de se lancer dans le vif du sujet.

[...]

1.2 Énergie et effet rebond

[...]

1.3 Efficacité énergétique

La définition de l'efficacité est le PIB divisé par la consommation énergétique. Le PIB représente la richesse produite et si cette richesse est produite en consommant une plus petite quantité d'énergie, il s'agit effectivement d'une production plus efficace.

1.3.1 Intensité énergétique

L'intensité énergétique est l'inverse de l'efficacité. Et en effet, si une même production a lieu en consommant moins d'énergie, la production est moins intense énergétiquement.

Les termes d'efficacité et d'intensité énergétique doivent être utilisés avec parcimonie dans des études à propos du découplage entre le PIB et la consommation énergétique. Comme le souligne Fiorito [17], ce terme ne peut pas être utilisé pour des économies nationales car d'autres facteurs, comme l'import ou l'export de produits nécessitant une production plus ou moins énergivore, peuvent être les causes du découplage observé comme

l'indique également Camara [6] dans la fin de son article. Néanmoins, ce travail attaque la question de l'efficience et de l'intensité au niveau mondial et les effets invalidant les études d'efficience énergétique au niveau national ne sont pas présents quand l'ensemble de l'économie mondiale est étudiée.

[...]

Chapitre 2

Modèle théorique de l'effici- ence énergétique

L'effici-ence et l'intensité énergétique étant l'inverse l'une de l'autre, ces deux termes seront étudiés en parallèle afin de faciliter la compréhension du raisonnement poursuivi dans ce travail.

2.1 Croissance de l'effici-ence

Historiquement l'effici-ence augmente d'année en année grâce notamment aux progrès technologiques. Ceci permet d'augmenter la production de biens matériels sans que l'apport énergétique ne doive pour autant croître aussi significativement.

Ceci allant de pair avec une décroissance de l'intensité énergétique, une première approximation de cette dernière peut être réalisée par une exponentielle décroissante telle que :

$$I(t) = q_1 \cdot e^{-q_2 \cdot (t-t_0)} \quad (2.1)$$

En approchant les données expérimentales par cette formule, où t_0 représente l'année de référence de l'intensité énergétique, les significations des deux paramètres sont :

- $q_1 = I(t_0)$, l'intensité à l'année de référence des observations ;
- $q_2 = \epsilon$, la constante de décroissance, celle-ci définit la courbure de la fonction

décroissante, au plus ϵ est grand, au plus l'intensité diminuera rapidement.

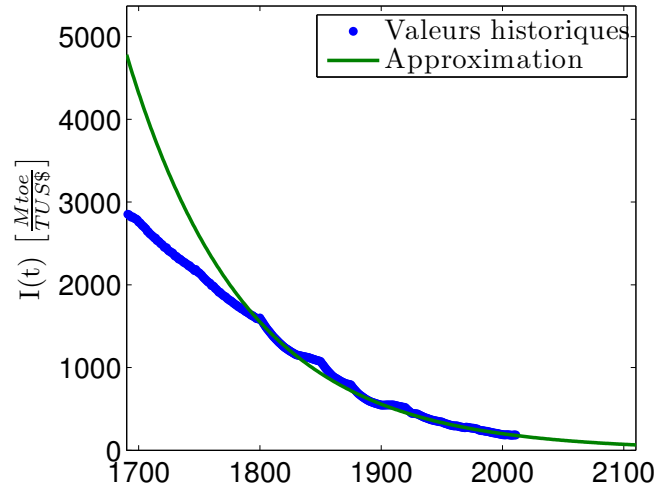


FIGURE 2.1 – Évolution temporelle de l'intensité par approximation de la formule (2.1)

Ceci donne donc pour l'efficacité la formule suivante :

$$E(t) = \frac{1}{I(t)} = p_1 \cdot e^{p_2 \cdot (t-t_0)} \quad (2.2)$$

Où les paramètres sont :

- $p_1 = E(t_0)$, l'efficacité à l'année de référence des observations ;
- $p_2 = q_2 = \epsilon$, la constante de décroissance, qui dans le cas d'une fonction croissante est plutôt appelée la constante de croissance.

Comme représenté aux figures 2.2 et 2.1 cette approche suppose une efficacité infinie ainsi qu'une intensité diminuant jusqu'à zéro dans un -certes lointain- avenir.

Cette approche contient donc une erreur considérable pour les prédictions d'efficacité et d'intensité énergétique. En effet, il est impossible de produire une richesse sans consommer d'énergie et il est donc nécessaire d'insérer une limite inférieure à l'intensité énergétique ce qui induit une limite supérieure à l'efficacité énergétique.

[...]

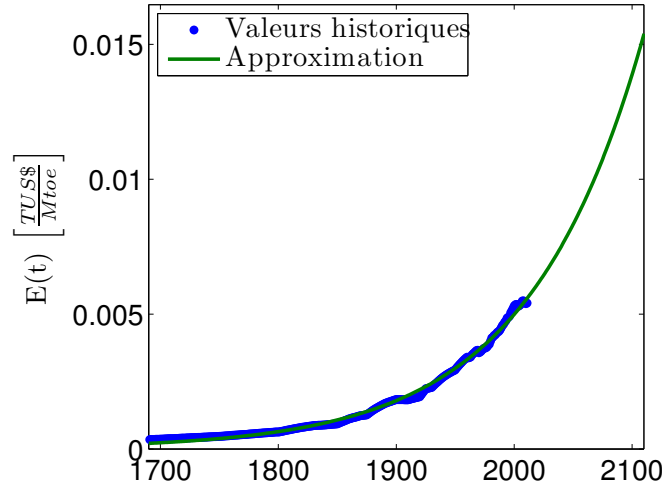


FIGURE 2.2 – Évolution temporelle de l'efficiency par approximation de la formule (2.2)

2.2 Limite supérieure de l'efficiency énergétique

Une limite inférieure d'intensité énergétique peut s'inscrire dans la formule de départ (2.1) en y ajoutant une constante représentant l'intensité pour une valeur temporelle infinie. Ceci donne la formule suivante pour l'intensité :

$$I(t) = q_3 + (q_1 - q_3) \cdot e^{-q_2 \cdot (t-t_0)} \quad (2.3)$$

Où le nouveau paramètre est :

- $q_3 = I(+\infty)$, l'intensité pour des valeurs temporelles infinies, c'est-à-dire sa limite inférieure.

Par contre ceci donne une toute autre formule pour l'efficiency :

$$\begin{aligned} E(t) &= \frac{1}{q_3 + (q_1 - q_3) \cdot e^{-q_2 \cdot (t-t_0)}} \\ &= \frac{p_3}{1 + \frac{p_3 - p_1}{p_1} \cdot e^{-p_2 \cdot (t-t_0)}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Où le nouveau paramètre est :

- $p_3 = E(+\infty)$, l'efficiency pour des valeurs temporelles infinies ou en d'autres mots sa limite supérieure.

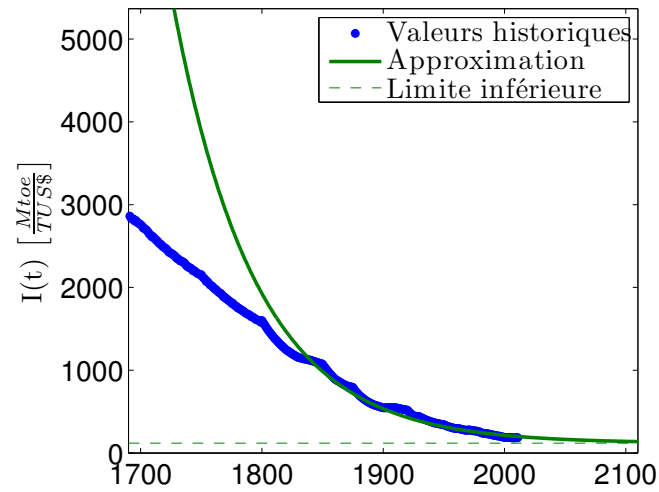


FIGURE 2.3 – Évolution temporelle de l'intensité par approximation de la formule (2.3)

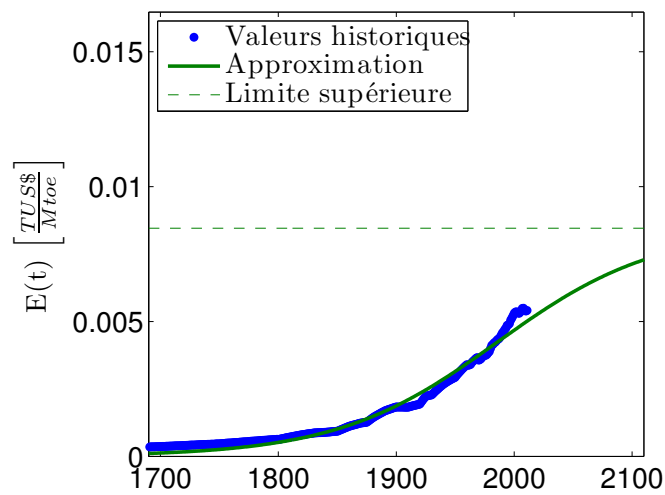


FIGURE 2.4 – Évolution temporelle de l'efficacité par approximation de la formule (2.4)

Néanmoins des améliorations sont encore à faire à ce modèle.

[...]

Pour une étude plus complète du modèle mathématique veuillez vous référer à la version longue de ce travail.

Chapitre 3

Évolution temporelle de l'effici- ence énergétique mondiale

Dans ce chapitre l'effici-
ence mondiale est modélisée à partir des données historiques de PIB et de consommations énergétiques ainsi qu'à partir des prévisions faites en matière d'effici-
ence dans les différents secteurs économiques.

Différents scénarios sont présentés et comparés. Ce qui permet de réaliser des prédictions du PIB mondial en fonction des prévisions énergétiques pour les décennies à venir au chapitre suivant.

3.1 Production énergétique

Avant de commencer, voici une petite remarque par rapport aux unités utilisées dans ce travail pour l'énergie. Étant donné que les énergies fossiles représentent la majorité de la production énergétique, il est habituel de présenter les quantités d'énergie en mégatonnes d'équivalent pétrole (Mtoe). L'unité SI de l'énergie étant le joule, 1 Mtoe vaut $41868 * 10^{12}$ J ou 10000 Mtoe valent 418.68 EJ.

Les seules sources d'énergie primaires disponibles sur terre sont le soleil qui envoie par rayonnement en constance 173000 TW ce qui correspond environ à $130300 * 10^9$ Mtoe d'énergie par an ainsi que l'énergie géothermique du noyau central de la terre et l'énergie provenant de la lune qui ensemble représentent 30TW ou 22600 Mtoe par an [26] [32].

La consommation énergétique a été l'outil principal pour le développement de l'humanité à travers l'histoire [33]. Jusqu'à la fin du 18ème siècle cette consommation est restée fort constante et celle-ci était quasi uniquement constituée de biomasse.

Par contre, comme représenté à la figure 3.1, depuis la première révolution industrielle les sources énergétiques se sont diversifiées et la consommation énergétique totale n'a cessé d'augmenter [19].

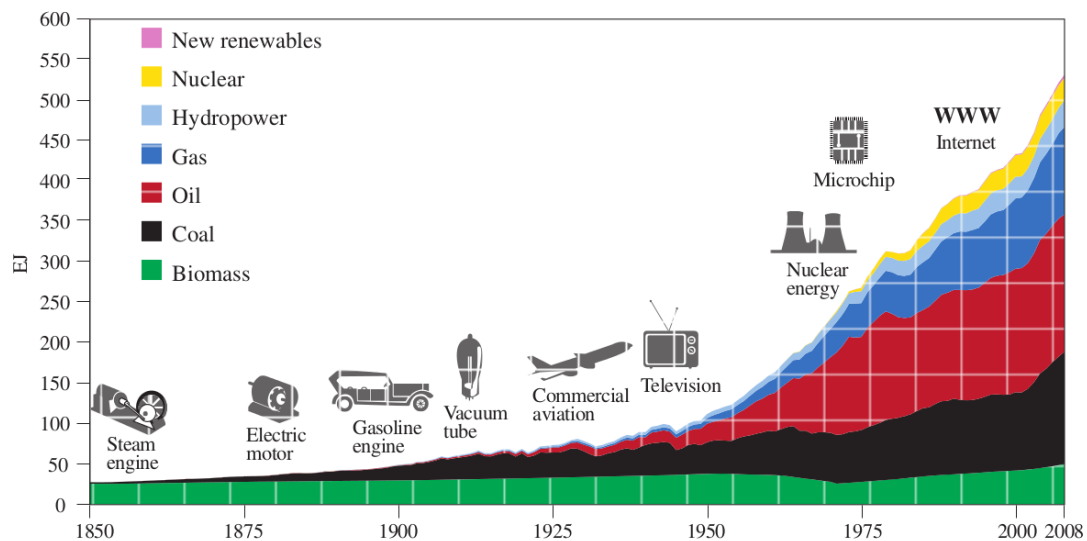


FIGURE 3.1 – Historique de la consommation mondiale d'énergie primaire par source (en EJ).

Source : adapté de Nakicenovic et al., 1998 et Grubler, 2008.

Les sources d'énergie sont actuellement divisées de la manière suivante :

- 80% d'énergies fossiles qui sont subdivisées en :
 - 33% de charbon,
 - 41% de pétrole,
 - 26% de gaz ;
- 5% d'énergie nucléaire ;
- 15% d'énergies renouvelables subdivisées en :
 - 36% d'hydraulique,
 - 62% de biomasse,
 - 2% d'autres renouvelables (principalement l'éolien et le solaire).

Les énergies fossiles sont des énergies non-renouvelables car elles sont consommées à

une vitesse plus élevée que celle à laquelle elles ne peuvent se régénérer. De plus, leur combustion émet inévitablement du CO_2 , ce qui entraîne un effet de serre dans l'atmosphère et participe à un réchauffement climatique anthropique jamais observé auparavant [20].

En ce qui concerne l'énergie nucléaire, cette technologie n'émet pas de CO_2 pour produire de la chaleur et ainsi générer de l'électricité. Néanmoins cette énergie doit être contrôlée de manière très rigoureuse afin d'éviter des catastrophes comme celles de Tchernobyl ou de Fukushima.

Finalement, les énergies renouvelables sont également controversées. Prenons l'exemple de la biomasse dont l'utilisation croît fortement ces temps-ci, mais, comme l'explique par exemple le documentaire "La fausse promesse d'une énergie propre" réalisé par Steffen Weber et Reinhard Hornung en 2013, il ne s'agit plus uniquement de résidus de bois que l'homme ramasse pour se chauffer ou cuire ses aliments. Une part croissante de la biomasse actuelle provient d'agriculture intensive. Tout d'abord cette agriculture intensive est dépendante d'une forte consommation d'énergie fossile pour sa production d'engrais et de pesticides. De plus, elle provoque des bouleversements sur le marché de denrées alimentaires tel le maïs ou le colza et met donc en difficulté les petits agriculteurs qui doivent s'aligner sur ces nouveaux prix. La production même du biogaz n'est pas non plus exempte de risques environnementaux, des fuites peuvent naître dans les cuves de production de méthane qui est un gaz à effet de serre encore plus mauvais pour le climat que le CO_2 .

Amener la production de biogaz à grande échelle doit donc être suivi du début de la filière jusqu'à l'utilisation finale du biogaz afin de s'assurer que l'utilisation de celui-ci ne produise finalement pas plus de gaz à effet de serre que le gaz naturel qu'il est sensé remplacer et que sa production ne mette pas en danger l'activité économique d'une grande partie de la population [41].

En ce qui concerne les sources d'énergie solaire et éolienne, leur bilan carbone doit également être contrôlé, mais une fois que ceux-ci sont mis en fonctionnement, la production d'électricité (ou de chaleur dans le cas des panneaux solaires) permet effectivement

une production d'énergie neutre en carbone.

Toute production énergétique peut donc, à des niveaux différents, avoir des effets indésirables sur l'environnement et/ou sur le système économique mondial ; afin d'éviter ces problèmes environnementaux et/ou sociaux, chaque nouvelle production d'énergie doit être précédée d'une réflexion à propos de la durabilité du projet énergétique et ensuite être mise en place accompagnée d'un suivi rigoureux.

3.2 Consommation énergétique

La consommation énergétique mondiale est majoritairement destinée aux secteurs de l'industrie, du transport et du bâtiment.

En 2007, l'industrie a consommé 3015 Mtoe, le transport 2300 Mtoe, le bâtiment 2759 Mtoe et il y a eu 3955 Mtoe d'autres consommations [23].

[...]

Dans ce travail les données de Smil [34] et de BP [5] sont utilisées afin de représenter la production mondiale d'énergie. Leurs données, qui sont obtenues respectivement par reconstruction historique et par mesure directe, sont représentées à la figure 3.2.

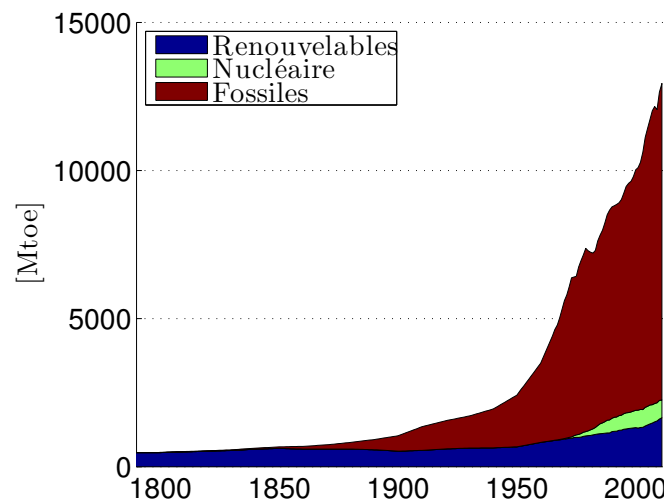


FIGURE 3.2 – Historique de la consommation énergétique mondiale par source.

Source : adapté de Smil, 2010 et BP, 2013.

[...]

3.3 PIB de consommation

Les données de DeLong [12] et de la World Bank [44] seront utilisées afin de représenter le PIB mondial. Comme expliqué dans le premier chapitre, ce PIB est en monnaie constante afin de représenter correctement la richesse d'année en année et d'échapper au malentendu que crée une monnaie courante.

La représentation du PIB mondial est donnée à la figure 3.3.

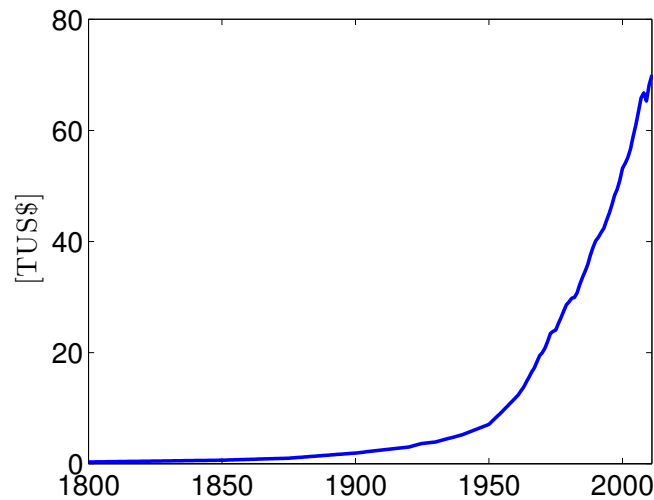


FIGURE 3.3 – Évolution temporelle du PIB mondial en TUS\$ constant de 2011.

Source : adapté de DeLong, 1998 et World Bank, 2013.

[...]

3.4 Efficience mondiale

Afin de représenter l'augmentation d'efficience qu'il est possible d'obtenir au niveau mondial il est nécessaire d'étudier les différents secteurs qui constituent la consommation énergétique actuelle, c'est-à-dire l'industrie, le transport, le bâtiment et les autres. Une fois cette limite théorique connue il est possible de l'ajouter dans le modèle théorique du chapitre 2 et ainsi de prédire l'efficience énergétique pour les décennies à venir.

Différents scénarios sont étudiés pour calculer cette limite supérieure d'efficacité énergétique, les deux sources principales de cette modélisation sont le rapport "Energy Technology Perspectives 2010 - Scenarios & Strategies to 2050" de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) [23] ainsi que l'étude "Vers une Wallonie Bas-carbone en 2050" (WBC2050) qui est une modélisation du scénario énergétique wallon d'ici 2050 réalisée par la société de consultance en énergie et changement climatique Climact [9].

[...]

3.4.1 Limite supérieure de l'efficacité énergétique

[...]

L'ensemble des secteurs sont synthétisés au tableau 3.1 pour l'ensemble des scénarios étudiés. La totalité des différents secteurs est à nouveau une pondération en fonction de leur consommation énergétique. Suite à l'étude réalisée, 3 scénarios sont gardés, le BAU (Business As Usual), le BATs (Best Available Technologies), qui correspond à la mise-en-place des meilleures technologies disponibles à ce jour, et finalement le MAX, qui suppose des nouvelles technologies touchant aux limites thermodynamiques de nos productions économiques.

[...]

Scénarios	BAU	BATs	MAX
Industrie	7.6	24.7	39.9
Transport	10.2	36.2	57.5
Bâtiments	48.3	65.2	94.2
Autres	11.0	21.0	31.9
Total	18.6	35.0	53.1

TABLE 3.1 – Différents scénarios d'augmentation de l'efficacité énergétique totale par rapport à la consommation énergétique actuelle.

Les trois scénarios du tableau 3.1 permettent de calculer différentes évolutions de l'efficacité énergétique mondiale comme illustré à la figure 3.4.

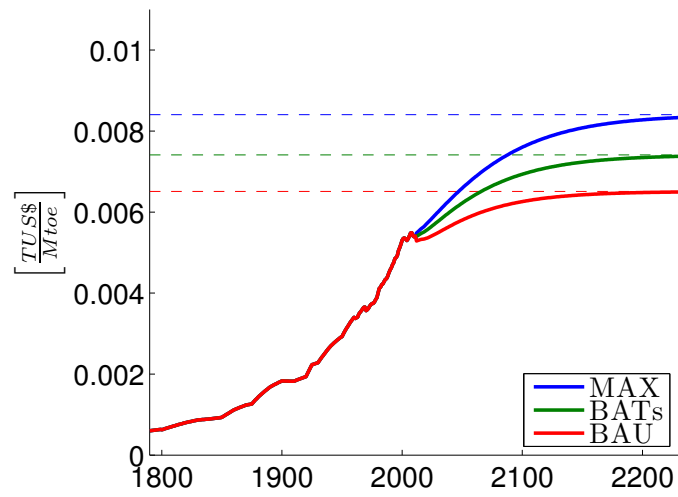


FIGURE 3.4 – Évolution temporelle de l'efficience énergétique selon les 3 scénarios du tableau 3.1

Chapitre 4

Prévisions énergétiques et impacts sur le PIB

Ce dernier chapitre propose une étude en plusieurs étapes. Tout d'abord une prévision de la courbe énergétique mondiale est proposée, suivi ensuite des effets que cela entraîne pour le PIB mondial.

4.1 Prévisions énergétiques

Vu qu'un découplage absolu est impossible entre l'économie et la consommation énergétique et vu qu'un découplage relatif connaît également des limites comme étudié aux chapitres précédents de ce travail, il est primordial de remplacer les sources d'énergies fossiles par des énergies renouvelables afin d'éviter une crise écologique et pouvoir poursuivre un développement économique aussi florissant qu'aujourd'hui, voir l'accroître.

Ce paragraphe propose une modélisation de l'énergie disponible pour le 21ème siècle, qui comme expliqué au premier chapitre risque effectivement d'être un des plus grands défis pour l'humanité.

Voici tout d'abord un bref rappel des différents problèmes liés à l'approvisionnement énergétique.

Tout d'abord il s'agit de sortir au plus vite de la consommation d'énergies fossiles afin d'éviter une catastrophe climatique. Ceci est uniquement possible en remplaçant cette énergie par d'autres sources d'énergie. Actuellement les alternatives sont les énergies renouvelables et le nucléaire. Tous les deux ont leurs avantages et leurs inconvénients et il s'agit donc de proposer un modèle d'accroissement de ces deux sources d'énergie tout en restant dans un scénario réaliste pour le maintien de la planète.

De plus ces nouvelles sources d'énergie connaissent également certaines limites. La nécessité de matériaux à leur construction est une des premières limites [3]. Deuxièmement, les sources elles-mêmes sont limitées, par exemple les réserves de nucléaire se videront à leur tour, et encore plus rapidement si elles sont utilisées à grande échelle. Et même le soleil est limité ! Effectivement, il envoie jusqu'à 173000 TW d'énergie solaire en continu, mais ceci n'est pas une quantité infinie d'énergie et, de plus, faut-il pouvoir rendre cette énergie utile pour l'humain [21].

4.1.1 Une prévision énergétique en fonction des impératifs climatiques

Afin d'offrir un modèle réaliste de l'apport énergétique pour les futures décennies, quelques hypothèses sont émises, celles-ci sont expliquées en détail dans la suite de ce sous-chapitre.

- Les énergies renouvelables croîtront avant de saturer à leur tour.
- Les énergies nucléaires resteront stables au niveau actuel.
- Les énergies fossiles sont actuellement à un point culminant et diminueront de manière équivalente à ce qu'elles ont augmenté.

[...]

Ces différentes hypothèses sont rassemblées à la figure 4.1 pour chacune des sources d'énergie. Les valeurs numériques de ces courbes se trouvent en annexe de ce travail.

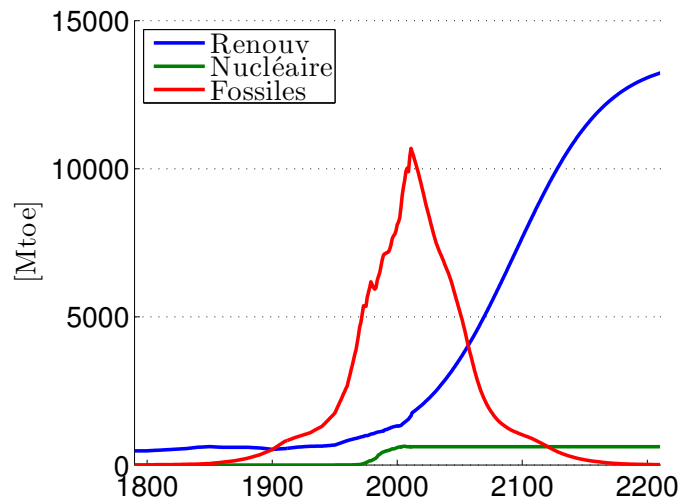


FIGURE 4.1 – Prédiction de la production énergétique mondiale des différentes sources d'énergie.

Totalité de la production énergétique

La prévision énergétique totale est réalisée en sommant les quantités d'énergie disponibles de chacune des sources, ce qui est illustré à la figure 4.2.

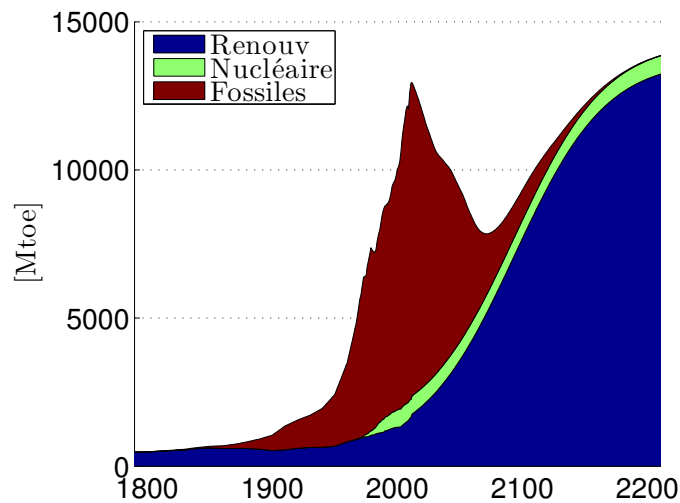


FIGURE 4.2 – Prédiction de la production énergétique mondiale jusqu'en 2200.

Un creux dans l'apport énergétique est donc observé suite à la diminution d'énergie fossile dans les prochaines décennies. Ce creux est petit à petit comblé grâce à la croissance des énergies renouvelables qui plafonneront à leur tour autour de 2200.

4.2 Les impacts sur le PIB mondial

Cette prévision énergétique permet de calculer le PIB pour les années à venir en fonction des différents scénarios d'efficacité énergétique proposés au chapitre précédent.

La figure 4.3 présente les différents scénarios de PIB possibles en fonction des augmentations d'efficacité selon le business as usual (BAU), les meilleures technologies disponibles (BATs) et la limite supérieure maximale de l'efficacité énergétique (MAX). Les valeurs numériques de ces courbes se trouvent en annexe de ce travail.

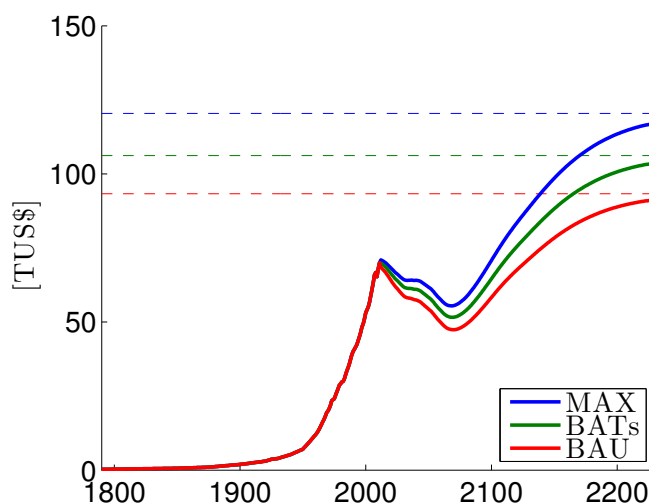


FIGURE 4.3 – Évolution du PIB mondial en fonction de la production énergétique et des différents scénarios d'efficacité énergétique.

Les différents scénarios ne diffèrent pas énormément et il s'agit surtout d'une différence pour les PIB finaux atteints vers 2200. Ceux-ci vont de 101.5 à 126.1 TUS\$ en passant par 113.8 TUS\$ pour le scénario des BATs, ce qui correspond à une diminution de maximum 20% pour le scénario de BAU par rapport au scénario maximal. En ce qui concerne le creux de PIB qui en résulte jusqu'aux alentours de 2070, celui-ci ne diffère que de 52 à 58 TUS\$, c'est-à-dire une différence de 10%.

Une chose est certaine, si les hypothèses de production énergétique présentées ci-dessus sont suivies, le PIB mondial diminuera jusqu'à un creux aux alentours des années 2060-

2070. Ce creux du PIB, contrairement aux différences entre les trois scénarios, est assez conséquent, vu qu'il s'agit d'une chute de 17 à 25%.

Deux solutions sont donc possible afin de répondre à ce problème de chute du PIB. La première solution comble tout simplement le manque d'énergie par des énergies fossiles, ce qui dérèglera effectivement de manière fulgurante notre système climatique. La deuxième, quant à elle, est de commencer dès aujourd'hui à assurer une transition vers une société en décroissance économique. Cette solution entraîne bien évidemment des questions socioéconomiques qu'il est selon moi grand temps d'aborder.

[...]

Conclusion

Suite à cette étude de l'efficacité énergétique il est raisonnable d'affirmer que le souhait de croissance du PIB que proposent les politiques actuelles afin de répondre aux crises économiques, ne pourra se passer d'une consommation d'énergie accrue. En effet, insérer une limite physique à l'efficacité, tel discuté au chapitre 3, relie le PIB et la consommation énergétique de manière indissociable et les choix politiques en matière de croissance économique devront être pris en connaissance de cause.

J'invite donc vivement le secteur des sciences humaines à étudier comment une société peut tourner de manière durable en choisissant de vivre une diminution du PIB total tout en gardant un accès aux besoins primaires pour chaque être humain.

Si néanmoins j'ose m'avancer un peu dans la sphère des sciences humaines, la politique devra réguler cette consommation, et donc également son marché de production, afin que nous restions dans des limites acceptables pour le climat. Cette diminution de production économique doit être accompagné d'une redistribution plus équitable à travers les populations, ce qui risque d'être plus compliqué pour les pays occidentaux qui vivent actuellement bien au-dessus de cette moyenne durable qui devra un jour devenir la norme pour tous.

Les humains trouveront leur liberté dans le choix de leur panier de consommation, mais avec une consommation absolue qui ne dépasse pas des seuils irréalistes comme c'est actuellement le cas. Car, vu que les consommations relatives de chacune de nos activités, c'est-à-dire leurs intensités énergétiques, se rapprochent de leurs limites inférieures, il est maintenant nécessaire de choisir volontairement de consommer moins et de vivre plus simplement afin de diminuer notre consommation absolue et de sauvegarder, pour les générations à venir, l'environnement que nous connaissons aujourd'hui.

Les choix que nous faisons aujourd'hui créent l'image dont l'histoire se souviendra de nous, ce qui rend nos choix extrêmement importants. Certains, comme la comédienne Audrey Vernon, osent parler de "nouveaux nazis" [40] en imaginant ce que les générations futures diront de notre société, et même si cela paraît un peu trop extrémiste et déplacé, ces mots font réfléchir aux choix à faire aujourd'hui pour ne pas tomber dans ce genre de conflit intergénérationnel dans les décennies à venir.

Oserons-nous donc mettre en place de réels changements politiques afin de préserver un endroit de bon-vivre pour les générations futures ?

Car il s'agit finalement de trouver tout simplement le bon équilibre entre le nombre d'humains sur terre et l'énergie solaire disponible afin de vivre dans les limites physiques de la planète tout en augmentant la qualité de vie de chacun. Pour ceci il faudra réinventer notre emploi du temps tout en diminuant la production totale. Ce qui signifie également une diminution du temps de travail. Mais n'est-ce pas ce que nous désirons tous ?

Travailler moins et profiter plus ...

Mais profiter autrement, effectivement.

Bibliographie

- [1] H. A. ABDERRAHIM, *Lmeca2600 : Génie des réacteurs nucléaires*, (2011).
- [2] R. U. AYRES, J. C. VAN DEN BERGH, R. KÜMMEL, D. LINDENBERGER, AND B. WARR, *The weight of energy in economic growth*, (2009).
- [3] P. BIHOUIX AND B. DE GUILLEBON, *Quel futur pour les métaux ? - raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, (2010).
- [4] P.-M. BOULANGER, *Consommer mieux, autrement, moins*, Institut pour un Développement Durable, (2008).
- [5] BP, *Bp statistical review of world energy*, <http://www.bp.com/statisticalreview> (Juin 2012).
- [6] M. CAMARA, *Croissance économique et impact environnemental : le découplage est-il possible ?*, Congrès interdisciplinaire du développement durable, Thème 4 (2013), pp. 63–82.
- [7] I. CASSIERS AND C. DELAIN, *La croissance ne fait pas le bonheur : les économistes le savent-ils ?*, Regards Économiques, 38 (2006).
- [8] CIA, *Gdp-composition by sector*, <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields>, (2013).
- [9] CLIMACT, *Vers une wallonie bas-carbone en 2050*, pour l'Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC), <http://www.wbc2050.be/> (juin 2013).
- [10] M. DALE, S. KRUMDIECK, AND P. BODGER, *Global energy modelling - a biophysical approach (gemba) part 1 : An overview of biophysical economics*, Ecological Economics, 73 (2012), pp. 152 – 157.
- [11] —, *Global energy modelling - a biophysical approach (gemba) part 2 : Methodology*, Ecological Economics, 73 (2012), pp. 158 – 167.

- [12] J. B. DELONG, *Estimates of world gdp, one million b.c. - present*, Department of Economics, U.C. Berkeley, (1998).
- [13] M. A. DELUCCHI AND M. Z. JACOBSON, *Providing all global energy with wind, water, and solar power, part i : Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials*, Energy Policy, 39 (2011), pp. 1154 – 1169.
- [14] —, *Providing all global energy with wind, water, and solar power, part ii : Reliability, system and transmission costs, and policies*, Energy Policy, 39 (2011), pp. 1170 – 1190.
- [15] O. DESCHUTTER, *Changer la société sans prendre le pouvoir : réussir la transition vers la société durable*, Conférence d'ouverture de la DDay, le 22 avril 2013, (2013).
- [16] EIA, *International energy outlook 2011*, U.S. Energy Information Administration, [http://www.eia.gov/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/ieo/pdf/0484(2011).pdf) (2011).
- [17] G. FIORITO, *Can we use the energy intensity indicator to study 'decoupling' in modern economies ?*, Journal of Cleaner Production, 47 (2013), pp. 465 – 473.
- [18] A. GARCÍA-OLIVARES, J. BALLABRERA-POY, E. GARCÍA-LADONA, AND A. TURIÉL, *A global renewable mix with proven technologies and common materials*, Energy Policy, 41 (2012), pp. 561 – 574.
- [19] GEA, *Global energy assessment ? toward a sustainable future*, <http://www.globalenergyassessment.org/> (2012).
- [20] GIEC, *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2008).
- [21] W. A. HERMANN, *Quantifying global exergy resources*, Energy, 31 (2006), pp. 1685 – 1702.
- [22] IEA, *Worldwide trends in energy use and efficiency - key insights from iea indicator analysis*, International Energy Agency, OECD (2008).
- [23] —, *Energy technology perspectives 2010 - scenarios & strategies to 2050*, International Energy Agency, OECD (2010).
- [24] J.-M. JANCOVICI, *L'homme, l'énergie, la transition et l'député(e)*, Assemblée nationale du développement durable du 6 février 2013.

- [25] H. JEANMART, *Lfsab1302 : Chimie et chimie physique 2, partie thermodynamique*, (2010).
- [26] ———, *Lenvi2007 : Energies renouvelables*, (2012).
- [27] H. JEANMART AND L. POSSOZ, *Le rêve de croissance économique confronté à la réalité des limites physiques et technologiques de l'énergie*, Congrès interdisciplinaire du développement durable, Thème 1 (2013), pp. 27 – 39.
- [28] D. J. C. MACKAY, *L'énergie durable - pas que du vent.*, De Boeck, ISBN 978-2-8041-6895-7. Disponible gratuitement sur le Web à l'adresse www.withouthotair.com-translations.html ou www.amides.fr (2012).
- [29] G. N. MANKIW AND M. P. TAYLOR, *Principes de l'économie- adaptation européenne*, Traduction d'Élise Tosi, (2010).
- [30] D. J. MURPHY AND C. A. S. HALL, *Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth*, Ecological Economics Reviews, Ann. N.Y. Acad. Sci. 1219 (2011), pp. 52–72.
- [31] S. NÉMOZ AND G. WALLENBORN, *Comment comprendre les effets rebonds dans la consommation domestique d'énergie ?*, Regards sur la crise écologique : Pour une socio-anthropologie de l'environnement, 2 (2012).
- [32] M. PAPALEXANDRIS, *Lmeca2160 : Combustibles, combustion et transfert de chaleur*, (2003).
- [33] V. SMIL, *Energy in world history*, (1994).
- [34] ———, *Energy transitions : history, requirements, prospects*, (2010).
- [35] P. SQUARZONI, *Saison brune*, (2012).
- [36] J. E. STIGLITZ, A. SEN, AND J.-P. FITOUSSI, *Rapport de la commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, www.stiglitz-sen-fitoussi.fr (2008).
- [37] G. TURNER, *A comparison of the limits to growth with thirty years of reality*, Socio-Economics and the Environment in Discussion, CSIRO Working Paper Series, (2008).
- [38] M. TØNNESEN, *The statistician's guide to utopia : The future of growth*, Trames, 12(62/57), 2 (2008), pp. 115–126.

- [39] UNITED-NATIONS, *World population to 2300*, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, (2004).
- [40] A. VERNON, *Serons-nous les nouveaux nazis ?*, l'Humanité, (20 Septembre 2012).
- [41] S. WEBER AND R. HORNUNG, *La fausse promesse d'une énergie propre*, [http ://www.arte.tv/guide/fr/046346-000/la-fausse-promesse-d-une-energie-propre](http://www.arte.tv/guide/fr/046346-000/la-fausse-promesse-d-une-energie-propre), [https ://www.youtube.com/watch?v=_bNqQsl5nCA](https://www.youtube.com/watch?v=_bNqQsl5nCA) (2013).
- [42] J. WELKER, *The income approach and the expenditure approach to measuring the gdp of a nation*, [http ://www.econclassroom.com/?p=2632](http://www.econclassroom.com/?p=2632), by Welker's Wikinomics (2011).
- [43] R. WILKINSON AND K. PICKETT, *The spirit level : Why equality is better for everyone*, [http ://www.equalitytrust.org.uk/](http://www.equalitytrust.org.uk/), (2010).
- [44] WORLD-BANK, *World databank*, [http ://data.worldbank.org/](http://data.worldbank.org/), (2 juin 2013).