

Transition énergétique et (dé)croissance économique

Ce numéro spécial de Regards Economiques croise les regards d'ingénieurs et d'économistes pour étudier les possibles impacts de la transition énergétique sur la croissance économique. Un effet «localisation» induit par l'expansion des énergies solaire et éolienne et susceptible de réduire leur taux de retour énergétique (TRE) futur est mis en évidence. Les possibles conséquences macroéconomiques de cette baisse du TRE sont analysées, avec une attention particulière pour les mécanismes susceptibles de favoriser ou non une transition «en douceur», c'est-à-dire sans décroissance de l'économie.

Page 2 **Introduction générale**

Page 5 **Vers un monde 100 % renouvelable ?**
de Elise Dupont, Hervé Jeanmart et Louis Possoz

Page 17 **Transition énergétique et croissance économique :
la transition peut-elle s'opérer en douceur ?**
de Jean-François Fagnart et Marc Germain

Page 24 **Conclusion générale**

Page 25 **Glossaire**

Introduction générale¹

Le présent numéro de *Regards Economiques* porte sur la question de la transition énergétique (TE) et sur ses possibles impacts sur la croissance économique. Cette transition peut être définie comme la transformation des modes actuels de production et de consommation d'énergie. L'angle d'analyse ne concerne pas un pays ou une région particulière mais se situe à un niveau global.

Il existerait différents grands moyens pour assurer la TE. Le premier concerne à la fois la production et la consommation. Il s'agirait d'augmenter l'efficacité énergétique^{*2}, tant au niveau de la production des entreprises que de la consommation des ménages, en d'autres mots, de produire et de consommer autant de biens et services avec moins d'énergie. Un exemple emblématique consiste à améliorer l'isolation des immeubles. Le deuxième moyen concerne spécifiquement le secteur producteur d'énergie et viserait à remplacer les ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz) par des ressources renouvelables (soleil, vent et biomasse principalement). Enfin, le troisième moyen concerne plutôt la consommation et viserait à réduire les besoins énergétiques en modifiant les habitudes de vie, par exemple par l'usage à grande échelle des transports publics à la place de l'automobile, ou encore par plus de sobriété dans l'usage des transports.

Ces dernières années, la question de la TE a fait l'objet de nombreux articles, tant dans les médias que dans la littérature scientifique. Elle est en effet devenue une nécessité majeure pour différentes raisons. La plus importante est liée au réchauffement climatique et à ses origines anthropiques, que (pratiquement) plus personne ne conteste. Lutter contre ce réchauffement suppose en effet une réduction importante et suffisamment rapide (à l'horizon 2050) des émissions de CO₂ induites par la combustion des énergies fossiles. Une deuxième raison découle des différentes pollutions induites par les usages des énergies fossiles (à l'image des émissions polluantes dues au transport automobile), et de leurs conséquences néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Une troisième raison avancée par certains experts (mais qui fait moins l'unanimité) est liée au renchérissement attendu des énergies fossiles, induit par leur accessibilité de plus en plus difficile³.

Au delà de ces trois raisons, dans certains pays ou régions du monde disposant de peu de ressources fossiles (l'Europe notamment), la TE est supposée accroître l'indépendance énergétique. De manière encore plus ponctuelle (à l'exemple de l'Allemagne et de la Belgique), la TE devrait également assurer la sortie du nucléaire, vu les différents risques liés à l'emploi de cette énergie (problèmes de sécurité et de gestion des déchets).⁴

La position dominante (la plus partagée) concernant la TE est qu'elle est possible dans un horizon de quelques décennies *sans remise en cause de la croissance économique*. Une telle transition serait permise par (i) l'augmentation de l'efficacité énergétique (comme mentionné dans le deuxième paragraphe), (ii) le pro-

¹ Les auteurs remercient Vincent Bodard, Muriel Dejemeppe, David de la Croix et Vincent van Steenberghe pour leurs remarques et commentaires sur des versions antérieures du présent article. Les auteurs restent bien entendu seuls responsables de son contenu.

² Certains termes techniques, indiqués par un astérisque, sont définis dans un glossaire en fin de numéro (pages 25-26).

³ L'inquiétude de ces experts concerne avant tout le pétrole, vu (i) son caractère stratégique dans certains secteurs d'activité (transports, chimie) et (ii) qu'il est sensiblement moins abondant que les autres ressources fossiles (charbon et gaz).

⁴ Comme ce numéro porte sur la TE à un niveau global, l'énergie nucléaire ne sera pas abordée plus avant vu sa faible contribution à la satisfaction des besoins énergétiques à l'échelle mondiale.

... Introduction générale

grès technique augmentant la qualité des moyens de production énergétique (par exemple les panneaux solaires), et (iii) la diminution des coûts de fabrication de ces mêmes moyens (notamment via l'exploitation des économies d'échelle* permises par la production en grande série).

Au sein de cette position dominante, il existe des nuances. Certaines études proposent des scénarios où la TE s'accompagne d'une croissance de la consommation énergétique. Le développement des ressources renouvelables devrait alors non seulement remplacer les ressources fossiles mais également permettre la poursuite de la croissance énergétique. D'autres études présentent des scénarios qui reposent au contraire sur la possibilité d'un découplage* absolu entre production de biens et services et consommation d'énergie. Dans ce contexte, la croissance économique s'accompagnerait d'une décroissance de la consommation d'énergie. Cette décroissance serait rendue possible par le progrès technique mais aussi par des comportements plus sobres au niveau des usages énergétiques.

La position présentée dans les paragraphes précédents est dominante mais ne fait pas l'unanimité. Certains auteurs émettent des doutes sur la possibilité de poursuivre la croissance économique pendant la TE. Leurs arguments sont les suivants :

a) Un des grands facteurs facilitant la TE, à savoir l'augmentation de l'efficacité énergétique, est un processus déjà ancien. Exceptés quelques secteurs clés comme le logement, les «gisements» (ou potentiels) d'économie d'énergie les plus importants seraient déjà exploités, au moins dans les pays développés. Ils resteraient de nombreux gisements dans les pays en développement, notamment dans le domaine de l'utilisation efficace de la biomasse, mais ceux-ci porteraient sur des quantités d'énergie faibles. Leur impact sur l'efficacité énergétique mondiale ne pourrait donc être que limité. Les pays émergents présenteraient des situations plus contrastées avec des gisements déjà exploités portant sur d'importantes consommations d'énergie (comme dans les pays développés) et des secteurs où des progrès importants seraient encore possibles mais portant sur des quantités plus faibles (à l'image des pays en développement).

b) Nombre d'études concluant à la faisabilité de la TE sans remise en cause de la croissance économique, concernent un pays, voire un continent (par exemple l'Europe). La TE pourrait alors être facilitée par différents mécanismes sur lesquels il est impossible de compter au niveau mondial : des importations directes d'énergie (rendues nécessaires par exemple par les problèmes d'intermittence propres aux ressources renouvelables), des délocalisations d'activités énergivores (à l'exemple de la sidérurgie), la spécialisation dans la production de biens et services peu intensifs en énergie, exportés en échange de biens intensifs en énergie. En lien avec le dernier facteur mentionné, ces études posent la question de la prise en compte de l'énergie grise* dans la consommation énergétique du pays ou de la région étudiée.

c) Malgré le progrès technique, on n'a pas observé jusqu'ici de baisse significative et durable de la consommation énergétique mondiale. Ceci s'expliquerait notamment par l'augmentation des besoins dans les pays émergents et en développement mais aussi par un effet d'équilibre général appelé effet rebond*. Cet effet désigne le fait que les économies d'énergie induites par l'augmentation de l'efficacité énergétique d'un équipement (ménager ou industriel) sont (au moins) partiellement neutralisées, soit parce que ces économies sont réinvesties ailleurs (accroissant ainsi la consommation d'énergie dans d'autres domaines), soit parce qu'étant devenu plus efficace, l'équipement est plus utilisé et/ou son gabarit est augmenté⁵.

⁵ Un exemple classique est fourni par les moteurs automobiles. Les progrès techniques ont permis des économies sensibles de carburants et d'émissions polluantes à usage constant. Ces économies ont cependant été largement compensées par une augmentation du nombre de kms parcourus ainsi que par l'usage de véhicules plus lourds (parce que plus puissants et mieux équipés), et donc plus énergivores. Pour une présentation plus complète de l'effet rebond, voir par exemple : <http://quelfutur.org/Effet-rebond>.

... Introduction générale

d) Des facteurs limitants seraient susceptibles d'entraver le développement des énergies renouvelables et des nouvelles technologies. Par exemple, la production de ces technologies exige de multiples métaux (à l'exemple des ampoules LED qui nécessitent une cinquantaine de métaux différents difficiles à recycler). Or ceux-ci proviennent de ressources non renouvelables dont les coûts d'exploitation augmentent avec le recours à des gisements toujours moins accessibles et/ou moins concentrés.

e) Le taux de retour énergétique (TRE)*, un indicateur très utilisé en science de l'énergie pour mesurer l'efficacité du secteur énergétique, serait susceptible de diminuer au niveau global, et ce pour deux raisons majeures. D'une part, le TRE des ressources fossiles baisserait avec le fait que ces dernières deviennent de plus en plus difficiles à extraire au fur et à mesure de leur exploitation. D'autre part, le TRE des ressources renouvelables serait (sensiblement) plus faible que les niveaux historiques atteints par le TRE des ressources fossiles. Facteur aggravant, malgré le progrès technique, le TRE des ressources renouvelables pourrait diminuer dans le futur, à cause de la moindre «qualité» des sites pouvant recevoir les installations supplémentaires exploitant ces ressources (éoliennes et panneaux solaires).

f) Au niveau macroéconomique, la baisse du TRE global mentionnée au point précédent se traduirait par l'exacerbation des besoins en capital productif du secteur énergétique (c'est-à-dire en installations capables de produire de l'énergie). Cette exacerbation pourrait engendrer un effet d'éviction du secteur final (produisant les biens de consommation et les biens d'équipements) par le secteur énergétique au niveau de l'affectation de l'investissement. Cet effet pèserait sur la croissance économique et, s'il était suffisamment fort, la TE pourrait s'accompagner d'une phase de contraction (ou de décroissance) prolongée de l'économie.

Vu l'ampleur du sujet, le présent numéro de *Regards Economiques* n'a pas pour objectif de développer tous les aspects de la TE mentionnés ci-dessus, mais seulement certains d'entre eux. La structure de ce numéro est en deux parties. La première contribution, écrite par Elise Dupont, Hervé Jeanmart et Louis Possoz, s'interroge sur la possibilité d'une transition vers une économie mondiale dont les besoins énergétiques seraient assurés à 100 % par le renouvelable. Ce faisant, elle revient sur les arguments (a), (b) et (e) énumérés ci-avant. Une attention particulière est accordée aux évolutions attendues du TRE des sources éolienne et solaire, ainsi que sur leur potentiel. La deuxième contribution, écrite par Jean-François Fagnart et Marc Germain, approfondit l'effet d'éviction mentionné au point (f). Les mécanismes susceptibles de favoriser une transition «en douceur», ou au contraire d'engendrer une phase de décroissance de l'économie sont mis en évidence et expliqués. La conclusion résume les principaux enseignements de ce numéro.

.....



Vers un monde 100% renouvelable ?

Elise Dupont

Hervé Jeanmart

Louis Possoz

1. Énergie renouvelable et (dé)croissance économique

Actuellement, la contribution des énergies renouvelables, bien qu'en forte croissance, reste au total assez modeste. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, en 2014 et au niveau mondial, la part des énergies renouvelables dans l'énergie primaire* était de 14,1 %, dont 10,3 % issus de la biomasse (principalement utilisée pour produire de la chaleur dans les pays en développement), 2,4 % d'origine hydroélectrique et seulement 1,3 % issus de sources renouvelables dites modernes (éolien, solaire et géothermie).

Ce développement émergent des énergies renouvelables devrait être une occasion de s'interroger sur leur réel potentiel et sur leur capacité, tant à se substituer aux énergies fossiles, qu'à satisfaire l'augmentation des besoins liée à la croissance économique et démographique. Dans le discours scientifique dominant, relayé massivement par les médias et la classe politique, la transition vers un monde 100 % renouvelable, tout en maintenant une croissance économique suffisante, reste tout à fait envisageable d'un point de vue technique. Resterait dès lors à mettre en place les politiques adéquates et à faire les investissements nécessaires dans les énergies renouvelables et dans l'amélioration de l'efficacité énergétique*. Il est très rare que la contrainte des limites, physiques ou technologiques, soit abordée dans la littérature scientifique, tant par les disciplines des sciences appliquées que par celles des sciences économiques ou encore dans les scénarios politiques de transition. Or cette contrainte impose que la réponse aux problèmes climatique et énergétique combine progrès technologique et changements profonds institutionnels et sociaux.

Ces dernières années, les rapports présentant des scénarios 100 % renouvelables à l'horizon 2050 se multiplient (e.g. Jacobson et Delucchi, 2011, Jacobson *et al.*, 2017, et négaWatt, 2017). Les scénarios présentés, qui postulent tous une poursuite de la croissance économique, peuvent être classés en deux catégories : ceux qui supposent simultanément une augmentation de la consommation d'énergie, et ceux qui visent à entrer dans une ère de découplage* absolu, c'est-à-dire décroissance de la consommation d'énergie concomitante avec une hausse du PIB.

1.1. Croissance économique avec augmentation de la consommation d'énergie

Ces scénarios supposent que la substitution totale des énergies fossiles par des alternatives renouvelables est technologiquement et économiquement possible. Jacobson et Delucchi (2011) montrent, dans une étude largement référencée dans la littérature, comment satisfaire tous les besoins énergétiques mondiaux avec les énergies éolienne, solaire et hydraulique, et ce à un coût similaire au prix actuel de l'énergie. Selon eux, les barrières à la transition énergétique seraient donc uniquement politiques et sociales. Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) conclut également qu'il y a suffisamment d'énergie renouvelable et de potentiel de développement technologique pour construire un système énergétique sans carbone, et il propose donc des solutions politiques. Le WWF et Ecofys proposent des solutions similaires, et estiment que la demande mondiale en 2050 pourrait être similaire à celle de 2000 grâce à l'utilisation d'électricité pour tous les besoins énergétiques (pompes à chaleur, voitures électriques, etc.) et à une meilleure efficacité énergétique.

1.2. Croissance économique et découplage absolu

D'autres imaginent plutôt une croissance économique basée sur une production industrielle totalement différente, une autre manière de se loger, de se déplacer, de s'alimenter, de se divertir... Un mode de vie qui n'utiliserait que peu de béton, d'acier, de produits chimiques ou d'électricité. Un mode de vie qui, croissance économique oblige, s'appuierait sur d'autres produits et services, peu matériels et peu énergivores. Le conseil européen de l'énergie renouvelable estime qu'une Europe 100 % renouvelable en 2050 est possible, mais que la demande en énergie devra être réduite de 40 %. Un tel scénario serait une réponse non seulement aux problèmes environnementaux mais également aux problèmes sociaux, avec la création de 6,1 millions d'emplois dans le secteur de l'énergie d'ici 2050. Un scénario similaire a été imaginé par négaWatt (2017) pour la France, avec une réduction de la demande énergétique de 50 % d'ici 2050. Cette réduction serait rendue possible pour 60 % grâce à la sobriété et 40 % grâce à l'efficacité énergétique. Cependant, ces scénarios ne précisent pas quels pourraient être ces produits ou services «vertueux» qui permettraient une poursuite de la croissance économique tout en dépendant nettement moins de l'énergie⁶.

1.3. Les limites physiques à la croissance économique

D'autres scientifiques mettent en doute la faisabilité de ces scénarios de croissance économique. D'une part, l'utopie d'un découplage absolu, est remise en cause par le net couplage entre énergie et PIB constaté jusqu'à ce jour à l'échelle mondiale (voir Section 2). La poursuite de la croissance économique ne serait dès lors possible qu'en continuant à augmenter notre consommation d'énergie. D'autre part, des études montrent que la prise en compte des limites physiques contraint fortement la quantité globale d'énergie renouvelable que l'on peut mettre en œuvre (e.g. Moriarty, 2016, Miller, 2012, et Mediavilla, 2013). Ces limites sont illustrées à la Section 3.

2. Lien entre PIB et consommation d'énergie

2.1. Lien physique

Pour l'ingénieur, le couplage très serré entre activité économique et consommation d'énergie paraît assez évident. Toute activité consiste à transformer des inputs en outputs. Or, transformer, c'est changer l'état de la matière (en ce compris sa position ou sa vitesse) et l'énergie est la grandeur physique associée au changement d'état. La quantité d'énergie mise en œuvre est proportionnelle à l'importance du changement d'état. Stocker des informations, offrir un service en ligne, fondre, découper, plier, assembler, transporter, chacune de ces opérations impose, par les lois de la physique, la consommation d'une certaine quantité d'énergie que le progrès technique tend à minimiser. Il est donc naturel pour le physicien de penser que l'activité économique est fondamentalement liée à la consommation d'énergie, avec un potentiel de découplage limité.

2.2. Le progrès technique

Un découplage relatif entre consommation d'énergie et PIB est possible via l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés et processus suite au progrès technique. Les lampes LED sont un bon exemple. Cependant, rappelons que la progression de l'efficacité énergétique ne date pas d'aujourd'hui. Elle a commencé dès les débuts de la révolution industrielle et s'est poursuivie depuis, avec une intensité fluctuante. Toutefois, au fur et à mesure de la progression, les progrès nouveaux deviennent de plus en plus faibles et difficiles à obtenir car la technique s'approche de limites physiques infranchissables.

⁶ Le développement d'Internet est un bon contre-exemple puisqu'il n'a permis aucun découplage malgré une apparente dématérialisation.

... Le progrès technique

A titre d'exemple, les moteurs de voiture actuels sont nettement plus performants que les moteurs du début du XX^{ème} siècle. C'est le résultat des nombreuses recherches menées dans ce domaine. Après des débuts en mode mineur à la fin du XIX^{ème} siècle, les progrès ont été notables au XX^{ème} siècle grâce aux gains facilement accessibles et aux budgets de recherche croissants. Les gains sont devenus de plus en plus faibles et finalement marginaux en ce début de XXI^{ème} siècle malgré des budgets de recherche croissants car la technologie s'approche des limites physiques (ici le second principe de la thermodynamique).

Plus généralement, l'efficacité de nombreuses technologies majeures évolue en forme de sigmoïde. Beaucoup sont proches de leurs limites physiques et montrent un effet de saturation suite aux acquis des nombreuses recherches déjà menées par le passé pour en accroître l'efficacité. On peut citer les centrales électriques thermiques, la production de ciment ou d'acier ou encore les éoliennes dont la limite physique de conversion imposée par le théorème de Betz est quasiment atteinte par les machines actuelles.

A noter qu'il existe certains domaines pour lesquels des technologies ou procédés plus économes en énergie existent mais n'ont pas encore été mis en œuvre à large échelle car le renouvellement des installations est lent suite à de longues périodes d'amortissement. L'exemple le plus courant est le chauffage domestique qui représente une consommation énergétique importante pour les ménages. Celle-ci pourrait être fortement réduite voire supprimée sans affecter le confort des habitants mais elle demande un renouvellement, ou à tout le moins une rénovation profonde, de l'habitat existant y compris de maisons construites dans un passé récent. Ces «gisements» d'économie d'énergie devraient permettre un certain découplage dans le futur.

2.3. Lien historique

La Figure 1 illustre l'évolution du PIB⁷ mondial (en dollars US 2010 constants⁸) en regard de la consommation mondiale d'énergie exprimée en Exajoule (EJ)*. Sauf un bref épisode autour de 1980, elle montre qu'il n'y a pas eu de découplage *absolu* entre ces deux variables depuis 50 ans; la hausse du PIB s'est accompagnée de celle de la consommation d'énergie.

Un premier constat s'impose : consommation d'énergie et PIB évoluent en étroite corrélation. La pente de la droite indique cependant une croissance du PIB un peu plus rapide que celle de l'énergie. Sur 50 ans, il y a donc eu un certain découplage entre l'évolution du PIB et celle de la consommation d'énergie. L'efficacité énergétique de l'économie globale⁹ s'est donc améliorée (passant d'environ 90 \$/GJ à environ 140 \$/GJ).

De manière plus précise, on peut décomposer cette évolution en différents segments. Jusqu'au début des années 70', il n'y a pratiquement pas de progression de l'efficacité énergétique.¹⁰ Par la suite, les deux chocs pétroliers ont provoqué, prin-

⁷ Les méthodes actuelles de comptabilité du PIB mondial et de consommation mondiale d'énergie fournissent des données à partir de 1965. S'il existe des données plus anciennes, elles ont été reconstruites à partir de différentes sources statistiques parcellaires, et avec des méthodes d'évaluation différentes (Bolt, 2014). Nous nous cantonnons donc aux données «modernes». Les données utilisées proviennent de la base de données de la Banque Mondiale. Pour l'énergie, les données sont celles publiées par la société BP (en libre accès). Celles publiées par l'AIE ou par l'ONU ne sont pas différentes.

⁸ Les conversions de monnaie sont effectuées au taux du marché – MER. Par contraste, un nombre croissant de modèles économiques du GIEC analysent le couplage en exprimant le PIB en parité du pouvoir d'achat (PPA), arguant que cette méthode reflète mieux les niveaux de vie des habitants. Cependant, les marchés de l'énergie et des combustibles fossiles étant mondialisés, les échanges s'effectuent pour l'essentiel au cours du marché, indépendamment du niveau de vie des habitants. Il semble donc légitime d'utiliser le MER pour examiner la relation entre l'évolution du PIB et celle de l'énergie.

⁹ L'efficacité énergétique de l'économie globale est, sur la Figure 1, la pente d'une droite liant les données d'une année particulière à l'origine du graphe.

¹⁰ Sur la Figure 1, les données sont alignées sur une droite passant par l'origine du graphe.

... Lien historique

cipalement dans le monde occidental, une sensibilisation aux économies d'énergie et, dans un contexte de ralentissement marqué de la croissance économique, la disparition ou une mise à niveau technologique des activités les plus dépendantes de l'énergie. L'efficacité énergétique a continué à progresser dans les années 90' suite à l'effondrement de l'Union Soviétique, et à la disparition (ou la mise à niveau technologique progressive) de la plupart des industries peu performantes du bloc communiste. Depuis 2000, on observe que PIB et consommation d'énergie progressent à nouveau de concert suite au développement des pays émergents et malgré l'avènement des TIC (Technologies de l'information et de la communication).

Le fait que le rapport entre PIB et consommation énergétique n'est pas constant (comme pourrait le faire croire un examen superficiel de la Figure 1) est illustré à la Figure 2. Construite à partir des mêmes données que la Figure 1, elle montre une baisse continue de l'intensité énergétique* du PIB mondial depuis 50 ans allant d'environ 11 MJ/\$ en 1965 à environ 7 MJ/\$ en 2015. Il y a donc eu un découplage *relatif* entre PIB et consommation énergétique pendant cette période avec un ralentissement de ce découplage depuis 2000.

Figure 1. Evolution du PIB mondial en regard de la consommation mondiale d'énergie

Sources : Banque Mondiale (PIB) et BP (consommation d'énergie).

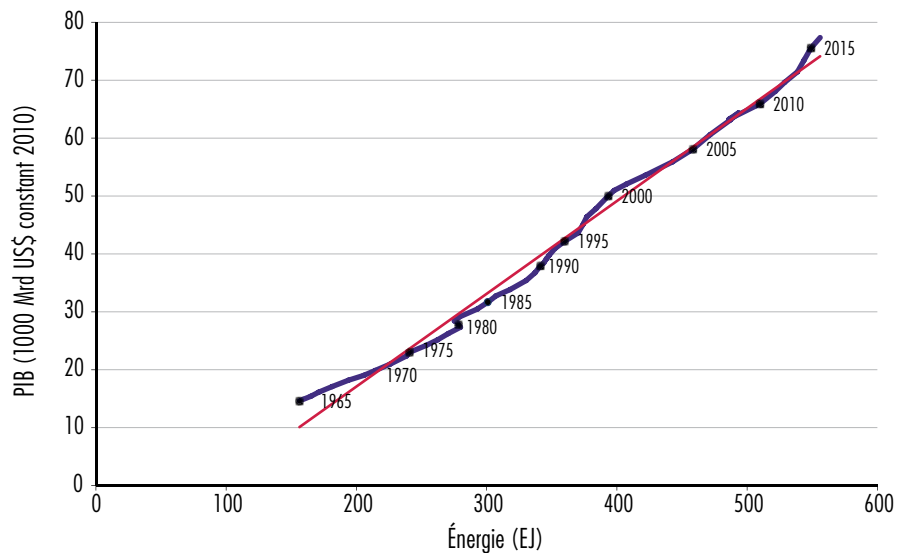
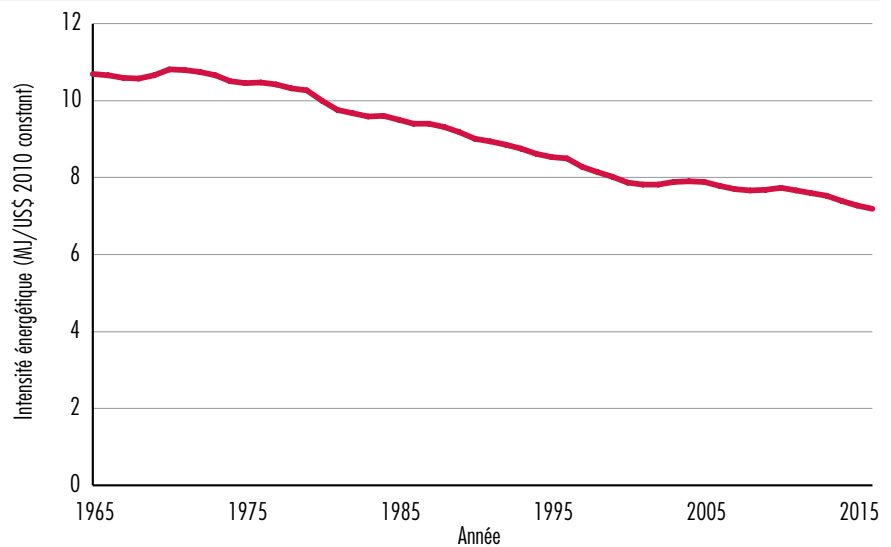


Figure 2. Décroissance temporelle de l'intensité énergétique (exprimée ici en MJ par US\$)

Sources : Banque Mondiale (PIB) et BP (consommation d'énergie).



Note : l'intensité énergétique est l'inverse de l'efficacité énergétique (qui elle est croissante).

2.4. Impression de découplage dans les pays développés

L'UE, des agences internationales ainsi que différentes études, la plupart centrées sur un pays développé membre de l'OCDE, concluent à un découplage relatif significatif, voire absolu, entre PIB et énergie (voir EEA, 2015). Ce constat, en contradiction avec le couplage mondial constaté ci-avant, permet aux auteurs de suggérer que c'est leur niveau de développement plus avancé qui permet à ces pays d'entrer dans le monde vertueux du découplage.

On peut cependant porter un regard plus pragmatique sur ce découplage apparent. En effet, en matière d'énergie, les chiffres utilisés par ces études sont ceux rapportés par les principales sources internationales : ONU, IEA, EIA¹¹ ou la société BP. Si ces chiffres sont analogues, ils partent généralement du principe que l'énergie consommée par un pays (ou une région) est celle consommée sur son territoire national. Cette approche, la plus courante pour évaluer la consommation d'énergie par tête, consiste à ajouter à l'énergie extraite du territoire national¹² le solde des échanges internationaux d'énergie. On comptabilise ainsi toute l'énergie qui alimente l'économie d'un pays, celle qui fait "tourner" les activités locales. Cette méthode comptable reflète donc la structure économique du pays et on parlera d'énergie à la production*.

Une approche différente pour évaluer la consommation d'énergie *per capita* consiste à déterminer la quantité moyenne d'énergie sous-tendant le mode de vie d'un habitant, c'est-à-dire l'énergie qui a été nécessaire à la production de tous les biens et services consommés, en sus de la consommation directe d'énergie. Cette approche est en pratique nettement plus complexe que la première, car elle impose de suivre le parcours dans l'économie de tous les biens intermédiaires et finaux pour leur affecter l'énergie consommée à chaque étape de leur production. On parlera alors d'énergie à la *consommation**. Cette autre manière de calculer la dépendance énergétique permet alors de montrer que différents pays développés, qui pensent avoir diminué leur consommation d'énergie l'ont en réalité vu croître. L'énergie à la consommation inclut donc l'énergie des produits importés. L'énergie associée à la production de verre au Maghreb pour l'exportation vers l'Europe sera donc à charge du Maghreb dans l'approche dominante mais, plus logiquement, à charge de l'Europe dans une comptabilité à la consommation.

En résumé, suite à la délocalisation progressive des secteurs et sous-secteurs industriels gros consommateurs d'énergie, la méthode *énergie à la production* donne l'impression, dans la plupart des pays développés, d'une efficacité énergétique croissante et d'une dépendance énergétique plus faible que celle des autres pays¹³.

3. Les limites physiques des énergies renouvelables

Les scénarios qui se basent sur un découplage absolu semblent peu réalistes au vu des évolutions observées jusqu'ici, il faudrait donc que les énergies renouvelables puissent couvrir l'augmentation de la consommation d'énergie liée à la croissance économique. Malheureusement, lorsqu'on prend en compte les limites physiques de disponibilité et d'accessibilité¹⁴ des ressources renouvelables, on constate que vouloir soutenir le mode de vie actuellement observé dans les pays développés,

¹¹ International Energy Agency (IEA); US – Energy Information Agency (EIA), qui comptabilise l'énergie en exotiques *quadrillions* de BTU.

¹² L'énergie extraite du territoire national comprend, hors les combustibles fossiles extraits de ce territoire, l'électricité qui y est produite à partir de l'énergie nucléaire, hydraulique, éolienne, photovoltaïque, etc.

¹³ Si cette méthode reflète très mal le mode de vie des habitants de ces pays développés, elle leur fournit par contre un argument important dans les discussions politiques sur la responsabilité climatique.

¹⁴ Dans le présent contexte, la disponibilité est la quantité totale d'énergie renouvelable qui est disponible sur terre (le rayonnement solaire incident, les ressources géothermiques...). La difficulté de mettre en œuvre cette énergie, c'est-à-dire la prise en compte des processus de transformation et de transport de cette énergie théoriquement disponible, relève de l'accessibilité.

sans même envisager de l'étendre au reste du monde, avec un système énergétique largement décarboné est tout aussi utopique (sauf en considérant des importations massives d'énergie grise).

3.1. Il faut de l'énergie pour produire de l'énergie

Afin de mettre en évidence ces limites physiques d'accessibilité des ressources, le concept d'analyse de l'énergie nette* (connu sous l'acronyme NEA, Net Energy Analysis) est utilisé depuis les années 70'. Ce concept part du simple constat que tout processus de transformation d'énergie requiert de l'énergie. Il faut investir de l'énergie, sous forme directe ou indirecte (comme par exemple dans les équipements auxiliaires), pour pouvoir mettre en œuvre de l'énergie et la rendre disponible à la société. Dans le cas de combustibles fossiles il s'agit de l'énergie continuellement mise en œuvre pour extraire, transporter et transformer ces combustibles en énergie finale*. Dans le cas des énergies renouvelables, comme l'éolien et le solaire, la plus grande partie de l'investissement énergétique se fait en général avant de commencer à produire de l'électricité, pour la fabrication des équipements et l'installation sur site. La différence entre l'énergie brute produite et l'énergie qui a dû être investie est ce qu'on appelle l'énergie nette. L'énergie nette est l'énergie qui va alimenter le reste de l'économie pour satisfaire avant tout les besoins de base. L'excédent, s'il en reste, peut alors être utilisé pour des activités de consommation ou d'investissement. La différence entre l'énergie brute et l'énergie nette représente l'autoconsommation du secteur de l'énergie, et n'est pas disponible pour alimenter les activités économiques.

Après l'émergence dans les années 70 des concepts d'énergie nette et de *taux de retour énergétique (TRE)** (voir l'encadré ci-dessous), l'intérêt pour ce type d'analyse a rapidement chuté. En effet, à cette époque, les combustibles fossiles qui étaient encore abondants et facilement accessibles présentaient un TRE élevé, de l'ordre de 50. C'est seulement lorsque les TRE ont commencé à chuter que la question du coût énergétique a refait surface, en particulier pour le pétrole. En effet, les réserves de pétrole facilement accessibles commençant à s'épuiser, il est devenu en moyenne plus coûteux énergétiquement de l'extraire, ce qui a entraîné un impact négatif sur le TRE. Ce pétrole est aussi souvent de moins bonne qualité que celui extrait des gisements historiques et son coût de transformation croît également.

3.2. Le coût énergétique des énergies renouvelables

Aujourd'hui, les études destinées à évaluer le TRE d'un projet énergétique donné sont devenues plus courantes. Si l'on peut proposer une estimation assez fiable de l'énergie brute qui pourra être délivrée sur la durée de vie du projet, l'analyse qui consiste à évaluer l'énergie qui devra être investie est nettement plus complexe. En effet, l'énergie investie l'est de façon tant directe qu'indirecte, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au démantèlement du site en fin de vie. Le calcul se fait en général en suivant des méthodes d'analyse de cycle de vie, et une attention particulière doit être portée aux frontières considérées pour l'analyse. Certaines études vont jusqu'à prendre en compte l'énergie investie pour nourrir les travailleurs, tandis que d'autres négligent des intrants énergétiques essentiels. Un travail d'uniformisation est en cours afin de rendre les résultats de ces analyses plus directement comparables.

Force est alors de constater que l'éolien et le solaire, qui sont considérés comme les alternatives principales aux combustibles fossiles, présentent actuellement des TRE plus faibles que les TRE historiques des combustibles fossiles (Murphy et Hall, 2010). En effet ce type d'énergie, inévitablement décentralisée, demande des infrastructures conséquentes par comparaison avec, par exemple, les gisements de pétrole facilement accessibles des années 1930. C'est ce que l'on observe sur la Figure 4 : les TRE historiques des combustibles fossiles étaient significativement plus grands que les TRE actuels des alternatives renouvelables.

Taux de retour énergétique : historique et impact sur le niveau de vie

Le Taux de Retour Énergétique (TRE), plus connu sous ses acronymes anglais EROI (Energy Return on Investment) ou ERoEI (Energy Returned on Energy Invested) est un indicateur largement utilisé¹⁵ afin de mesurer le niveau d'autoconsommation d'un processus de transformation d'énergie. Il est défini par le rapport entre l'énergie brute produite et l'énergie investie pour permettre cette production. Ce nombre adimensionnel est une image de la qualité et de la durabilité d'un processus de transformation d'énergie. Il permet de comparer facilement entre elles différentes sources d'énergie, et donc d'analyser la soutenabilité, y compris économique, des alternatives aux combustibles fossiles.

$$\text{TRE} = \text{Energie Brute Produite} / \text{Energie Investie}$$

$$\text{Energie Nette} = \text{Energie Brute Produite} - \text{Energie Investie}$$

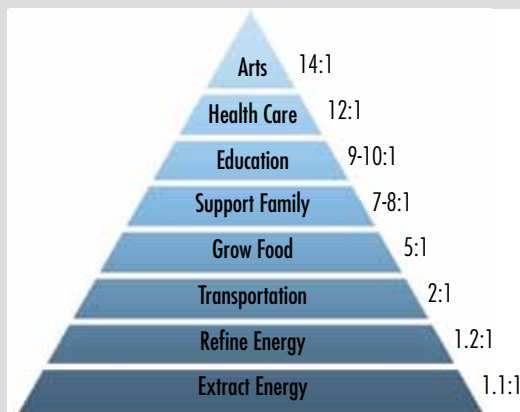
$$= \text{Energie Brute Produite} \times (1 - 1 / \text{TRE})$$

Plus la société est dite «évoluée», plus son TRE doit être important. En effet, avec un faible TRE, une société est uniquement capable de satisfaire ses besoins de base. La faible quantité d'énergie nette disponible est dans ce cas utilisée pour les besoins alimentaires. C'est le cas de certaines populations rurales en Afrique qui dépendent pour leurs besoins énergétiques de la collecte de bois qui est principalement utilisé pour la cuisson. L'ensemble de la force de travail est alloué à l'énergie et l'alimentation. Avec un TRE plus important, une société peut entreprendre d'autres activités et consacrer de l'énergie, du capital et du travail à la mise en place d'un système éducatif, de soins de santé et de loisirs. Des études permettent de mettre en évidence le lien entre le TRE d'un pays et son niveau de développement.

En se basant sur ces considérations, Lambert et al. (2014) ont proposé une pyramide des besoins énergétiques (voir Figure 3), par analogie à la pyramide des besoins de Maslow. Les différents échelons de la pyramide sont atteints pour des TRE de plus en plus élevés. Par exemple, pour développer un système de santé, une société a besoin d'un TRE de 12 alors que la production alimentaire nécessite un TRE de 5. Pour satisfaire un échelon, il faut que tous les échelons inférieurs soient satisfaits d'où l'augmentation du TRE avec les échelons. Par exemple, pour pouvoir développer l'éducation ou les soins de santé, il faut avant tout avoir suffisamment d'énergie disponible pour l'extraire, la transformer, la transporter et assurer les besoins alimentaires. Autrement dit, plus une société mobilise facilement de l'énergie (haute valeur du TRE), plus elle peut consacrer de l'énergie à des activités moins essentielles.

Figure 3. Pyramide des besoins énergétiques

Source : pyramide adaptée de Lambert et al. (2014).



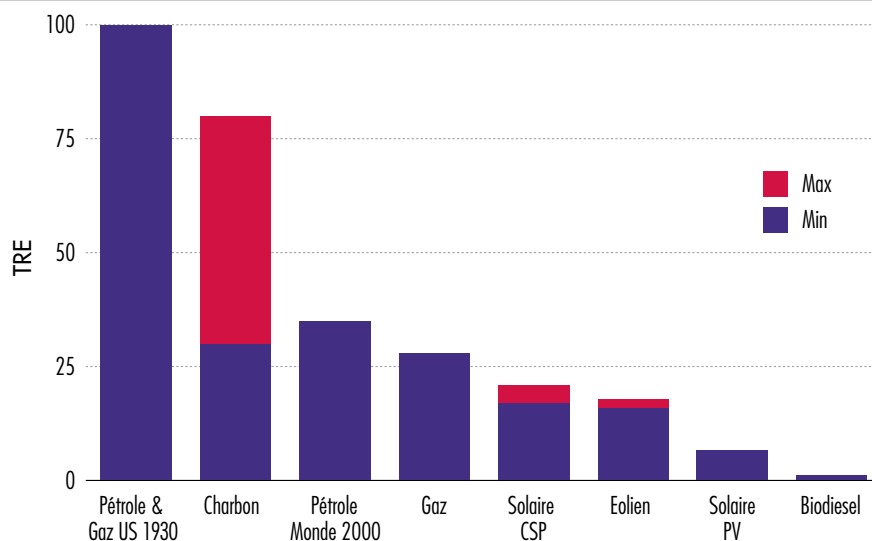
Note de lecture : chaque échelon représente un niveau de développement qui requiert les niveaux inférieurs. Chaque échelon nécessite également un TRE (chiffres à droite) supérieur à celui de l'échelon inférieur.

Derrière cette pyramide se cache l'idée qu'il existerait un TRE minimum nécessaire pour maintenir le niveau de vie actuel des sociétés occidentales. Il est difficile d'estimer la valeur précise, mais ce TRE minimal doit être significativement plus grand que 1, et même au delà de 10 selon les travaux de Lambert et al. (2014).

¹⁵ Cet indicateur a été développé par Charles S. Hall dans le cadre de l'étude de la migration des poissons avant d'être appliqué au domaine de l'énergie.

Figure 4. Estimation du TRE de différentes sources d'énergie

Source : estimations adaptées de Murphy (2010).



De plus, ces études ne prennent généralement pas en compte le coût énergétique du caractère intermittent et aléatoire des énergies solaire et éolienne. L'électricité produite par une éolienne ou un panneau solaire est prise comme numérateur pour le calcul du TRE, sans tenir compte du fait que la production d'électricité n'est pas toujours concomitante à la demande. L'énergie solaire est un bon exemple. Elle est abondante en été et en milieu de journée, à des moments où la demande est généralement plus faible. Afin de faire concorder l'offre et la demande, il faut prévoir des capacités de stockage, un surdimensionnement de la capacité installée (avec bridage de la production*) et/ou des systèmes de back-up¹⁶. Le coût énergétique du stockage et les pertes qui sont induites affectent de façon non négligeable le TRE. Par exemple, le stockage d'électricité sous forme d'hydrogène engendre des pertes supérieures à la moitié de l'énergie initiale. Malgré des décennies de recherche et développement, la cascade des transformations nécessaires pour convertir l'électricité en hydrogène, le stocker et le reconverter ultérieurement en électricité ne permet toujours qu'un rendement global effectif de l'ordre de 25 %, et ce en raison des multiples contraintes physiques. Ce constat incite Ulf Bossel (2006) à penser que la filière hydrogène restera confidentielle.

Finalement la quantité d'électricité produite, et donc le TRE, dépend directement de la qualité du «gisement», en d'autres mots de la localisation de l'installation. Les TRE calculés actuellement pour des champs éoliens existants correspondent à des endroits particulièrement favorables. Quant aux champs solaires, ils sont en général placés au plus près des lieux de consommation. Mais les endroits particulièrement venteux ou ensoleillés sont limités sur terre, et les meilleures ressources se trouvent souvent dans des endroits difficilement accessibles ou peu densément peuplés. Dès lors, les scénarios avec une très grande part d'énergie renouvelable devront exploiter des sites de moins en moins rentables. Les TRE vont donc diminuer avec l'expansion spatiale des énergies renouvelables. Cela signifie qu'il faudra de plus en plus d'énergie pour produire de l'énergie, et que le TRE du système énergétique global va diminuer avec la transition énergétique.

Se basant sur ces considérations, on peut étudier l'évolution du TRE d'une ressource renouvelable en fonction de son taux d'exploitation, donc de la quantité annuelle d'énergie produite. À technologie constante, et si on part du principe

¹⁶ La gestion de la demande en énergie (*Demand Side Management*) réduit mais ne supprime pas la nécessité de lisser l'offre énergétique renouvelable via des systèmes auxiliaires (back-up, stockage, etc.).

... Le coût énergétique des énergies renouvelables

qu'on exploite en premier les sites les plus rentables, cette courbe est strictement décroissante. Le progrès technologique permettrait de la déplacer vers le haut mais n'en modifierait pour autant pas la tendance.

À ce jour, très peu d'études ont été réalisées en vue d'estimer cette évolution pour les énergies renouvelables, mis à part les travaux de Dale *et al.* (Dale *et al.*, 2012a, et Dale *et al.*, 2012b), qui se basent sur une revue de la littérature pour estimer ces courbes plutôt que sur une analyse des ressources réellement disponibles, ainsi que le travail de Moriarty et Honnery (2012) et celui de Dupont *et al.* (2017).

3.2.1. Énergie éolienne

Pour l'éolien, seules deux études ont cherché à estimer l'évolution du TRE en fonction de la production annuelle mondiale : Moriarty et Honnery (2012) pour l'éolien onshore et Dupont *et al.* (2017) pour l'onshore et l'offshore.

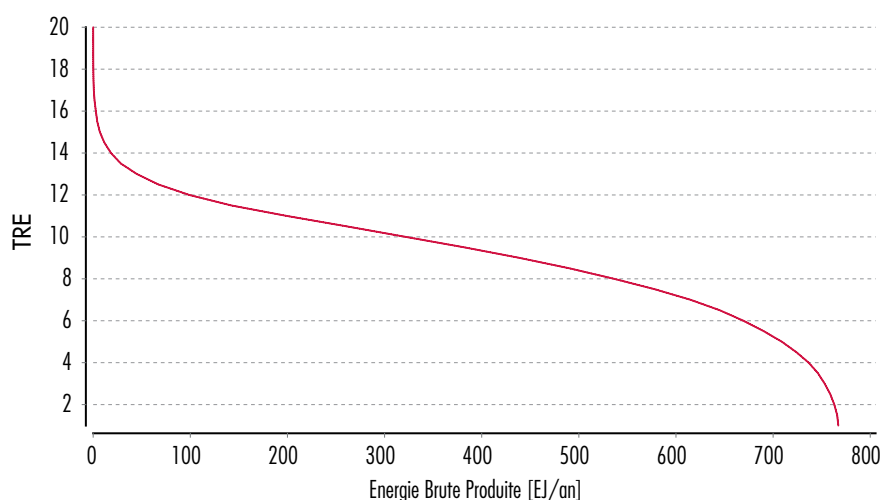
L'approche utilisée consiste à déterminer tous les endroits sur terre qui seraient théoriquement susceptibles d'accueillir des parcs éoliens et d'en estimer alors la production annuelle et le TRE associé. En classant ensuite les sites par ordre décroissant de TRE, on peut tracer la courbe d'évolution du TRE en fonction de la production annuelle (Figure 5). Les deux études montrent que le TRE maximal est d'environ 20 et qu'il chute rapidement, ce qui démontre que les sites présentant de très hauts rendements éoliens sont en nombre limité sur terre.

Sur la Figure 5 on voit que le potentiel global est supérieur à nos besoins actuels (> 700 EJ/an par rapport au ~600 EJ/an d'énergie primaire consommée mondiale), mais malheureusement une grande partie de ce potentiel est réalisable avec des TRE trop faibles (inférieurs à 12 en se basant sur la Figure 3) pour maintenir la structure actuelle de notre économie. En effet seulement 1,5 % du potentiel global peut être réalisé avec des TRE supérieurs à 15. Cette fraction monte à 16,6 % seulement pour un TRE de 12.

Enfin, pour réaliser ce potentiel, il faut investir massivement dans l'éolien offshore flottant, dont la technologie est au stade de prototype. Les éoliennes offshore commercialisées actuellement sont limitées à des profondeurs d'eau de moins de 50 mètres.

L'impact du stockage sur le TRE et sur le potentiel global a été pris en compte dans

Figure 5. Evolution du TRE de l'éolien en fonction de l'énergie brute produite annuellement au niveau mondial



Note de lecture : on constate que le TRE chute rapidement lorsque la production annuelle d'énergie augmente. En effet, le TRE chute de 20 à 12 lorsque la production annuelle passe de 0 à 116 EJ (Dupont *et al.*, 2017).

... *Energie éolienne*

Moriarty et Honnery (2012), qui propose de stocker l'énergie éolienne produite sous forme d'hydrogène. Le potentiel global est alors divisé par deux et le TRE est considérablement impacté; en effet, le TRE maximal estimé chute de 22 à 7,5.

En plus de la dégradation du TRE, les interactions entre éoliennes et entre champs d'éoliennes contraignent également le potentiel total. En effet, en capturant l'énergie contenue dans le vent, les éoliennes ralentissent le vent dans leur sillage. Cela a des implications à l'échelle locale, en réduisant la production des rangées d'éoliennes en aval. Mais des études ont montré récemment que cela peut également avoir des impacts sur le climat à l'échelle globale avec comme conséquence une réduction des vents.

Des modèles climatiques ont montré que ces effets limitaient la densité de puissance des grands parcs éoliens (c'est-à-dire le nombre d'éoliennes que l'on peut installer par unité de surface), et que la production d'électricité saturait à environ 1 Watt/m² dans les endroits les plus favorables (Adams et Keith, 2013). Ces effets sont ignorés dans les scénarios 100 % renouvelables, qui supposent des densités de production d'électricité allant jusqu'à 4 Watt/m², donc une production qui serait 4 fois supérieure à la limite estimée par les modèles climatiques.

3.2.2. L'énergie solaire

L'énergie éolienne et l'énergie solaire présentent des enjeux relativement différents. Alors que l'éolien peut être combiné avec d'autres types d'occupation du sol (des zones agricoles par exemple), ce n'est pas le cas pour les champs solaires qui entrent en compétition avec d'autres utilisations de la terre (excepté pour le photovoltaïque résidentiel). De plus, les variations saisonnières sont également beaucoup plus marquées dans le cas de l'énergie solaire, surtout aux latitudes des pays européens. A titre d'exemple, en Belgique, la production photovoltaïque a été de 431 GWh en juin 2017 contre seulement 64 GWh en décembre 2016, presque un facteur dix de différence entre ces 2 périodes. En plus de ces variations saisonnières, l'espacement entre les panneaux doit aussi être plus important au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, pour éviter les effets d'ombre qui impactent la production.

Mais le potentiel global d'énergie solaire est beaucoup plus important que le potentiel éolien, en partie de par le fait que, au contraire de l'éolien, l'extraction d'énergie solaire à un endroit n'a pas d'impact sur l'énergie disponible ailleurs. La limite semble donc être la surface disponible pour l'installation de champs solaires.

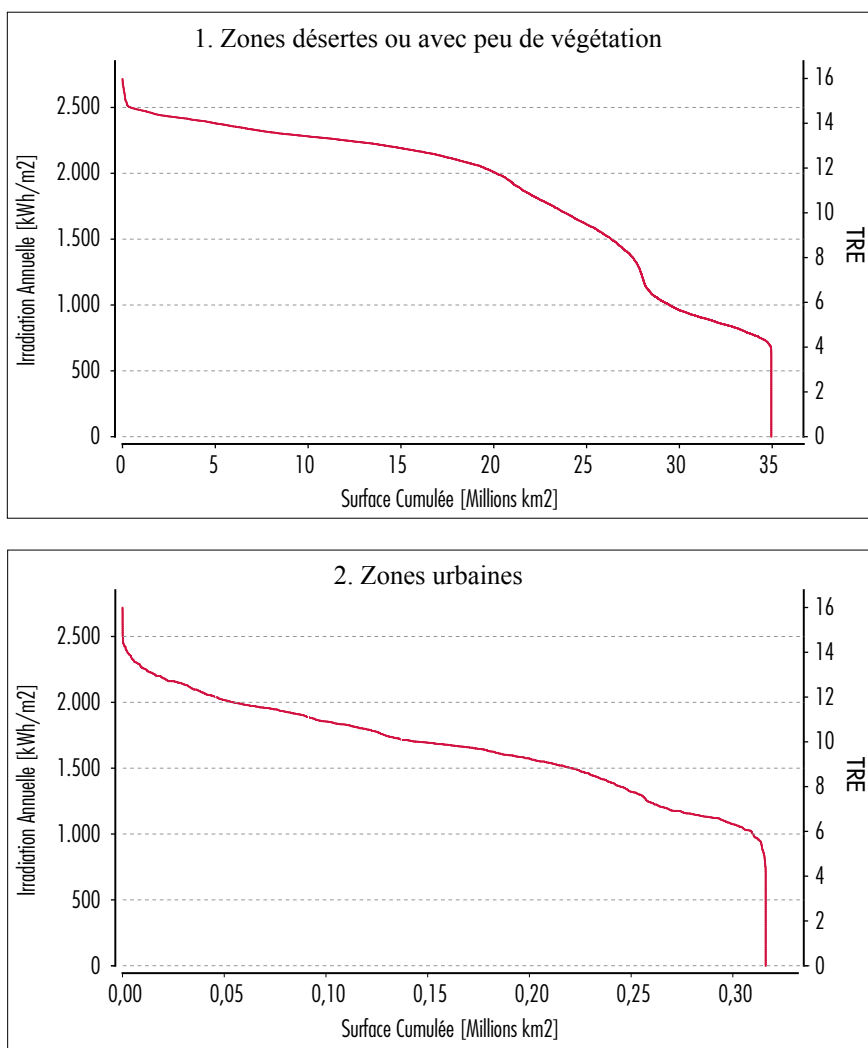
Concernant le TRE du photovoltaïque, il se situerait actuellement entre 9,7 et 11,4 selon Koppelaar (2017) pour une irradiation annuelle de 1700 kWh/m² et en tenant compte de l'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques. Sachant que l'irradiation annuelle moyenne dans les pays de l'EU-27 est de 1095 kWh/m² le TRE y serait proche de 7, donc probablement sous le TRE minimum nécessaire pour soutenir le niveau de vie occidental (voir Figure 3).

On peut se donner une idée de la décroissance du TRE en croisant les données d'irradiation annuelle et les types d'occupation des sols, voir Figure 6. Les centrales solaires seront placées sur des zones avec peu de végétation ou désertiques (Figure 6.1), et le photovoltaïque résidentiel dans les zones urbaines (Figure 6.2). Cette représentation donne une image de la répartition des ressources, mais elle ne prend pas en compte des facteurs essentiels comme la distance par rapport au point de consommation et le stockage, qui impactent négativement le TRE.

Quant au solaire thermique*, peu d'études ont été réalisées à ce jour. En effet, la technologie est en plein développement et il est dès lors difficile d'obtenir des mesures de l'énergie investie pour des projets commerciaux. Les quelques études existantes situent le TRE entre 17 et 21, en fonction de la technologie adoptée.

Figure 6. Distribution de l'irradiation moyenne annuelle en fonction de la surface cumulée pour différents types d'occupation du sol, et TRE correspondant pour le solaire photovoltaïque

Sources : le TRE pour le solaire photovoltaïque est calculé sur base de la revue de la littérature de Koppelaar (2017). Les données d'irradiation sont des moyennes sur 40 ans des données de réanalyse ERA-Interim et l'occupation du sol est reprise de la base de données GlobCover (2009).



À nouveau des progrès technologiques sont envisagés, qui permettront dans un premier temps d'améliorer le TRE, mais qui ne permettront pas de contrecarrer la saturation des sites appropriés, d'autant plus que cette technologie exige des zones particulièrement ensoleillées avec du rayonnement direct et donc situées généralement loin des points de consommation.

Ces études mettent en lumière le fait que les ressources renouvelables présentant des hauts TRE sont très limitées sur terre. Il faudra donc, plutôt tôt que tard, s'attacher à des sites moins rentables, qui produiront de moins en moins d'énergie pour la même capacité installée.

Elise Dupont est doctorante à l'Institut de Mécanique, Matériaux et Génie civil (IMMC) de l'UCL.

Hervé Jeanmart est professeur à l'École Polytechnique de Louvain (EPL) et membre de l'Institut de Mécanique, Matériaux et Génie civil (IMMC) de l'UCL.

Louis Possoz est ingénieur conseil à Louvain-la-Neuve.

Elise Dupont
elise.dupont@uclouvain.be

Hervé Jeanmart
herve.jeanmart@uclouvain.be

Louis Possoz
louis.possoz@quelfutur.org

Références

- Jacobson M.Z. et Delucchi M.A. (2011), 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, 1154-1169.
- Jacobson M.Z., Delucchi, M.A., Bauer Z., Goodman S., Chapman W., Cameron M., Bozonnat C., Chobadi L., Clonts H., Enevoldsen P., Erwin J., Fobi S., Goldstrom O., Hennessy E., Liu J., Lo J., Meyer C., Morris S. Moy, K., O'Neill P., Petkov I., Redfern S., Schucker R., Sontag M., Wang J., Weiner E. et Yacharin A. (2017), 100 % Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World, *Joule*, 1 (1), 108-121.
- NégaWatt (2017), Association négaWatt, Scénario négaWatt 2017-2050, Dossier de Synthèse.
- Moriarty P. et Honnery, D. (2016), Can renewable energy power the future? *Energy Policy*, 93, 3-7.
- Miller L. (2012), Limits and consequences of the large-scale deployment of renewable energy technologies, Technical Reports, Max-Planck-Institut für Biogeochemie 27.
- Mediavilla M., de Castro C., Capellán I., Miguel L., Arto I. et Frechoso F. (2013), The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions, *Energy Policy*, 52, 297-311.
- Bolt J. et van Zanden J.L. (2014), The Maddison Project: collaborative research on historical national accounts. *The Economic History Review*, 67 (3), 627-651.
- EEA (2015), Energy intensity. European Environment Agency.
- Lambert J., Hall C.S., Balogh S., Gupta A. et Arnold M. (2015), Energy, EROI and quality of life, *Energy Policy*, 64, 153-167.
- Murphy D. et Hall C.S. (2010), Year in review – EROI or energy return on (energy) invested, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185, 102-118.
- Bossel U. (2006), Does a hydrogen economy make sense?, *Proceedings of the IEEE*, 94 (10), 1826-1837.
- Dale M., Krumdieck S. et Bodger P. (2012), Global energy modelling – A biophysical approach (GEMBA) Part 1: An overview of biophysical economics, *Ecological Economics*, 73, 152-157.
- Dale M., Krumdieck S. and Bodger P. (2012), Global energy modelling – A biophysical approach (GEMBA) Part 2: Methodology, *Ecological Economics*, 73, 158-167.
- Dupont E., Kooppelaar R. et Jeanmart H. (2017), Global available wind energy with physical and energy return on investment constraints, *Applied Energy*, sous presse, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.085>
- Moriarty P. et Honnery D. (2012), What is the global potential for renewable energy? *Renewable and sustainable energy reviews*, 16, 144-252.
- Adams A.S. et Keith D.W. (2013), Are global wind power resource estimates overstated? *Environ. Res. Lett.*, 8.
- Koppelaar R. (2017), Solar-PV energy payback and net energy: Meta-assessment of study quality, reproducibility, and results harmonization. *Renew. and Sust. Energy Reviews*, 72, 1241-1255.
-

Transition énergétique et croissance économique : la transition peut-elle s'opérer en douceur ?

Jean-François Fagnart

Marc Germain

Différents travaux en théorie de la croissance économique ont abordé la question de la transition énergétique, en ignorant cependant tout ou partie des contraintes physiques mentionnées dans la contribution de Dupont-Jeanmart-Possoz. En supposant (i) l'absence de limite au progrès technique permettant d'épargner l'énergie et/ou (ii) une substitution aisée entre énergie et d'autres facteurs de production produits par l'homme (le travail et le capital), ces travaux montrent que la transition énergétique n'empêche pas que la croissance économique se poursuive, au point que la possibilité que la transition s'accompagne d'une contraction (ou décroissance) économique, transitoire ou irréversible, n'est le plus souvent pas envisagée.

A contrario, en recourant au concept de taux de retour énergétique (TRE), les énergéticiens ont mis en évidence le déclin progressif de l'efficacité du secteur énergétique. D'une part, si les énergies non renouvelables (charbon, pétrole brut, gaz naturel) étaient initialement caractérisées par un TRE élevé, celles-ci ont connu une exploitation intensive et ont vu ce TRE décroître, suite à des difficultés et des coûts d'exploitation croissants, ou parce que leur qualité a progressivement diminué. D'autre part, malgré le progrès technique dont elles peuvent bénéficier, les principales énergies renouvelables (le solaire et l'éolien) seront caractérisées par des TRE sensiblement inférieurs à ceux des énergies non renouvelables par le passé.¹ Les causes principales en sont leur caractère extensif et l'effet «localisation», expliqués dans la contribution de Dupont-Jeanmart-Possoz.

Ce déclin des TRE des différentes énergies se traduit évidemment par celui du TRE global (c'est-à-dire celui qui caractérise l'ensemble du secteur énergétique). La poursuite de ce déclin incite certains énergéticiens à alerter sur des conséquences très négatives qui risquent d'affecter l'économie dans le futur. Pour assurer leur développement, les sociétés industrielles ont pu compter sur des énergies fossiles avec un TRE très élevé, leur permettant d'allouer leurs facteurs de production (main d'œuvre et capital notamment) à d'autres activités que celle de la production énergétique. Comme la production de biens et services est essentiellement un processus de transformation exigeant de l'énergie (cf. la contribution de Dupont-Jeanmart-Possoz), une économie disposant de ressources énergétiques avec un TRE élevé dispose d'un plus grand potentiel d'expansion et de diversification économique et donc de croissance. Au contraire, une économie reposant exclusivement sur des énergies renouvelables devrait consacrer, en comparaison avec les valeurs observées habituellement aujourd'hui, une part hypertrophiée de sa production de biens et services (que ce soit en termes de consommation intermédiaire ou en biens d'équipement de toutes sortes) et de sa main d'œuvre aux besoins de son secteur énergétique (van den Bergh, 2013).

En conséquence, une transition énergétique caractérisée par une baisse prolongée du TRE global comporterait un risque d'éviction des investissements des

¹ Les autres énergies renouvelables n'offrent qu'un potentiel plus limité (hydroélectricité) ou présentent d'autres inconvénients, par exemple celui d'entrer en concurrence avec d'autres usages de la terre (biocarburants).

... Transition énergétique et croissance économique

secteurs non énergétiques, en particulier celui produisant les biens d'équipement. L'économie serait alors susceptible de connaître un scénario caractérisé par une baisse sévère (voire un effondrement) de la production et de la consommation. Un tel scénario se traduirait bien sûr par une perte de bien-être pour les générations nées au début ou pendant la transition. En outre, une fois la transition achevée, rien ne garantirait que les générations suivantes bénéficieraient du même niveau de vie que leurs ancêtres plus chanceux.

Sauf rares exceptions, les travaux des énergéticiens reposant sur le concept de TRE ne développent pas des modèles de croissance au sens des économistes, permettant d'approfondir les intuitions exposées dans les paragraphes précédents. Par ailleurs, la théorie de la croissance ignore le concept de TRE. Les deux courants de littérature (théorie de la croissance et science de l'énergie) tendent ainsi à étudier la question de la transition énergétique en s'ignorant mutuellement.

Une contribution récente de Fagnart *et al.* (2017) tente cependant d'établir un pont entre ces deux courants, à travers l'analyse de la transition énergétique d'une économie mondiale et par le moyen d'un modèle de croissance faisant intervenir explicitement le concept de TRE. Le modèle comporte deux secteurs, un secteur énergétique et un secteur final, ce dernier produisant les biens et services destinés à la consommation des ménages et à l'investissement des entreprises². Le secteur énergétique est lui-même décomposé en deux sous-secteurs, l'un exploitant un stock d'énergie non renouvelable (par exemple des gisements de pétrole) et l'autre un flux d'énergie renouvelable (par exemple l'énergie solaire). Deux facteurs de production sont distingués : l'énergie et le capital. Celui-ci est compris dans un sens large, c'est-à-dire comme l'agrégation du capital physique proprement dit (les machines, les bâtiments, ...) et du capital humain (la main d'œuvre avec son savoir-faire).

L'économie étant mondiale, il n'y a pas d'Etat et donc le modèle n'intègre pas de politique active des pouvoirs publics visant à favoriser la TE. Celle-ci est donc une transition de «laissez-faire», résultant de la libre concurrence entre énergies renouvelables et non renouvelables.

Conformément aux observations des énergéticiens, les coûts d'exploitation (par unité d'énergie finale* produite) croissent avec le taux d'exploitation de la ressource. De même, le progrès technique (endogène) est supposé borné par les contraintes inhérentes aux lois de la physique. Il en découle que l'intensité énergétique* du secteur final (le rapport E/PIB) ne peut tendre vers zéro. Il en va de même de l'intensité capitaliste* du secteur énergétique, autrement dit la productivité du capital dans ce secteur est bornée supérieurement (elle ne peut pas tendre vers l'infini). Le modèle suppose que l'énergie et le facteur capital sont faiblement substituables³ dans la production finale, conformément aux estimations empiriques. Soulignons enfin que le modèle intègre le mécanisme par lequel le progrès technique économiseur d'énergie engendre un effet rebond* tel que décrit dans l'introduction générale.

Sur base d'une calibration schématique sur des données mondiales, le modèle est ensuite utilisé pour simuler une économie reposant en début de trajectoire essentiellement sur une énergie non renouvelable et évoluant vers la seule exploitation d'une

² Dans la tradition de la théorie de la croissance, le modèle de Fagnart *et al.* (2017) est celui d'une économie fermée sans Etat. Il en découle que dans ce modèle, $PIB = C + I$, où C désigne la consommation des ménages et I l'investissement des entreprises. L'intérêt de l'hypothèse d'une économie fermée est qu'elle la «force» à supporter intégralement la transition énergétique, sans possibilité de la contourner via des échanges avec le reste du monde (soit en important directement l'énergie soit en se spécialisant dans une production pauvre en énergie et en l'exportant en échange d'importations riches en énergie).

³ La substitution entre énergie et capital renvoie ici au remplacement d'un équipement (machine, bâtiment) énergivore par un équipement moins énergivore pour le même service rendu.

La question des métaux⁴

Au même titre que les énergies fossiles, les métaux sont essentiels à nos économies et font partie des ressources non renouvelables. Si les ressources en métaux sont très abondantes dans la croûte terrestre, le stock suffisamment concentré pour être effectivement ou potentiellement exploité est bien moindre. En effet, le coût énergétique de cette exploitation est inversement proportionnel à la concentration du minerai et il a la fâcheuse propriété d'exploser en dessous d'un certain seuil de concentration. A l'époque actuelle, 8 à 10 % de l'énergie primaire* mondiale va à l'extraction et au raffinage des ressources métalliques.

En retour, les ressources en énergie primaire devenant plus difficiles d'accès, leur extraction et transformation en énergie finale réclament toujours plus de métaux. Par exemple, un gisement de pétrole en eaux profondes est plus exigeant en équipements qu'un gisement terrestre. En conséquence, Bihouix et de Guillebon (2010) évoque un cercle vicieux entre ressources métalliques et énergies primaires au sens où la raréfaction des premières accélère celle des secondes et vice versa.

À la différence de l'énergie, le recyclage des métaux est théoriquement possible et cette solution est souvent avancée pour contourner le problème de leur raréfaction (notamment à travers le concept d'économie circulaire). Malheureusement, la variété croissante des alliages métalliques rend leur recyclage largement illusoire. Il s'agit plutôt d'une valorisation en alliage inférieur, le fer à béton par exemple. De plus les nombreux usages dispersifs des métaux (peintures, matériaux d'usure, additifs, etc.) interdisent le recyclage. Enfin, le recyclage (même parfait) ne peut garantir seul le découplage* entre croissance économique et consommation de métaux (Grosse, 2010).

... Transition énergétique et croissance économique

énergie renouvelable. Les Figures 1.a-c page suivante décrivent le comportement des principales variables économiques (PIB, consommation énergétique, stock de capital...) dans le cadre d'un scénario où l'économie subit une contraction suite à la transition. Les périodes de temps (indiquées par t) sont relativement longues (de l'ordre de 15 ans), la première période (t=1) concernant les années 1997-2012.

Soulignons dès le départ qu'au vu du caractère très stylisé du modèle, le scénario de référence retenu et décrit par les Figures 1.a-c ne cherche *aucunement à prévoir l'avenir*, mais plutôt à mettre en lumière certains mécanismes économiques susceptibles de jouer un rôle important dans le cadre de la transition. Les résultats présentés sont donc d'ordre qualitatif et non quantitatif. *C'est l'allure générale des courbes qui doit être prise en considération et non les chiffres proprement dits.*⁵

⁴ La source principale de cet encadré est le livre de Bihouix et de Guillebon (2010), auquel nous renvoyons vivement le lecteur intéressé pour plus d'informations.

⁵ C'est pourquoi, à la manière de Meadows *et al.* (2012), nous nous abstenons de préciser des valeurs sur les axes verticaux des figures. Selon ces auteurs, même l'allure des courbes après un fort déclin, voire un effondrement, de l'économie est susceptible de poser question : «Il est clair qu'un effondrement de la population ou de l'industrie dans le monde "réel" aurait des répercussions sur un grand nombre de relations de première importance, invalidant en cela bien des hypothèses [...] intégrées dans le modèle.» (Meadows *et al.*, 2012, p. 229). Celles-ci traduisent en particulier une certaine stabilité des comportements humains et du monde environnant. Or cette stabilité est précisément invalidée dans le cas d'un retournement prononcé de l'économie, notamment parce que les hommes ont la capacité d'observer, d'apprendre et de réagir à ce retournement (éventuellement de façon désordonnée).

Des Figures 1.a-c, on peut tirer les enseignements suivants :

1. La Figure 1.a. illustre la transition énergétique. La production d'énergie non renouvelable (ENR) passe par un pic, puis décroît jusqu'au moment où elle devient non rentable. Le développement rapide du renouvelable (ER), s'appuyant entre autres choses sur une production d'énergie non renouvelable encore abondante, permet un temps de compenser le déclin du non renouvelable. Mais il arrive un moment où la production totale d'énergie (ENR + ER) atteint à son tour un pic puis décroît.

Figure 1.a. Consommation d'énergie renouvelable (ER), non renouvelable (ENR) et totale

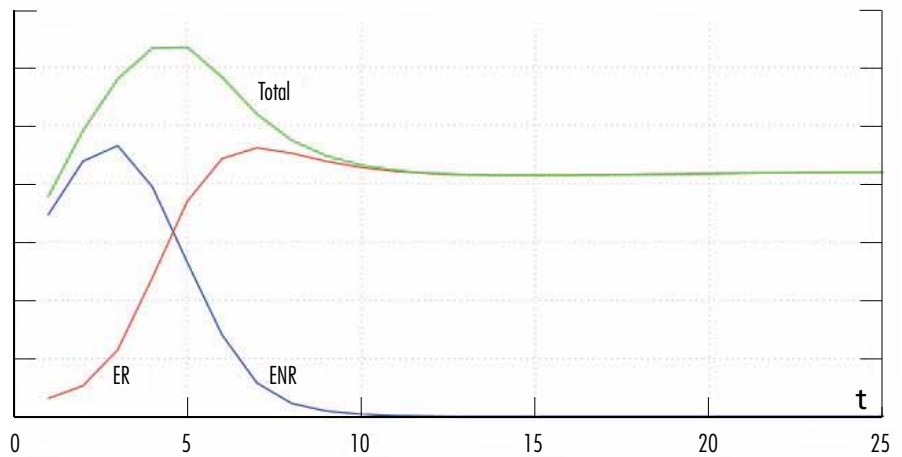


Figure 1.b. PIB, consommation (C) et investissement (I)

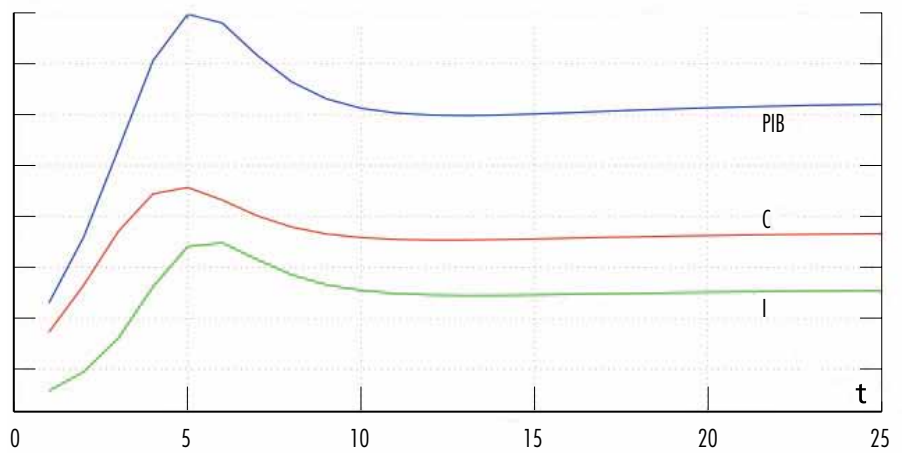
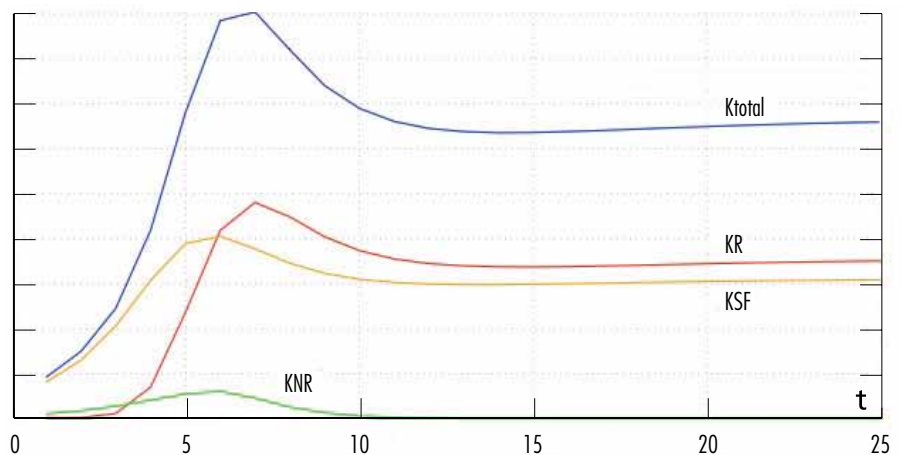


Figure 1.c. Capital des secteurs final (KSF), renouvelable (KR), non renouvelable (KNR) et total



... Transition énergétique
et croissance économique

2. Le comportement du PIB est non monotone (Figure 1.b). Après une période de croissance, le PIB atteint un pic, puis décroît, avant de converger vers son niveau de long terme. Ce comportement non monotone s'explique par le fait que les secteurs final et énergétique entrent en concurrence pour l'usage du capital (cf. infra). La consommation finale des ménages (C) et l'investissement macroéconomique (I) ont des trajectoires analogues à celle du PIB.

3. Des gains résiduels d'efficacité énergétique* permettent une très légère remontée du PIB après la transition (Figure 1.b). Nous savons par la contribution de Dupont-Jeanmart-Possoz que le potentiel de ces gains est limité pour des raisons physiques. Si le potentiel existant encore au début de l'ère du tout renouvelable est suffisant, la lente reprise du PIB qui suit sa contraction permet à l'économie de retrouver (voire de dépasser) à long terme le niveau de production atteint lors du pic de l'ère fossile. Si ce potentiel est insuffisant, il n'y a pas de rattrapage (cas de la Figure 1.b).

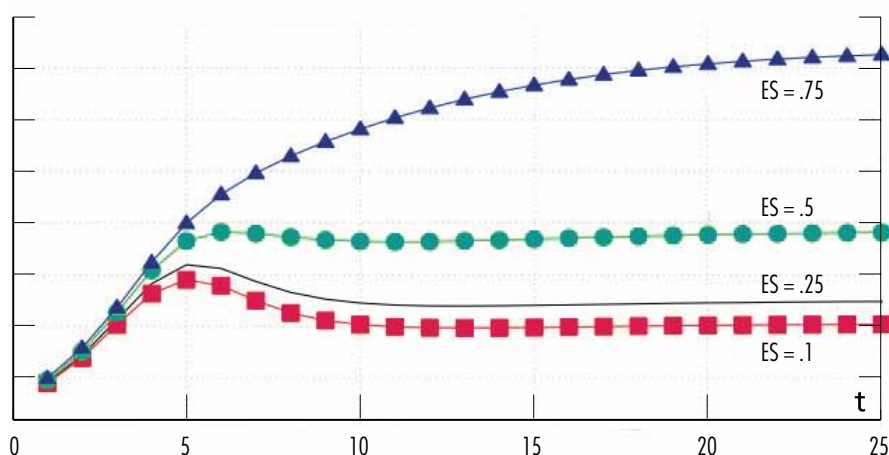
4. Les Figures 1.a et b montrent que la contraction du PIB et de la consommation survient *bien avant* que la transition ne soit achevée (c'est-à-dire bien avant l'ère du tout renouvelable). L'amorce de la baisse du niveau de vie qui accompagne la transition énergétique est (plus ou moins) concomitante au retournement de la consommation énergétique globale. Elle n'est donc pas aussi lointaine que ne l'est la fin de l'ère des énergies fossiles.

5. La Figure 1.c montre que la transition énergétique s'accompagne d'une très importante réallocation du capital productif vers le secteur énergétique. Une fois la transition achevée, le stock de capital du secteur énergétique (KR) dépasse celui du secteur final (KSF), alors que celui-ci domine largement en début de trajectoire. Deux facteurs expliquent la hausse continue des besoins en capital du secteur énergétique. D'une part et surtout en début de trajectoire, les énergies non renouvelables sont de plus en plus difficiles d'accès (à l'exemple des ressources sous les fonds marins) et donc toujours plus exigeantes en équipements. D'autre part, l'effet «localisation» (expliqué par Dupont-Jeanmart-Possoz) est à l'origine de rendements décroissants du capital dans l'exploitation des énergies renouvelables. Cette hausse incessante explique l'éviction du secteur final en termes d'usage du capital (au sens où sa part dans cet usage diminue). Or, dans la mesure où c'est le secteur final qui produit les biens d'équipement, cette éviction induit un cercle vicieux qui renforce les tensions entre les deux secteurs pour l'usage du capital. En conséquence, la croissance s'arrête et la production finale commence à se contracter. Le stock de capital se contracte à son tour, ce qui renforce la décroissance de l'économie. Cette décroissance se termine à la fin de la transition énergétique.

6. Les tensions entre les deux secteurs en termes d'usage du capital sont atténuées par une hausse sensible de l'épargne. La Figure 1.b montre en effet que pendant la transition, la part de l'investissement dans le PIB (c'est-à-dire le rapport I/PIB, lui-même égal au taux d'épargne) augmente au détriment de celle de la consommation. La hausse du taux d'épargne permet le maintien de la croissance pendant la première partie de la trajectoire. Elle finit cependant par se révéler insuffisante pour neutraliser le phénomène d'éviction du secteur final dans l'usage du capital (évoqué au point 5). En d'autres termes, *soutenir la croissance du PIB, tout en faisant face à la hausse continue de l'intensité capitalistique* du secteur énergétique, devient de plus en plus problématique et finalement impossible.*

7. Un résultat du modèle (non illustré par les Figures 1.a-c) révèle que l'abandon de l'exploitation des ressources fossiles n'est pas dû au fait qu'elles sont épuisées. Une fois la transition achevée, un certain stock demeure en effet inexploité. Ce n'est donc pas l'épuisement des énergies non renouvelables, mais leur *renchérissement* qui induit la fin progressive de leur exploitation. Cette observation relative

Figure 2. Evolution du PIB pour différentes valeurs de l'élasticité de substitution (es) entre capital et énergie



visent certains discours «rassurants» sur la disponibilité future en énergies fossiles (notamment non conventionnelles, à l'exemple des sables bitumineux et des gaz et pétroles de schiste)⁶.

Les Figures 1.a-c appellent plusieurs remarques importantes.

Il importe d'abord de souligner que la trajectoire de l'économie illustrée par les Figures 1.a-c est une trajectoire *parmi d'autres*. Afin de tester la sensibilité des résultats, Fagnart *et al.* (2017) ont étudié l'impact sur les trajectoires de modifications de l'un ou l'autre paramètre du modèle. Ils ont ainsi montré que la contraction du PIB est d'autant plus forte que :

- (i) le stock initial d'énergie non renouvelable est élevé;
- (ii) les potentiels de progrès technique au sein des secteurs énergétique et final sont faibles;
- (iii) les déséconomies d'échelle* dans l'exploitation des énergies renouvelables (dus à l'effet « localisation » expliqué par Dupont-Jeanmart-Possoz) se marquent rapidement;
- (iv) l'élasticité de substitution* entre capital et énergie est faible (autrement dit, plus il est coûteux de remplacer un équipement énergivore par un autre plus économe en énergie, à production donnée);
- (v) les agents économiques ont un taux de préférence pour le présent élevé (ils tendent à privilégier le court-terme).

En revanche, sous certaines conditions, la transition peut se faire en douceur, sans contraction, ni du PIB, ni de la consommation. L'économie croît alors de façon monotone et tend vers un état stationnaire. C'est notamment le cas si l'élasticité de substitution entre capital et énergie est suffisamment élevée, ou si les déséconomies d'échelle évoquées plus haut sont suffisamment peu marquées.

La Figure 2 montre ainsi la transition de l'économie pour différentes valeurs de l'élasticité de substitution entre capital et énergie(es). Des possibilités de substitution plus fortes entre énergie et capital dans la production finale atténuent les tensions liées à la rivalité dans l'usage du capital entre les secteurs énergétique et final. Si elle est suffisamment élevée (es = 0,75), l'économie croît de façon monotone⁷ et atteint un PIB stationnaire sensiblement plus élevé que pour les autres

⁶ Cf. par exemple le rapport BP Energy Outlook 2017.

⁷ Malheureusement, les estimations économétriques de l'élasticité de substitution entre capital et énergie conduisent plutôt à des valeurs plus faibles que 0,75.

valeurs (en particulier pour la valeur $\epsilon = 0,25$, qui caractérisait la trajectoire illustrée par la Figure 1.b.

A l’opposé, d’autres éléments ignorés par Fagnart *et al.* (2017) sont susceptibles de rendre la transition énergétique plus difficile et leur prise en compte pourrait modifier les résultats discutés ci-dessus *dans un sens défavorable*. Par exemple, le renchérissement des ressources énergétiques pourrait accélérer celui des métaux et vice versa (voir l’encadré page 19).

Jean-François Fagnart est professeur d’économie à l’Université Saint-Louis Bruxelles, chercheur au CEREC (USL-B) et chercheur associé à l’IRES (UCL).

Jean-François Fagnart
jean-francois.fagnart@uclouvain.be

Marc Germain
marc.germain@uclouvain.be

Marc Germain est maître de conférences en économie à l’Université de Lille 3, chercheur au LEM-CNRS (UMR 9221, Université de Lille 3) et chercheur associé à l’IRES (UCL).

Références

- Bihouix P. et B. de Guillebon (2010), *Quel futur pour les métaux ? - Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*. Ed. Les Ulis : EDP Sciences.
- Fagnart J.-F., M. Germain et B. Peeters (2017), Can the Energy Transition Be Smooth? Document de travail du LEM 2017- 08, Université de Lille.
- Grosse F. (2010), Le découplage croissance/matières premières. De l’économie circulaire à l’économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage. *Futuribles*, 365, 99-124.
- Meadows D., J. Randers et D. Meadows (2012), *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*. Ed. Rue de l’échiquier.
- Murphy D. et C. Hall (2010), EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New-York Academy of Sciences*, 1185, 102-118.
- van den Bergh J. (2013), Environmental and climate innovation: Limitations, policies and prices. *Technological Forecasting & Social Change*, 80, 11-23.
-

Conclusion générale

Depuis quelques années, certains auteurs ont émis des doutes sur la possibilité de poursuivre sans encombre, à un niveau global, la croissance économique pendant la transition énergétique (TE). Le présent numéro de *Regards Economiques* a pour objectif d'approfondir certains de leurs arguments.

La contribution de Dupont-Jeanmart-Possoz concentre son attention sur les évolutions attendues du taux de retour énergétique (TRE) des sources éolienne et solaire, ainsi que sur leur potentiel. Ils mettent en évidence un effet «localisation» selon lequel l'expansion de ces énergies impliquera de les installer sur des sites de moins en moins favorables, produisant de moins en moins d'énergie pour la même capacité installée. Une TE vers un monde 100 % renouvelable conduira alors à un TRE du système énergétique global sensiblement plus faible qu'aujourd'hui et ce, malgré le progrès technique dont les auteurs soulignent par ailleurs que le potentiel est limité.

Les possibles conséquences macroéconomiques d'une telle TE sont analysées dans la contribution de Fagnart-Germain. La baisse du TRE global accompagnant la TE se traduit par l'exacerbation des besoins en capital du secteur énergétique, avec un possible effet «d'éviction» du secteur final au niveau de l'affectation des biens d'investissement. Cet effet pèse négativement sur la croissance économique. S'il est suffisamment fort (ce qui dépend des caractéristiques de l'économie), la TE s'accompagne d'une phase de décroissance économique prolongée. Dans le cas contraire, une transition «en douceur» (c'est-à-dire sans décroissance économique) est possible.

Il importe de souligner que la TE décrite au paragraphe précédent est une transition de «laissez-faire», au sens où elle résulte de la libre concurrence entre énergies renouvelables et non renouvelables. Elle n'intègre pas de politique active des pouvoirs publics visant à la favoriser. Le présent numéro de *Regards Economiques* n'en constitue pas pour autant un plaidoyer pour qu'il en soit ainsi.

Son but est d'abord d'éveiller la prudence à l'égard d'un certain «optimisme technologique » suggérant que la TE pourrait se révéler sans douleur pour la croissance économique grâce au *seul* développement tous azimuts des énergies renouvelables. Le message implicite qui en découle est que pour favoriser une transition «en douceur», des changements de comportements à grande échelle sont nécessaires (par exemple, en matière de transport).

Le paragraphe précédent pose la question des conséquences de tels changements de comportements sur l'économie, et en particulier sur le PIB et la croissance. Il pose aussi la question du rôle des pouvoirs publics dans la stimulation de ces changements. A notre connaissance, il s'agit là de questions qui restent largement ouvertes.

.....

Glossaire

Bridage de la production : concerne la décision de volontairement arrêter, malgré la présence de vent ou de soleil, la production d'une unité de production éolienne ou solaire pour diverses raisons (surcharge du réseau, nuisances...).

Découplage relatif ou absolu : dans le contexte énergétique, le découplage relatif correspond à une croissance économique plus rapide que l'augmentation de la consommation d'énergie primaire. Le découplage absolu est une croissance économique associée à une diminution de la consommation d'énergie primaire.

Economie d'échelle : baisse du coût unitaire d'un produit obtenu en accroissant sa production. Plus un produit est fabriqué, plus son coût unitaire est faible. La déséconomie d'échelle correspond au phénomène inverse.

Effet rebond : ensemble des conséquences micro et macroéconomiques d'une amélioration de l'efficacité énergétique : effet de revenu, effet d'aubaine, effet de substitution, effet d'entraînement technologique, etc. Au total, ces effets peuvent surcompenser la diminution de consommation directe d'énergie due à une amélioration de l'efficacité énergétique.

Efficacité énergétique : (i) au niveau microéconomique, l'efficacité énergétique désigne la quantité de biens ou de services obtenus par unité d'énergie; (ii) au niveau macroéconomique, l'efficacité énergétique désigne le rapport PIB/E, où E est la consommation énergétique primaire globale de l'économie.

Elasticité de substitution (entre deux facteurs de production) : exprime la plus ou moins grande facilité de remplacer un facteur par l'autre, à production inchangée. Plus l'ES est élevée, plus ce remplacement est aisé.

Energie à la consommation : ensemble de l'énergie nécessaire pour assurer le mode de vie des habitants d'un territoire, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour produire tous les biens et services consommés sur le territoire en plus de la consommation directe d'énergie. Cette métrique inclut l'énergie grise des produits issus des échanges internationaux.

Energie à la production : ensemble de l'énergie mise en œuvre sur un territoire pour alimenter son économie. Elle est constituée de l'énergie extraite du territoire et du solde des échanges avec d'autres territoires.

Energie finale : énergie comptabilisée lors de la dernière transaction commerciale, avant sa transformation et/ou son utilisation par le consommateur final (ménage, industrie, etc.) souvent sous une forme différente (e.g. électricité) des formes primaires disponibles dans la nature. Elle est une fraction seulement de l'énergie primaire suite aux pertes de conversion.

Energie grise : contenu implicite en énergie d'un bien ou service. Quantité d'énergie nécessaire pour produire et mettre à disposition un bien ou un service. L'énergie consommée par le bien lors de son utilisation (par exemple le combustible d'une chaudière) n'est pas comptabilisée dans l'énergie grise.

Energie nette : énergie disponible pour les secteurs non énergétiques de l'économie. C'est la différence entre l'énergie brute produite par le secteur énergétique et l'autoconsommation de ce secteur.

Energie primaire : énergie disponible dans la nature et mobilisée pour satisfaire les besoins humains. Elle est exprimée en tonne équivalent pétrole (TEP), c'est-à-dire que les différentes formes d'énergie sont converties en des masses de pétrole ayant le même contenu énergétique selon des facteurs définis par l'Agence Internationale de l'Énergie.

Exajoule (EJ) : l'unité fondamentale d'énergie est le Joule (J), mais elle

... *Glossaire*

représente une très faible quantité. On lui préfère le Mégajoule (million de Joule, MJ) ou la Gigajoule (milliard de Joule, GJ), voire, à l'échelle mondiale, l'Exajoule (milliard de milliard de Joule, EJ).

Intensité capitalistique : (i) au niveau microéconomique, l'IK est définie par le rapport entre les immobilisations corporelles et la valeur ajoutée; (ii) au niveau macroéconomique, l'IK est donnée par le rapport K/PIB , où K désigne le stock de capital de l'économie.

Intensité énergétique : inverse de l'efficacité énergétique (cfr. supra).

Solaire thermique ou centrale solaire thermique à concentration : centrale qui concentre le rayonnement solaire à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur détendu ensuite dans une turbine. L'avantage par rapport au photovoltaïque est que la chaleur peut être stockée plusieurs heures afin de restituer de l'électricité quand le soleil ne brille plus.

Taux de retour énergétique (TRE) : mesure de l'autoconsommation d'un processus de transformation d'énergie. Il est le rapport entre l'énergie brute produite et l'énergie investie pour permettre cette production.

Directeur de la publication :
Vincent Bodart

Rédactrice en chef :
Muriel Dejemeppe

Comité de rédaction : *Paul Belleflamme,*
Vincent Bodart, Muriel Dejemeppe, Frédéric
Docquier, Jean Hindriks, Marthe Nyssens,
William Parienté, Mikael Petitjean

Secrétariat & logistique : *Anne Davister*

Graphiste : *Dominos*

Regards Économiques IRES-UCL

Place Montesquieu, 3
B1348 Louvain-la-Neuve

www.regards-economiques.be

regard-ires@uclouvain.be

tél. 010/47 34 26

ISSN 2033-3013