

# L'impossible découplage entre énergie et croissance

Thierry CAMINEL

Séminaire du 25 novembre 2011





Au cours de ces dernières années, marquées par les enjeux énergétique et climatique<sup>1</sup>, l'innovation technologique est devenue dans l'imaginaire collectif la seule piste de sortie de crise, qui permettrait, du moins en Europe, de retrouver le chemin de la croissance. Les immenses progrès réalisés en matière de technologies de l'information et l'accumulation considérable de connaissances dans les domaines scientifiques et techniques font espérer que, bien utilisés, ils permettraient une croissance de l'activité économique découplée de l'usage des matières premières, et en premier lieu des énergies fossiles.

Via l'analyse de l'intensité énergétique du PIB, indicateur permettant de quantifier ce découplage, et par l'étude de différents facteurs, physiques et sociétaux, cet article tente de montrer que ce découplage hypothétique est plus que jamais sujet à des limites incompressibles.

### Mesurer l'efficacité énergétique

Toute activité humaine nécessite de l'énergie. Aussi bien pour assurer les besoins de base tels que le chauffage, les déplacements, que pour la fabrication de biens à partir de matières premières et la vente de services, l'énergie est partout nécessaire. Puisque la base de toute activité économique est l'*input* énergétique, l'efficacité d'une économie peut se mesurer à sa capacité à transformer efficacement l'énergie en biens et en services.

L'efficacité énergétique augmente d'année en année, c'est un fait avéré. Mais peut-elle devenir suffisante pour compenser la déplétion des énergies fossiles ou réduire le risque climatique ? Alors que le pic de pétrole conventionnel a été dépassé en 2006, c'est probablement entre 2015 et 2025<sup>2</sup> que nous atteindrons le pic de production "tous liquides" c'est-à-dire incluant la production des pétroles non conventionnels (de schistes, *off-shore*, biocarburants,...). Les pics de production du charbon et du gaz suivront, alors que les énergies alternatives sont loin de pouvoir se substituer au même rythme, notamment pour des raisons abordées par la suite.

---

<sup>1</sup> Pour la brièveté du texte, nous nous focaliserons sur l'aspect énergétique, mais l'analyse est facilement extrapolable aux problématiques climatiques.

<sup>2</sup> Estimation notamment d'Olivier Roch, voir <http://bit.ly/PBmvaO>, ou BITRE <http://bit.ly/gQwpH3>



Pour pouvoir évaluer cette efficacité, il est possible d'utiliser l'intensité énergétique de l'économie, définie comme le rapport de la consommation d'énergie par le produit intérieur brut (PIB). Ce rapport varie fortement entre les pays, puisqu'il dépend notamment de la part des services et du prix de l'énergie. Néanmoins, il varie très lentement au sein d'un même pays, et évolue encore moins vite au niveau mondial : depuis 1970, chaque augmentation de 1% du PIB mondial a été accompagnée d'une augmentation de 0,6% de l'énergie primaire<sup>3</sup>, soit une amélioration moyenne de 0,7% par an. Ce taux est quasiment constant, sans à-coup, montrant que les variations locales sont compensées au niveau global. Par exemple, si un pays délocalise son industrie et augmente sa part de services, il augmente son intensité énergétique mais doit importer davantage en provenance de pays tels que la Chine, dont la consommation énergétique a explosé en même temps que ses exportations.

La variation de l'intensité énergétique mesure donc bien l'amélioration de l'efficacité des procédés de productions des biens et des services dans une économie mondialisée.

Il est facile de démontrer<sup>4</sup> que le taux de croissance du PIB par habitant est à peu près égal à la somme de l'augmentation de la consommation énergétique par habitant, et de l'évolution de l'intensité énergétique du PIB. Par exemple, si l'amélioration de l'intensité est de 1%/an, il faut une augmentation de 2% de la consommation en énergie pour obtenir une croissance du PIB par habitant de 3%. Cette équation reflète la corrélation étroite observée entre la croissance économique et la croissance de la consommation d'énergie au niveau mondial : lors des trente glorieuses, le PIB par habitant augmentait de 3% par an avec une hausse des consommations énergétiques de 2%, tandis que de nos jours il est de 1.5% avec une énergie par habitant qui n'augmente que de 0.5%/an.

De ce qui précède, nous comprenons l'importance d'augmenter significativement les intensités énergétiques. Or, comme vu précédemment, elles ne s'améliorent que très lentement depuis 40 ans, sans aucun signe d'accélération. C'est presque l'inverse que nous observons et ce, malgré la hausse du prix de l'énergie et les politiques de réduction des gaz à effet de serre. Pourtant, beaucoup d'experts pensent qu'une politique adaptée conjuguée au progrès technique permettrait d'obtenir à l'avenir un découplage satisfaisant entre activité économique et énergie. Certains auteurs utilisent les termes de '3<sup>ème</sup> révolution industrielle' ou 'croissance verte' pour qualifier de telles

---

<sup>3</sup> Pour des périodes longues, voir Pierre Villa : <http://bit.ly/17rNNte> , sinon le GIEC cité ici : <http://bit.ly/wrLsMO>

<sup>4</sup> J.M. Jancovici propose une simple démonstration à la fin de <http://bit.ly/wrLsMO>



améliorations très significatives qui conduiraient à un nouveau cycle de Kondratiev. L'un des promoteurs les plus connus de ce concept, Jeremy Rifkin, estime par exemple qu'une telle révolution sera possible grâce au progrès technique par à la mise en réseau de moyens de production d'électricité renouvelable décentralisés.

Cette vision semble très optimiste. Certes le progrès technique existe, mais un certain nombre de facteurs viennent limiter son impact sur les intensités énergétiques.

### Rendement décroissant de l'énergie investie

Comme toute activité humaine, la capture de l'énergie requiert elle aussi une dépense énergétique : l'agriculteur doit s'alimenter pour travailler son champ, il faut des machines pour extraire le pétrole du sol, le raffiner et le transporter, il faut des usines pour fabriquer des éoliennes et ses constituants, etc. La quantité d'énergie disponible une fois déduite l'énergie nécessaire à sa production s'appelle l'énergie nette, ou surplus énergétique.

Pour calculer l'énergie nette, il est possible d'utiliser l'EROI (Energy Return On Energy invested), qui est le ratio de l'énergie utilisable rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour l'obtenir. Quand l'EROI d'une ressource est inférieur ou égal à 1, cette source d'énergie est en fait un "puits d'énergie", et ne peut plus être utilisée comme source d'énergie primaire.

Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'homme a profité d'une énergie présentant un excellent EROI, le pétrole, mais les choses changent et les EROI sont en décroissance continue<sup>5</sup> depuis 50 ans. Ainsi, alors que dans les années 1930, il suffisait d'utiliser 1 baril de pétrole pour en produire 100 (EROI de 100:1), le ratio est passé à 50:1 dans les années 1970, et 20:1 en 2000. Cela s'explique par le fait que, les réserves faciles d'accès ayant été exploitées en premier, il faut de plus en plus d'énergie pour extraire le pétrole devenu très incommode à extraire : champ en fin de vie, ou situé en *offshore* de plus en plus profond, ou dans des environnements très difficiles comme l'Arctique. Les pétroles non conventionnels et les agrocarburants nécessitent des procédés encore plus énergivores pour être exploités et présentent des EROI bien plus faibles, de l'ordre de 5:1 pour les sables bitumineux (ce qui signifie que seule 70% de l'énergie stockée soit effectivement récupérés) et 2:1 pour les bioéthanol en Europe. Les autres énergies fossiles présentent aussi des coûts d'extraction

---

<sup>5</sup> La plupart des valeurs citées viennent de : Murphy & Hall, *Year in review--EROI or energy return on (energy) invested*. <http://bit.ly/16KwALo>



de plus en plus élevés, auxquels il faudrait ajouter, pour limiter les conséquences sur le climat, l'énergie nécessaire à la séquestration du CO<sub>2</sub>, de l'ordre de 30% de celle extraite.

Hors hydraulique, les sources d'énergie renouvelables ont également de faibles EROI, que ce soit l'éolien ou le solaire photovoltaïque, car il faut de l'énergie pour produire les capteurs, les installer et les maintenir. Des études estiment ainsi à 3 :1 l'EROI des centrales photovoltaïques en Espagne<sup>6</sup>. La construction des systèmes de stockage nécessaires à la gestion de l'intermittence (tel que pompage-turbinage, hydrogénisation, stockage chimique, ...), et les pertes de rendements associées<sup>7</sup>, peuvent aussi être des facteurs importants de réduction des retours énergétiques.

Cette baisse tendancielle des EROI implique donc que, toutes choses étant égales par ailleurs, il faut plus d'énergie primaire pour produire la même quantité de biens et de services, ce qui va à l'encontre du découplage.

D'autres problèmes d'approvisionnement en matières premières peuvent aussi limiter ce découplage. Ainsi, beaucoup de technologies liées à l'énergie requièrent des matériaux rares, ou qui le deviennent, ou qui sont soumis à des contraintes géopolitiques fortes. Même des métaux tels que le cuivre, le zinc ou l'argent ont des perspectives limitées<sup>8</sup>. L'approvisionnement en matières premières peut donc contraindre le déploiement d'équipements susceptibles d'améliorer l'intensité énergétique. Par ailleurs, il faut de plus en plus d'énergie pour extraire ces matériaux, ce qui affecte aussi l'énergie grise de tous les biens qui en dépendent.

---

<sup>6</sup> Calculs de Charles Hall et Pedro A. Pietro : <http://bit.ly/129C4tj>, ou Michael Dale : <http://stanford.io/10x8zz5> ; Ils intègrent notamment l'énergie nécessaire à l'installation, le raccordement etc.

<sup>7</sup> D'après Ulf Bossel, 80 % de l'énergie électrique produite par une éolienne est perdue si elle est transformée en hydrogène puis reconvertie en électricité dans une pile à combustible : <http://phys.org/news85074285.html>

<sup>8</sup> D'après Philippe Bihouix, l'extraction et le traitement des métaux consomment déjà entre 8 et 10 % de l'énergie primaire mondiale : <http://bit.ly/KOB2IV>



### Aspects sociétaux

Toute politique d'amélioration des intensités énergétiques se doit de plus de prendre en compte des réticences dans la société. Machiavel écrivait déjà qu'« *il faut considérer qu'il n'existe rien de plus difficile à accomplir, rien dont le succès ne soit plus douteux, ni rien de plus dangereux à mener, que d'initier un nouvel ordre des choses. Car le réformateur a des ennemis parmi tous ceux qui profitent de l'ordre ancien, et seulement de tièdes défenseurs chez tous ceux qui pourraient profiter de l'ordre nouveau, cette tièdure émergeant en partie de la crainte de leurs adversaires, qui ont les lois en leur faveur ; et en partie de l'incrédulité de l'humanité, qui ne croit réellement à rien de nouveau tant qu'elle n'en a pas vraiment fait l'expérience.* »

Or, vouloir réduire significativement la consommation énergétique d'une société c'est bien initier un nouvel ordre des choses, tant l'énergie est structurante pour une société. De fait, nous constatons des résistances aux politiques publiques de sobriété et d'amélioration des intensités énergétiques, freinant leurs mises en œuvre. Des oppositions apparaissent, que ce soit face à l'installation d'équipements (champs d'éoliennes, réseaux intelligents, lignes Haute-Tension, nanotechnologies, .... ) , face au changement d'activité vers des activités moins intensives en énergie (par exemple de l'industrie automobile vers la rénovation des bâtiments), face au fléchage de la consommation vers des biens plus écologiques ( taxe carbone et sur l'énergie...) ou face à la promotion des comportements sobres (limitations des vitesses automobiles, densification des villes, ...). Toutes les mesures liées à l'énergie affectent nécessairement de nombreuses catégories sociales, et sont donc difficiles à mettre en place, particulièrement en démocratie.

Même si le progrès technique améliore l'efficacité d'un bien, il peut y avoir une augmentation globale des consommations énergétiques due à l'effet rebond, car la diminution du prix associée engendre généralement une augmentation de la demande de ce bien. Plus généralement, il y a une vraie difficulté à inciter les agents économiques à investir pour réduire leur consommation ou améliorer leur efficacité énergétique, que ces derniers n'en perçoivent pas l'intérêt ou bien qu'ils n'aient pas les moyens financiers nécessaires à l'investissement.

Ajoutons que les incitations via des aides basées sur des critères monétaires peuvent se révéler des freins au développement de filières industrielles efficaces. L'industrie photovoltaïque en est un exemple. La délocalisation en Chine, devenue premier producteur mondial grâce, notamment aux faibles coûts du capital et de l'énergie, a empêché jusqu'ici le développement de technologies avec des EROI élevés. Les politiques d'achats subventionnés favorisent en fait les meilleurs retours financiers, et non pas les meilleurs retours énergétiques.



### Rendement décroissant de l'innovation

De plus en plus de moyens sont investis dans l'innovation technologique et la recherche scientifique, sans pour autant, nous l'avons vu, que les intensités énergétiques ne s'améliorent au même rythme. L'explication commune est que les investissements sont mal dirigés, et que la solution consiste à les flécher vers l'amélioration des processus, vers la recherche pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et vers de nouvelles sources d'énergie. Cet argument est en partie exact, mais minimise la difficulté intrinsèque de l'économie libérale à diriger l'innovation.

Un autre phénomène freine l'amélioration des intensités énergétiques : la baisse des rendements de la recherche scientifique et de l'innovation technologique. Cette baisse des rendements s'illustre par exemple par le fait qu'il faut de plus en plus de moyens humains et financiers pour produire un brevet ou faire une découverte<sup>9</sup>. En dehors des domaines du traitement de l'information et de la biologie, les innovations majeures appartiennent au passé et les efficacités ne s'améliorent que lentement, souvent à un taux inférieur à 1% par an. Quant aux domaines où la technologie avance le plus vite, tels que l'informatique ou les biotechnologies, ils n'ont pas engendré à ce jour d'amélioration sensible de l'efficacité énergétique globale de l'économie<sup>10</sup>, notamment à cause des importants investissements nécessaires, tant en matériaux qu'en énergie. Certes il y a encore des marges de progrès considérables, car nous sommes loin d'avoir atteint les limites physiques de stockage et de manipulation de l'information. Mais cette marge de progrès n'est en aucun cas extrapolable aux autres secteurs.

### Inéluctable décroissance

De ce qui précède nous pouvons conclure qu'il est improbable que les taux d'amélioration des intensités énergétiques s'améliorent significativement dans les années et décennies qui viennent. Il n'y aura pas de découplage fort entre consommation énergétique et activité économique. Même si plus de moyens sont mis dans la recherche et l'innovation, des causes structurelles limiteront leurs effets en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique globale et d'extraction d'énergie nette.

---

<sup>9</sup> Nous reprenons ici un argument développé notamment par Joseph Tainter

<sup>10</sup> Voir par exemple le rapport du CEDD sur la Croissance Verte : <http://bit.ly/103o8De>



Il n'y a donc pas de raison pour que les baisses tendanciennes de la croissance de la quantité d'énergie nette disponible par habitant et de la croissance de l'activité économique, observées depuis 20 ans, s'inversent. *A contrario*, il est fort possible que ces baisses s'accroissent du fait de rétroactions. Par exemple, la baisse des EROI provoque, à production constante, une baisse de l'énergie nette disponible pour irriguer l'économie. Cela limite les capacités d'investissement pour augmenter la production énergétique ou améliorer les processus industriels, exacerbe la crise sociale et retarde l'acceptation du changement par les citoyens.

Énergie et activité économique formant un système couplé, nous devrions donc voir continuer dans les années à venir le ralentissement de la croissance économique mesurée par le PIB. Il est fort probable hélas que les pays producteurs d'hydrocarbures continuent à les consommer pour maintenir leur croissance encore quelque temps, malgré le risque climatique. Le prix de l'énergie devrait se maintenir à des niveaux élevés, mais sans pour autant permettre le financement suffisant de solutions alternatives.

Certes, le PIB ne mesure pas le bien-être social et sa baisse ne sera pas nécessairement inquiétante si elle est comprise, acceptée, et si ses conséquences sont anticipées. Mais la plupart des économistes, hommes politiques, journalistes ou spécialistes, prennent aujourd'hui encore pour hypothèse, implicite ou explicite, que le progrès technique permettra un fort découplage<sup>11</sup>. Cette hypothèse ne paraît pas solidement fondée, et il serait enfin temps d'admettre qu'il y a des limites à la croissance.

### Penser autrement

Ces limites sont connues depuis au moins 40 ans et la parution du rapport Meadows pour le Club de Rome. Mais elles sont difficiles à appréhender avec les indicateurs, unités, et concepts économiques habituels. Par exemple, en utilisant l'unité « baril de pétrole » pour mesurer la quantité d'énergie produite, nous sommes poussés à croire que les réserves de pétrole du Canada sont supérieures à celle de l'Irak, ou que, grâce au progrès technique permettant d'exploiter les pétroles de schistes, les États-Unis vont devenir les premiers producteurs mondiaux. Mais la perspective change complètement si nous intégrons le fait qu'un baril de pétrole non conventionnel contient 30% à 50% fois moins d'énergie nette qu'un baril irakien<sup>12</sup> !

---

<sup>11</sup> Le découplage est ainsi présenté comme « une nécessité majeure » dans le scénario GreenPeace 2013, sans que soit discuté sa faisabilité

<sup>12</sup> Voir les calculs de Antonio Turiel : <http://bit.ly/VHgyXG>





De manière générale, toutes les analyses peuvent être erronées si elles ne prennent pas en compte des paramètres physiques, permettant de mieux appréhender, quantitativement, les liens entre énergie/climat, économie, matières premières et progrès technique. A l'aune d'indicateurs tels que l'intensité énergétique, l'EROI ou le carbone évité, et sans prendre en compte les aspects financiers ou sociétaux, il est fort improbable que des d'innovations jugées prometteuses par des prospectivistes tels que Jeremy Rifkin (réseaux intelligents, imprimante 3D, photovoltaïque, piles à combustibles, ...) soient suffisantes pour compenser la déplétion des ressources fossiles et maintenir l'accroissement de l'activité économique<sup>13</sup>.

Alors que les économistes semblent incapables de comprendre les crises et le fait que nous vivons un point de basculement<sup>14</sup> de l'histoire de l'humanité, il nous faut un nouveau paradigme du progrès. Les innovations, notamment via les technologies numériques et leurs fantastiques possibilités de disséminer l'information, peuvent aider à son émergence, mais seulement à condition de prendre conscience de leurs dépendances aux ressources physiques et aux organisations sociales, et accepter des changements profonds de nos modes de vie.

---

<sup>13</sup> Lire par exemple les travaux de Robert Gordon, "The death of Innovation, the end of growth" <http://bit.ly/10bccKF>

<sup>14</sup> Cf Yves Cochet : <http://bit.ly/13BnRon>. Pour l'accompagner, vous trouverez [ici](#) une note de lecture sur le "Bristol Peak Oil Report".