



**HAL**  
open science

## Transition énergétique et matériaux : de nouvelles limites ?

Patrick Criqui, Sandrine Mathy

► **To cite this version:**

Patrick Criqui, Sandrine Mathy. Transition énergétique et matériaux : de nouvelles limites ?. CNRS Editions. Inventer l'avenir - L'ingénierie se met au vert, pp.14-18, 2019, 978-2-271-12679-5. hal-02312133

**HAL Id: hal-02312133**

**<https://hal.science/hal-02312133>**

Submitted on 11 Oct 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Transition énergétique et matériaux : de nouvelles limites ?

Patrick Criqui et Sandrine Mathy

Il y a plus de quarante ans, le MIT posait pour la première fois dans son rapport au Club de Rome, *The Limits to Growth*, la question des limites globales à la croissance économique. Suivirent les chocs et contre-chocs pétroliers, la prise de conscience du changement climatique, puis une nouvelle envolée des prix du pétrole et des matières premières avant la crise financière de 2008. Depuis 2014, le front des prix est revenu à la normale et les observateurs des marchés annoncent même la fin durable du *super-cycle* des matières premières (Mc Kinsey Global Institute, 2017).

Malgré cela, le péril climatique appelle à une grande transition technologique. Elle doit conduire, à l'horizon 2050, à la réduction massive des émissions de gaz à effet de serre, en particulier par la diminution des consommations d'énergies fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel. Cela demande de déployer le plus rapidement possible l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et, dans les pays où c'est possible, l'énergie nucléaire. Le système énergétique fossile qui s'est déployé sur deux siècles de révolution industrielle doit, à très grands traits, être déconstruit et décarboné en 35 ans.

La transition des énergies fossiles aux décarbonées, si elle se déroule comme nécessaire avant le milieu du siècle, constituera un événement sans précédent historique. L'ampleur du défi conduit certains à douter alors qu'il en va de l'avenir du climat de la planète. Si l'on se place dans cette perspective de transition accélérée, la question se pose sur la manière dont elle pourrait être facilitée par des progrès rapides dans les technologies bas carbone. La transition énergétique pourrait, au contraire, être freinée par la disponibilité des ressources nécessaires au renouvellement complet du stock de capital énergétique.

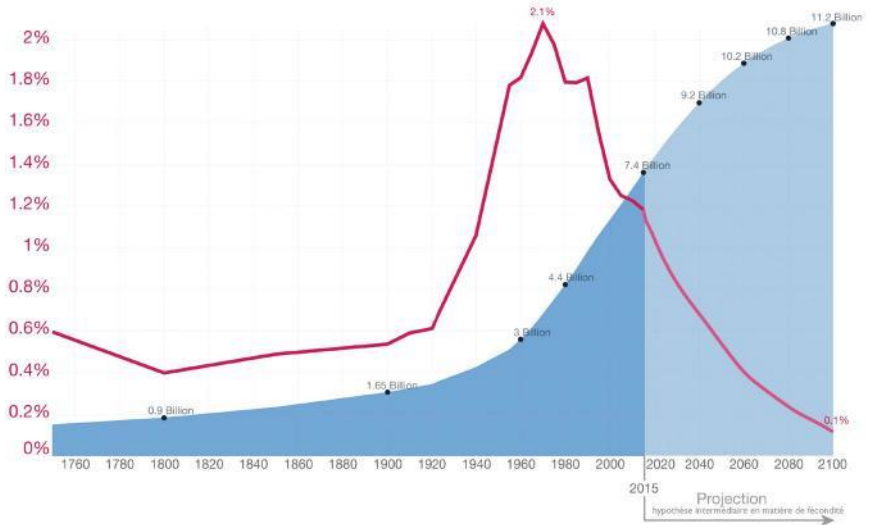


Figure 1

Croissance de la population mondiale, 1750-2100 (en rouge, taux de croissance annuel, en bleu, population mondiale) (<https://ourworldindata.org/world-population-growth>).

C'est ainsi qu'émerge la question d'éventuelles limites de la transition énergie-climat, posée en termes de contenu en énergie et en matériaux des technologies bas carbone.

### Vers une croissance plus lente de l'économie mondiale

Les limites sont souvent posées en termes d'impossibilité mathématique d'une croissance indéfinie, en gardant le rythme actuel, de l'économie mondiale. Dans le rapport au Club de Rome de 1972 et les études ultérieures (Turner, 2014), la poursuite des tendances conduit à l'épuisement des ressources, à un effondrement économique un peu avant 2020, suivi peu après par celui de la population. Comme on le verra plus loin, les théories du pic pétrolier prédisent au même horizon une baisse de la production pétrolière. Nous serions donc à la veille de l'effondrement.

Or on a de bonnes raisons de penser que ce n'est pas le cas. En effet, une transition démographique se produit dans la quasi-totalité des régions du

monde et les projections des démographes sont globalement inchangées depuis près de 30 ans. Dans leur hypothèse médiane, la population mondiale se stabiliserait dans la deuxième moitié du siècle à un niveau de l'ordre de 10 à 12 milliards d'habitants. Seules certaines régions, comme l'Afrique, maintiendront une forte dynamique démographique à cet horizon.

Parallèlement, la croissance économique ralentira progressivement dans toutes les régions. Elle se trouve déjà globalement en dessous de 2 % par an dans les économies les plus avancées et le débat sur le ralentissement des gains de productivité est toujours d'actualité (Gordon, 2014). Les économies émergentes devraient rejoindre ces niveaux sur le long terme, lorsqu'elles auront effectué leur rattrapage. La croissance exponentielle à taux élevé n'est donc pas l'hypothèse la plus probable, ce qui conduit à poser dans des termes assez différents la question de l'épuisement des ressources naturelles.

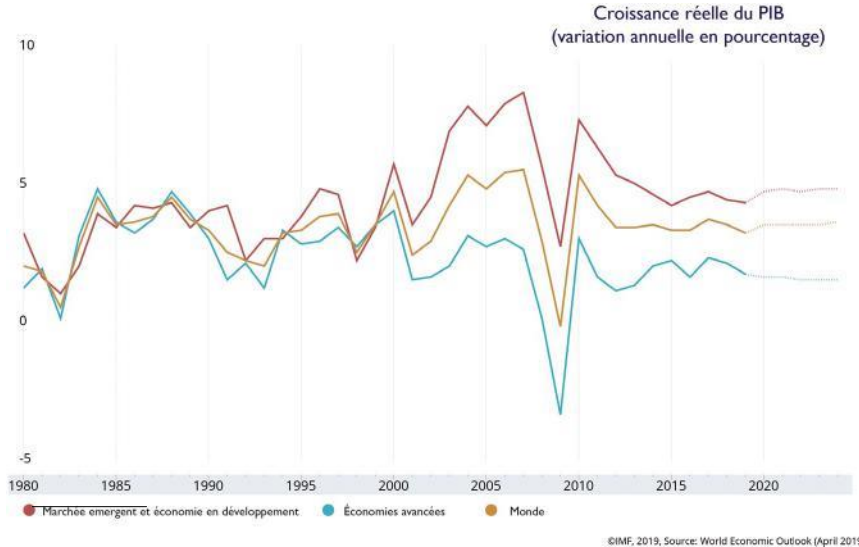


Figure 2

Croissance du PIB (FMI, Real GDP Growth, 2018).

## Les ressources fossiles sont-elles vraiment menacées d'épuisement ?

Le débat sur l'épuisement des ressources fossiles nous met face à une situation de type « les experts sont formels... mais ils ne sont pas d'accord ». D'un côté des géologues, spécialistes des hydrocarbures, exhibent la fameuse courbe en cloche, dite de Hubbert, pour pronostiquer un plafonnement de la production pétrolière, puis son déclin rapide à court terme. Cette thèse du « pic pétrolier » est en particulier soutenue par l'ASPO, *Association for the Study of Peak Oil*.

De l'autre, la plupart des économistes défendent la thèse de la renouvelabilité économique des ressources non renouvelables. Ainsi, chaque fois que des tensions apparaissent sur les marchés, le prix augmente et ouvre la voie à l'exploitation de nouveaux gisements, plus difficiles et plus coûteux. Mais les progrès techniques rentabilisent ces gisements même lorsque, dans une évolution cyclique, le prix repart à la baisse. Cela a été observé dans les années 1970 avec les hydrocarbures offshore et, dans les années 2010, avec le gaz et le pétrole de schiste.

En fait, l'analyse des scénarios de limitation à 2 °C de l'augmentation de température montre que les réserves aujourd'hui connues ne pourront être toutes consommées : 30 9'o du pétrole, 50 9'o du gaz et 80 9'o du carbone restent en terre (McGlade et Ekins, 2015). La contrainte climatique transforme donc l'hypothétique pic pétrolier en un pic de demande, par la limitation volontaire de la consommation, au lieu d'un pic d'offre par épuisement. Comme le note en substance Pierre-Noël Giraud de l'École des Mines de Paris : pour l'énergie et le climat nous avons un problème de déchets et non un problème de ressources. Plus la transition progressera rapidement et moins la dépendance pétrolière constituera un problème économique et géopolitique majeur.

## Des fossiles aux énergies nouvelles, d'une dépendance à l'autre ?

Le déploiement de la transition énergétique peut cependant renforcer la dépendance vis-à-vis d'un certain nombre de matériaux critiques (lithium, cobalt, terres rares, manganèse, nickel, cuivre...) et structurels (ciment, acier, verre...). Par exemple, le champ magnétique des éoliennes demande soit des aimants permanents riches en terres rares (néodyme, praséodyme et dysprosium), soit des aimants classiques et des bobinages en cuivre.

L'éolien représente ainsi une intensité acier (en tonnes d'acier consommée pour un kWh produit sur la durée de vie) cinq fois plus importante que le

charbon conventionnel. De leur côté, les systèmes photovoltaïques utilisent deux technologies différentes. Les cellules de silicium représentent environ 90 % du marché, tandis que la technologie à couche mince est basée sur des combinaisons d'éléments comme le gallium, l'arsenic, le cadmium, le tellure, le cuivre, l'indium ou encore le sélénium. Ces deux technologies utilisent également de l'argent comme matériau de contact.

Les réseaux de transport et de distribution de l'électricité doivent eux aussi subir une mutation importante pour suivre le déploiement et l'intégration des énergies renouvelables. Leur construction consomme une grande quantité de ciment, acier, cuivre et aluminium. Autre enjeu crucial, le stockage de l'énergie deviendra indispensable pour équilibrer les systèmes à forte proportion d'électricité renouvelable, dont la production varie souvent. Il en va de même dans le domaine du transport, pour le déploiement des véhicules électriques. On trouve dans les accumulateurs du cobalt, du nickel ou du manganèse combiné avec du lithium ou du lanthane, du cérium, du praséodyme, du néodyme et d'autres terres rares. Enfin, pour réduire le poids des véhicules, on combine généralement du magnésium à l'aluminium, mais aussi des éléments plus critiques comme le cobalt dans certains superalliages de haute température.

Une littérature scientifique importante (Månberger et Stenqvist, 2018) est aujourd'hui consacrée à l'impact de l'intensité matière de la transition énergétique, dans des études technologie par technologie ou dans le cadre de scénarios globaux (Traversa).

Sur la base des intensités en matériaux actuelles et selon les scénarios du Fonds mondial pour la nature (WWF), si la contribution mondiale des énergies éolienne et solaire passait de 400 à 12 000 TWh en 2035, puis à 25 000 TWh en 2050, cela nécessiterait, en cumul, près de 3,2 milliards de tonnes d'acier, 310 millions de tonnes d'aluminium et 40 millions de tonnes de cuivre. Cela correspond à une augmentation de 5 à 18 % de la production mondiale de ces métaux sur les 40 prochaines années. Cela alors même que la demande mondiale en métaux ferreux, métaux de base et métaux mineurs, en provenance surtout des pays en développement, augmente actuellement de 5 % par an.

On peut alors s'interroger sur la contrainte que pourrait faire peser la disponibilité des ressources en matières premières sur la transition énergétique mondiale. L'analyse doit alors prendre en compte des mécanismes économiques d'ajustement d'offre et de demande sur les marchés de matières premières. En effet, un tel niveau de sollicitation des ressources ne se fera pas sans créer des tensions liées aux sous-capacités de production.