

MÉTABOLISME URBAIN

L'EMPREINTE MATÉRIELLE DE L'ÉCONOMIE

QUELS ENJEUX DE SOUTENABILITÉ ?



Rapport de Boris CHABANEL
Septembre 2016

UTOPIES®

GRANDLYON
la métropole

Métropole de Lyon

Direction de la planification et des politiques d'agglomération / Service écologie et développement durable
Direction de la prospective et du dialogue public

Coordination

Anouk Desouches
Antoine Courmont

Sommaire

Présentation de l’étude	3
Introduction : création de richesses et ressources naturelles	4
1. Une tendance historique mondiale : l’ère industrielle repose sur une consommation effrénée de ressources non renouvelables	6
1.1 Le PIB et la consommation de ressources ont augmenté beaucoup plus rapidement que la population	6
1.2 Pour la première fois dans l’histoire, les activités humaines reposent principalement sur la consommation de ressources non renouvelables.....	6
1.3 Des projections qui posent question.....	7
2. Trouver la parade : découpler croissance économique et consommation de ressources naturelles.....	8
2.1 Parvenir à une croissance indolore pour l’environnement : la croissance verte.....	8
2.2 Un nouveau modèle économique : économie circulaire, transition énergétique, bioéconomie,	9
2.3 Les mécanismes de marché et le progrès technique comme principaux leviers d’action	10
3. Qu’est-ce qu’une économie compatible avec les limites planétaires ?	12
3.1 Définir la taille limite de l’économie mondiale	12
3.2 Définir les conditions d’une économie véritablement circulaire.....	12
4. Le découplage entre croissance économique et consommation de ressources est-il possible ?	14
4.1 Des « progrès » à relativiser	14
4.2 La croissance économique dépend étroitement de celle de la consommation d’énergie	16
4.3 Les économies de ressources peuvent être annulées par l’« effet rebond »	18
4.4 Atteindre une économie circulaire est mathématiquement impossible dans une économie en croissance.....	18
5. La poursuite de la croissance matérielle est-elle possible ?	22
5.1 Des limites à la consommation de ressources non renouvelables.....	22
5.2 Les ressources renouvelables pourront difficilement prendre le relais.....	31
6. L’Europe apparaît particulièrement exposée aux tensions sur l’accès aux ressources naturelles mondiales.....	36
4.1 Une nouvelle donne matérielle pour l’économie mondiale	36
4.2 L’accès aux ressources naturelles mondiales devraient connaître des tensions croissantes	37
4.3 Les failles de l’économie globalisée : hyperspécialisation et hypercomplexité.....	39
4.4 L’Europe apparaît particulièrement vulnérable face aux tensions sur l’accès aux ressources naturelles	41
7. La métropole lyonnaise face à l’enjeu des ressources naturelles	47
7.1 Une mobilisation des institutions internationales.....	47
7.2 La France paraît tout aussi vulnérable que l’ensemble de l’Europe.....	47
7.3 Une large partie des consommations mondiales de ressources naturelles se concentre dans les métropoles	49
7.4 La métropole lyonnaise se caractérise dans le paysage français par l’importance de son tissu industriel.....	49
Ressources documentaires	50

Présentation de l’étude

Cette étude s’inscrit dans la continuité de la réflexion engagée par la Métropole de Lyon sur l’objectivation des vulnérabilités écologiques du territoire à partir des outils de métabolisme urbain. En permettant d’estimer les flux de matières premières et d’énergie absorbés quotidiennement par les villes, l’analyse du métabolisme urbain peut permettre de mieux cerner la dépendance de la métropole lyonnaise aux ressources naturelles (matières et énergies renouvelables et non renouvelables) provenant de l’extérieur du territoire et donc sa vulnérabilité en matière d’approvisionnement.

La présente étude vise à analyser l’empreinte matérielle de l’économie lyonnaise en mettant en lumière l’ampleur et la nature de la dépendance de l’économie lyonnaise aux ressources naturelles extérieures.

Introduction : création de richesses et ressources naturelles

Jusque récemment, la question du soubassement matériel de l’économie a été largement ignorée par les décideurs ainsi que par la pensée économique dominante. Bon nombre d’observateurs y voit un héritage de la révolution industrielle. Fondée sur l’exploitation à grande échelle de ressources énergétiques offrant une puissance de travail inédite – le charbon d’abord puis le pétrole et le gaz –, la révolution industrielle a permis de décupler la productivité des activités d’extraction et de transformation des ressources naturelles en biens et services. Permettant une expansion sans précédent de la population et de la production de richesses, **cette nouvelle ère d’abondance semblait avoir libéré la dynamique économique du facteur limitant de la disponibilité des ressources naturelles¹**. Si bien que les économistes standards évacueront rapidement de leur modèle de croissance le facteur « ressources naturelles », au motif que **tout risque d’épuisement pouvait être contrecarré grâce aux mécanismes de marché et au progrès technique**, dont les effets combinés inciteraient les agents économiques à (F. Fizaine, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015) :

- réduire leur consommation de ressources rares pour un même service rendu.
- augmenter le recyclage de ces ressources.
- découvrir et mettre en exploitation de nouveaux gisements de ces ressources.
- développer des substituts plus compétitifs à ces ressources.

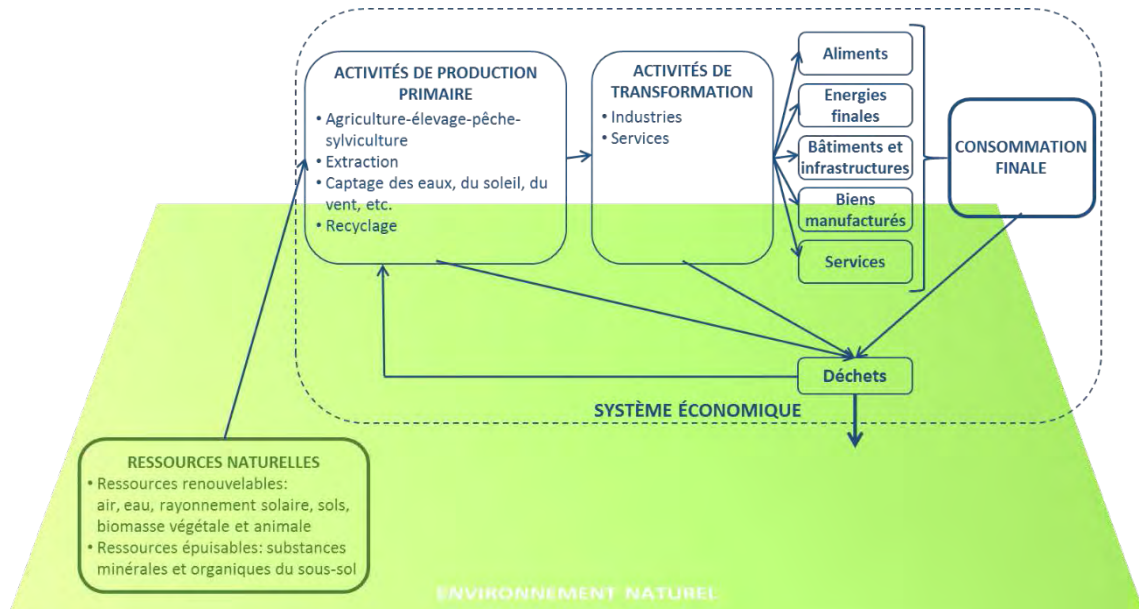
Les débats récents autour de la montée des prix du pétrole et des métaux conduisent cependant à rappeler une évidence mise en lumière dès le 18^{ème} siècle par les premiers économistes (physiocrates) : **il n’y a pas de création de richesses économiques sans ressources naturelles** (F. Fizaine, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015). La production de n’importe quel bien ou service repose sur l’extraction et la transformation d’une quantité plus ou moins importante d’énergie et de matière. Ces ressources sont mises à disposition par la nature : les activités humaines ne peuvent pas les produire mais simplement les récupérer et les concentrer ; ces ressources ne peuvent donc être substituées par du capital technique, ce dernier ne pouvant être « créé à partir de rien » (F. Fizaine, 2014). **Les ressources naturelles et leurs aménités sont non seulement à l’origine du processus économique et mais également à son issue** : la consommation des biens et services consommés aboutit inéluctablement à la dissipation d’énergie et au rejet de matières dans l’environnement². Il y a ainsi un lien entre l’ampleur des flux d’énergie et de matières qui entrent dans le système économique et celle des flux qui en sortent.

Le système économique peut ainsi être décrit techniquement comme un ensemble de filières visant à satisfaire les besoins humains à partir des ressources naturelles (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015). Les activités productives dites « primaires » tirent des ressources naturelles de la matière ou directement de l’énergie. Ce sont l’agriculture, l’élevage, la sylviculture, l’extraction des minerais solides et des matériaux de carrière, l’extraction des hydrocarbures, le captage des eaux, du vent, du rayonnement solaire. Pour la plupart, les matières premières produites par ces activités entrent ensuite dans un processus de transformation. L’industrie agroalimentaire transforme les matières premières destinées à la consommation alimentaire. Pour les matières premières minérales, les industries chimique et métallurgique se chargent de transformer chimiquement les matières premières pour en faire des produits standardisés – produits chimiques raffinés ou matériaux – qui constituent des intrants de l’industrie

¹ Selon Pierre-Noël Giraud et Timothée David, les ressources naturelles sont : le rayonnement solaire, l’air, l’eau, les sols et la biomasse végétale et animale, les substances minérales et organiques contenues dans le sous-sol (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015).

² Selon les lois de la thermodynamique, le processus économique engendre une transformation qualitative des flux d’énergie et de matières (F. Fizaine, 2014). Chaque transformation crée de l’« entropie », c’est-à-dire une dissipation d’énergie et de matière. Devenant de moins en moins concentrées, celles-ci perdent progressivement toute utilité productive.

manufacturière, du bâtiment et des travaux publics, mais aussi de l’agriculture et de l’élevage (engrais, produits phytosanitaires). Quant aux matières premières énergétiques, elles subissent des transformations qui ne sont que des conversions des énergies dites primaires (pétrole, charbon, gaz, uranium, biomasse, eau en mouvement, vent, rayonnement solaire) en énergies dites finales (combustibles, carburants, électricité). Au terme des filières, les besoins finaux sont satisfaits par quelques grandes catégories de produits très diversifiés : aliments, énergies finales, produits manufacturés, bâtiments et infrastructures. Enfin, le processus productif génère des rejets de déchets qui peuvent être éventuellement recyclés en son sein.



La place incontournable des flux de ressources naturelles dans le processus de création de richesses amène à poser la question de leur soutenabilité : disponibilité des ressources naturelles (épuisables et renouvelables) et capacité d’absorption des rejets par la biosphère (changement climatique, recul de la biodiversité, dégradations des écosystèmes, modification du cycle bio-géochimique de l’azote, etc.).

Cette question concerne tout particulièrement l’Europe, à deux titres. Tout d’abord, si les activités de services y occupent une place de plus en plus prédominante dans la valeur ajoutée et dans la consommation finale, il ne faudrait pas pour autant en conclure que l’économie européenne serait en phase de « dématérialisation ». Encore aujourd’hui, **les activités économiques et la consommation des ménages européens impliquent chaque année la consommation de milliards de tonnes de combustibles fossiles, minerais métalliques, minéraux, biomasse, etc.**

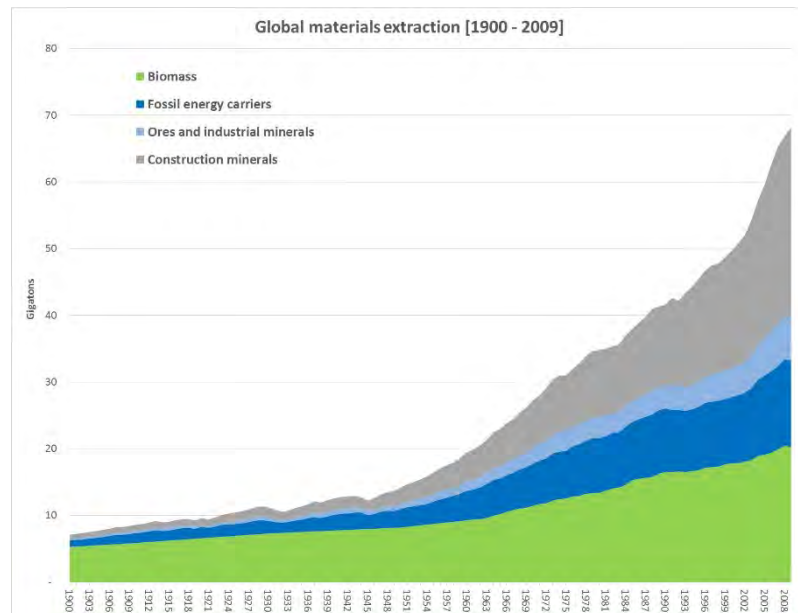
Or, plus que n’importe quelle région du monde, la satisfaction des besoins en ressources naturelles de l’Europe requiert d’importants flux d’importations : exprimée en masse, ces derniers largement supérieurs aux exportations. **L’Europe présente en particulier une forte dépendance extérieure pour les combustibles fossiles et les métaux. Cette situation s’avère problématique dès lors que ces deux ressources clés sont en voie de raréfaction à l’échelle mondiale**, ce qui laisse augurer de tensions croissantes quant à leur disponibilité et leur prix à l’avenir. Ce qui soulève de vifs enjeux de compétitivité et, plus largement, de résilience.

Cette note a pour objectif de proposer quelques clés d’analyse de cette nouvelle donne économique pour l’Europe, à laquelle ne semblent pouvoir échapper la France et la métropole lyonnaise.

1. Une tendance historique mondiale : l'ère industrielle repose sur une consommation effrénée de ressources non renouvelables

1.1 Le PIB et la consommation de ressources ont augmenté beaucoup plus rapidement que la population

Le 20^{ème} siècle a été marqué par une croissance sans précédent de la population et, plus encore, de l'économie mondiale : la population a quadruplé pour atteindre 6,4 milliards de personnes, pendant que le PIB était multiplié par 20 (A.Maddison, 2001³). Cette expansion accélérée des activités humaines trouve son pendant en termes de consommation de matières premières (F.Krausmann et alii, 2009) : toutes matières confondues, la consommation mondiale est passée de 7 milliards de tonnes en 1900 à près de 60 milliards en 2005, soit un accroissement d'un facteur 8. Comme le montre le graphique ci-dessous, l'accélération est particulièrement nette au cours des décennies d'après-guerre – période de reconstruction et d'essor de la consommation de masse – et à partir des années 2000 – marquées par l'essor des économies émergentes.



Source: F.Krausmann et alii, 2009; Alpen Adria Universität, Institute of Social Ecology

1.2 Pour la première fois dans l'histoire, les activités humaines reposent principalement sur la consommation de ressources non renouvelables

Ce que traduit également le graphique ci-dessus, c'est la transformation de la composition du substrat matériel des sociétés provoquée par la révolution industrielle (F.Krausmann et alii, 2009 ; A. Schaffartzik et alii, 2014). Historiquement, la biomasse constitue de loin la majeure partie des ressources naturelles mobilisées pour satisfaire les besoins humains (alimentation, habitat, chaleur, mobilité, etc.). En 1900, elle représente encore 75% de l'extraction mondiale de ressources. Or, tandis que la consommation de biomasse s'est accrue au même rythme que celui de la population au cours du 20^{ème} siècle, l'extraction d'énergie a quant à elle été multipliée par 10, celle de minerais de métal et de minéraux industriels par 27, celle de matériaux de construction par 34.

³ Cité par F.Krausmann et alii, 2009

Ressources épuisables et ressources renouvelables (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015)

L'économie regroupe traditionnellement les ressources en deux catégories :

- Les ressources épuisables sont constituées des gisements de substances minérales et de carbone fossile. Les gisements sont des amas présentant des concentrations exceptionnelles des substances utiles, qui autrement existent de façon très dispersée dans toute la croûte terrestre. Ils sont le produit d'une activité géologique permanente. À l'échelle des temps géologiques, ils sont donc renouvelables. Ils ne le sont évidemment pas à l'échelle humaine.
- Les ressources renouvelables sont constituées d'écosystèmes vivants ou de cycles naturels d'énergie et de matière sur lesquels l'activité humaine prélève un flux de substance utile ou d'énergie. La caractéristique fondamentale de ces ressources est qu'elles ont la capacité de se régénérer à échelle de temps humaine.

Avec la transition d'un nombre croissant de pays d'une économie agricole vers une économie industrialisée et urbanisée – et l'essor des infrastructures, du capital productif, du parc bâti et des biens de consommation de masse qui caractérise cette dernière –, les ressources minérales (minéraux de construction, combustibles fossiles et dérivés, minerais métalliques, minéraux industriels) deviennent prépondérantes à partir des années 1960 et représentent aujourd'hui environ les 2/3 de l'extraction mondiale. En d'autres termes, depuis une cinquantaine d'années, pour la première fois dans l'histoire, le fonctionnement des sociétés humaines repose en majeure partie sur l'exploitation de ressources non renouvelables. Si la biomasse constitue une ressource de « flux », les ressources minérales forment quant à elles un « stock » : par définition, elles sont disponibles en quantité limitée sur la planète et leur extraction est nécessairement amenée à connaître une baisse avant une fin définitive.

1.3 Des projections qui posent question

Le prolongement des tendances dans les décennies à venir laisse augurer d'une expansion toujours aussi massive de la consommation de ressources naturelles mondiales. Les dernières projections démographiques établies par l'ONU prévoient une augmentation continue de la population mondiale entre 2015 et 2100. Selon le scénario médian, elle passerait de 7,3 à plus de 11 milliards de personnes, soit une progression supérieure à 50%. Or, si les pays du nord entendent maintenir leur niveau de richesse matérielle et ceux du sud aspirent à le rejoindre, la croissance de l'extraction mondiale ne peut qu'être appelée à se poursuivre vigoureusement. Une convergence globale des niveaux de consommation de ressources naturelles au niveau des pays occidentaux couplé à la croissance attendue de la population mondiale conduirait à doubler voire tripler l'extraction mondiale de matière premières (F. Krausman et alii, 2015).

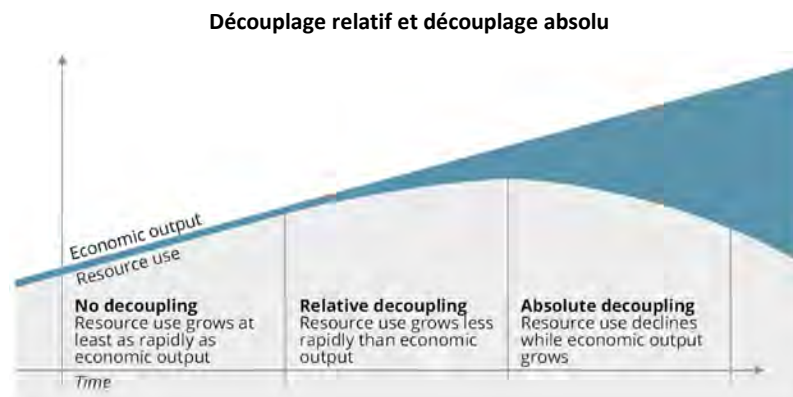
Mais si le bon sens veut que « les arbres ne montent pas jusqu'au ciel », il paraît difficile d'imaginer que la croissance économique et l'extraction de ressources naturelles qui la soutient puissent se poursuivre indéfiniment dans un monde fini (D.Meadows et alii, 2004). C'est pourtant le défi qu'entend relever l'approche de la « croissance verte ».

2. Trouver la parade : découpler croissance économique et consommation de ressources naturelles

2.1 Parvenir à une croissance indolore pour l'environnement : la croissance verte

Depuis quelques années, un certain nombre d'institutions nationales et internationales (Commission Européenne, OCDE, Banque Mondiale, Programme des Nations Unies pour l'Environnement...) promeuvent l'idée de « croissance verte » ou « économie verte »⁴. Cette approche se donne pour objectif de parvenir à un modèle économique permettant de « stimuler la croissance économique tout en s'assurant que le patrimoine naturel continue à fournir les ressources et les services environnementaux dont dépend notre bien-être ». La perspective de la croissance verte se donne ainsi pour horizon un découplage entre croissance de l'activité économique d'une part, et consommation de ressources et rejets de déchets et polluants d'autre part. En d'autres termes, elle entrevoit la possibilité de concilier la préservation de l'environnement avec le maintien, voire l'accroissement, du confort matériel des sociétés occidentales et sa généralisation au reste de la population mondiale.

Pour bien mesurer l'ampleur du défi que constitue le découplage entre croissance économique et impacts environnementaux, il convient de rappeler que celui-ci peut être absolu ou relatif. Le découplage est absolu lorsque l'indicateur de pression environnementale concerné est stable ou en diminution, tandis que le PIB augmente. Il est relatif lorsque l'impact sur l'environnement s'accroît mais à un rythme moins soutenu que celui de la croissance économique.



Source : European Environment Agency, 2015

⁴ Voir par exemple : UNEP – Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication – 2011; International Resource Panel – Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth – United Nations Environment Programme (UNEP), 2011 ; OCDE – Towards Green Growth – 2011

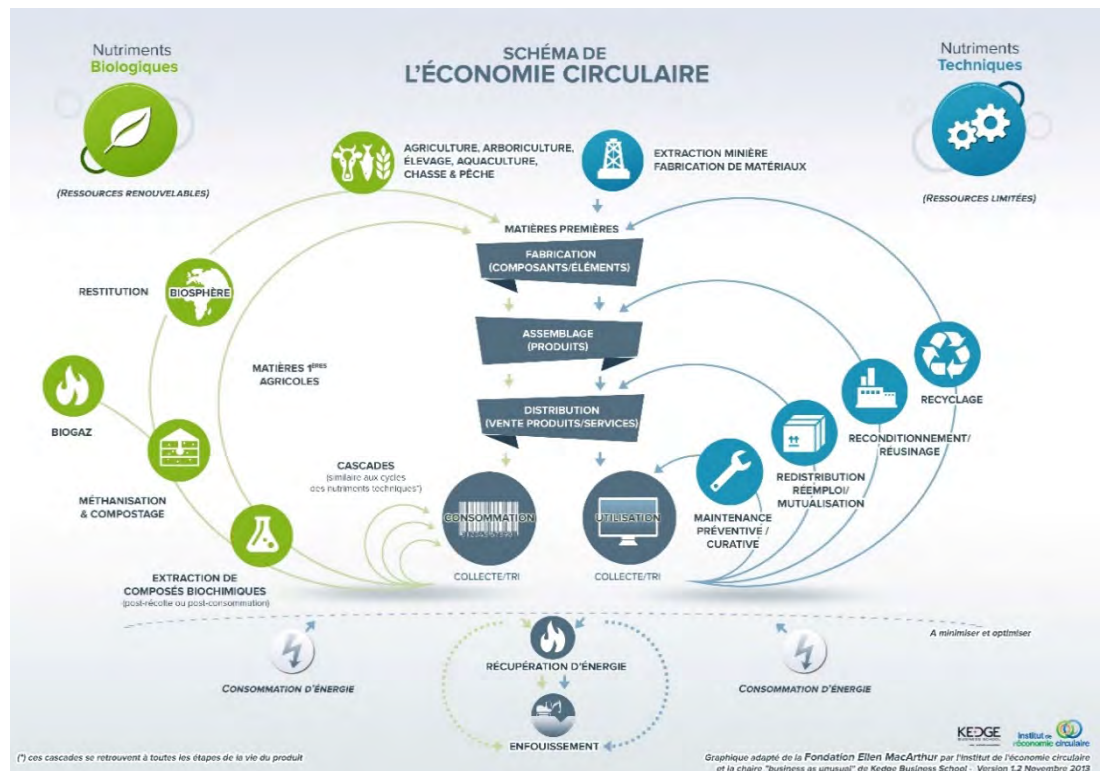
2.2 Un nouveau modèle économique : économie circulaire, transition énergétique, bioéconomie,

Cet objectif de découplage entre croissance économique et pressions environnementales se cristallise ces dernières années par la promotion de trois concepts dessinant les contours d'un nouveau modèle de développement économique.

Economie circulaire : tendre vers une économie « zéro déchet »

Les démarches en faveur de l'économie circulaire lancées tant à l'échelle européenne que française⁵ se fondent en effet sur la remise en cause du modèle de production et de consommation linéaire qui prévaut depuis la révolution industrielle : extraction de matières premières > production > consommation > déchets. Les politiques en faveur de l'économie circulaire visent à transformer ce modèle de façon à réduire au minimum la consommation de ressources naturelles (flux entrant) et les rejets de déchets ultimes (flux sortants). La notion de circularité fait référence au fonctionnement en boucle des écosystèmes où les flux matériels ne connaissent ni début ni fin : lorsque un processus « se sépare » d'une matière, elle est ensuite « consommée » par un autre processus (S. Kampelmann, 2016).

Au-delà de cette approche générale, les réflexions et stratégies engagées par divers organismes publics (Commission Européenne, 2015 ; CESE, 2014 ; Institut de l'économie circulaire, 2013 ; Ademe, 2014) mettent particulièrement l'accent sur l'optimisation du cycle de vie des produits. Dans une économie circulaire, les produits sont conçus, fabriqués et utilisés de façon à ce qu'ils conservent leur valeur le plus longtemps possible et que, une fois en fin de vie, ils puissent être maintenus dans le cycle économique afin d'être utilisés pour recréer de la valeur, en redevenant soit des matières premières nouvelles ou des produits réutilisables (voir schéma ci-dessus).



Source : <http://www.institut-economie-circulaire.fr>

⁵ Voir par exemple le Paquet «économie circulaire» adopté en décembre 2015 par la Commission Européenne.

Transition énergétique : tendre vers une économie bas carbone

La notion de transition énergétique constitue un autre volet essentiel des politiques de transition écologique à l’œuvre en France et à l’échelle européenne. Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, elle constitue pour l’essentiel le passage vers système énergétique bas carbone, c’est-à-dire visant une baisse des consommations d’énergie et un mix énergétique faisant reculer la part des énergies fossiles au bénéfice des énergies renouvelables. La loi de transition énergétique pour la croissance verte adoptée en 2015 en France affiche ainsi les grands objectifs suivants : réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990 ; réduction de 30 % de la consommation d’énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012 ; réduction de 50% de la consommation énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 ; augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d’énergie à 32 % en 2050.

Bioéconomie : tendre vers une économie fondée sur l’exploitation de la biomasse

Depuis quelques années, la Commission Européenne fait de la notion de « bioéconomie (« bioeconomy ») une voie incontournable pour permettre à l’Europe de construire une économie soutenable, en particulier pour faire face à l’épuisement rapide de nombreuses ressources (Commission Européenne, 2012). Visant à « intégrer davantage et de manière plus durable l’utilisation de ressources renouvelables dans l’économie européenne », la stratégie adoptée en 2012 par la Commission européenne définit la bioéconomie comme une économie fondée sur l’exploitation des ressources biologiques renouvelables terrestres et marines, ainsi que les déchets, comme intrants pour la fabrication de produits pour l’alimentation humaine et animale, la production industrielle et la production d’énergie. Au plan opérationnel, la bioéconomie est généralement associé aux « bioraffineries », c’est-à-dire des infrastructures permettant de fractionner des ressources renouvelables en molécules valorisable en produits alimentaire ou non (E. Delgoulet et J. Pahun, 2015).

2.3 Les mécanismes de marché et le progrès technique comme principaux leviers d’action

Selon la pensée économique standard, il existe deux principaux leviers pour favoriser la mise en place d’un modèle économique plus circulaire (F. Fizaine, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015) :

- La mise en place d’un **système d’incitations monétaires** jouant sur le niveau des prix des ressources et des taxes sur les rejets. En assurant la « vérité » des couts associés à la rareté des ressources et à la dégradation de l’environnement, les acteurs économiques seraient incités à faire des choix plus favorables à l’économie des ressources et la prévention des rejets, à l’étape de la production comme à celui de la consommation.
- L’investissement dans le développement et le déploiement de **nouvelles technologies** permettant d’économiser les ressources, d’en substituer certaines par d’autres, et de minimiser les rejets polluants. La production d’énergie, les transports et l’industrie manufacturière constituent généralement les secteurs prioritaires d’application de ces technologies innovantes.

S’agissant plus spécifiquement de la consommation de ressources non renouvelables, la théorie économique standard affirme que les effets combinés du progrès technique et de la hausse des prix de marché sont de nature à repousser continuellement le risque de pénurie. Les réserves⁶ constituent en effet une notion dynamique au sens où leur volume

⁶ L’analyse économique du « capital naturel » distingue usuellement les notions de ressources et de réserves (F. Fizaine, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015 ; B. Thévard, 2012) :

- Les ressources désignent la totalité des volumes d’hydrocarbures, de minerais métalliques, de minéraux, etc. que l’on estime être présents dans le sous-sol compte tenu des connaissances géologiques accumulées.

est susceptible d’augmenter dans le temps sous l’effet (F. Fizaine, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015) :

- du progrès technique qui permet d’abaisser les coûts de production (exploration, extraction, raffinage, etc.) ;
- de la hausse des prix de marché qui permet de relever le coût de production limite.

Le progrès technique et la montée des prix constituent une incitation à investir dans la découverte et l’exploitation de nouveaux gisements, et notamment des gisements présentant des coûts de production supérieurs à ceux exploités à un instant donné. De même, progrès technique et augmentation des prix peuvent inciter les agents économique situés en aval à optimiser leur consommation de ressources (efficacité énergétique et matérielle), augmenter le recyclage des matières, développer des substituts plus compétitifs. Autant d’inflexions qui peuvent permettre d’alléger la pression sur la ressource de départ.

Si elle fait aujourd’hui l’objet d’un certain consensus au sein des institutions nationales et internationales, la perspective du découplage n’est cependant pas exempte de critiques. Comme nous allons le voir dans les pages qui suivent, différents travaux académiques soulèvent trois réserves :

- Tout d’abord, le principe de découplage et le nouveau modèle économique qui lui est associé ne semblent pas constituer des conditions suffisantes pour garantir la soutenabilité de l’économie : qu’est-ce qu’une économie compatible avec les limites planétaires ? (partie 3.)
- Ensuite, il apparaît que la perspective d’une croissance libérée de son soubassement matériel sera difficile à concrétiser à l’avenir : le découplage entre croissance économique et consommation de ressources est-il possible ? (partie 4.)
- Enfin, c’est la capacité même des économies à poursuivre une trajectoire de croissance alimentée par des flux massifs de ressources naturelles qui se trouve aujourd’hui remise en cause : la poursuite de la croissance matérielle est-elle possible ?

- Les réserves constituent la partie des ressources qui a été découverte, dont le volume et la qualité ont été évalués, et dont l’exploitation est rentable aux conditions économiques et techniques actuelles.

3. Qu’est-ce qu’une économie compatible avec les limites planétaires ?

Puisant dans l’environnement naturel des flux massifs de ressources non renouvelables et y rejetant des flux tout aussi considérables de déchets et polluants, le système économique issu de la révolution industrielle fait face à un défi majeur : comment assurer sa soutenabilité à moyen-long terme tant en termes de disponibilité des ressources que de capacité d’absorption des rejets ? Cette interrogation a inspiré un certain nombre de travaux académiques plus ou moins récents qui s’efforcent de préciser les conditions dans lesquelles le fonctionnement du système économique serait en mesure d’assurer la préservation du substrat naturel dont il dépend. Ils permettent ainsi de donner au concept d’économie circulaire un contenu plus à la hauteur des enjeux qui lui sont rattachés. Il ne s’agit pas ici de faire un état de l’art des réflexions mais de faire ressortir quelques principes clés permettant de se donner une vision générale d’une économie soutenable.

3.1 Définir la taille limite de l’économie mondiale

Les travaux relevant de l’« économie écologique⁷ » mettent en évidence un certain nombre de principes permettant d’inscrire la dynamique économique dans un cadre compatible avec les limites du monde fini (H. Daly, 1990, 1994) :

- Le capital naturel critique, celui qui fournit les fonctions environnementales indispensables à la survie de l’humanité, doit être à tout prix conservé, qu’il soit renouvelable ou non : le sol nécessaire à l’agriculture, les services écologiques assurant des fonctions de régulation du climat, de purification des eaux, d’organisation du cycle de vie, la biodiversité, etc.
- Le rythme d’exploitation des ressources renouvelables ne doit pas dépasser leur rythme de régénération.
- Le rythme d’utilisation des ressources épuisables ne doit pas excéder le rythme de développement des substituts renouvelables à ces ressources. De façon complémentaire, les rentes tirées de l’exploitation des ressources épuisables doivent être réinvesties dans l’exploitation des ressources renouvelables de substitution.
- Les émissions de déchets et de pollutions doivent être limitées aux capacités d’assimilation des écosystèmes.

3.2 Définir les conditions d’une économie véritablement circulaire

Si ces critères de soutenabilité permettent d’établir les limites dans lesquelles doit s’inscrire le système économique, leur mise en application implique par ailleurs de préciser à quelles conditions le fonctionnement de ce dernier est susceptible de les respecter. C’est tout le sens de travaux plus récents qui font le constat d’une définition encore trop « métaphorique » du concept d’économie circulaire : s’inspirer du fonctionnement circulaire des écosystèmes. Afin de donner à l’économie circulaire un contenu à la hauteur des enjeux qui lui sont associés, ils appellent à développer une approche plus systémique des flux d’énergie et de matières consommés et rejetés par les activités économiques. Trois grands principes ressortent de ces travaux (Arnsperger et D. Bourg, 2016 ; R. Debref et alii, 2016) :

⁷ L’économie écologique (« Ecological Economics » en anglais) est un courant des sciences économiques visant à intégrer à l’analyse économique les flux d’énergie et de matière qui traversent le système économique. L’économie écologique se fonde sur le principe selon lequel le système économique constitue un sous-système intégré au sein d’un ensemble fini, non-croissant et matériellement clos : la biosphère terrestre.

- l'économie circulaire vise à favoriser le bouclage des activités humaines sur elles-mêmes afin de parvenir à une économie quasi auto-entretenu (« self-sustaining » en anglais).
- la progression effective vers une économie plus circulaire ne peut être évaluée qu'à l'échelle macro, car des performances accrues au niveau micro et/ou méso (par exemple la réduction de la consommation de ressources par unité produite à l'échelle d'une entreprise) peuvent aller de pair avec une détérioration des performances à une échelle plus large.
- l'économie circulaire suppose de redonner aux ressources renouvelables une place prédominante dans l'approvisionnement du système économique. Il s'agit ainsi d'opérer une double transition : des énergies fossiles vers les énergies renouvelables (transition énergétique) ; des matières minérales vers les matières issues de la biomasse (ce que l'on appelle bioéconomie).

On le voit, tenter de définir de façon rigoureuse les conditions de soutenabilité du système économique amène à poser des exigences qui vont au-delà de la plupart des stratégies de transition écologique promues à l'heure actuelle. Mais quand bien même l'objectif à atteindre serait-il mieux identifié, encore faut-il être en mesure de s'en rapprocher. Or différents travaux mettent en évidence toute la difficulté de l'exercice.

4. Le découplage entre croissance économique et consommation de ressources est-il possible ?

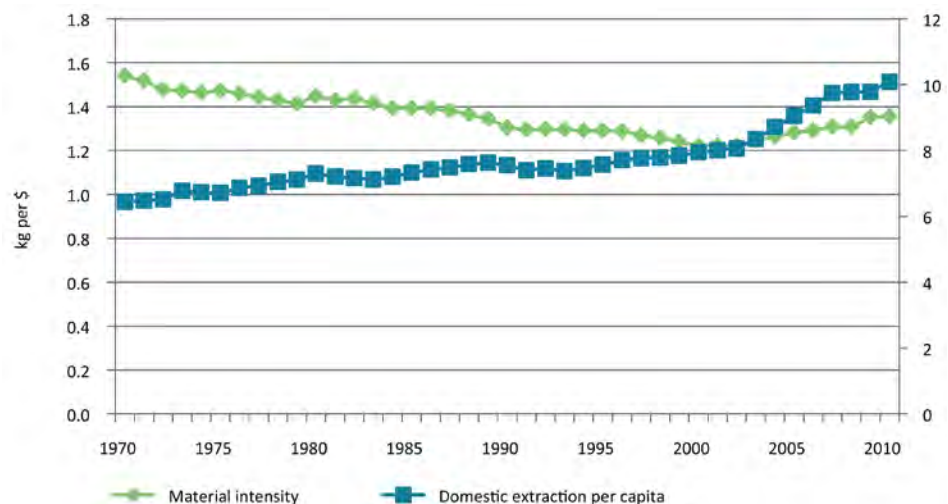
Différents travaux académiques font douter de la capacité des économies développées à mettre sur pieds un modèle de croissance économique détaché de son substrat matériel. Tout d'abord les progrès affichés au cours des dernières décennies sur le plan de la productivité des ressources (créer plus de richesse avec moins de ressources) apparaissent en réalité des plus limités, voire inexistant, et ne permettent pas d'enrayer la croissance de la consommation de ressources à l'échelle mondiale. Une première explication à cette situation renvoie au fait que, sur la durée, l'évolution de la croissance économique apparait étroitement liée à celle de la consommation d'énergie. Une seconde explication possible réside dans le phénomène d'« effet rebond » : les économies de ressources (énergie, matières) réalisés à un moment donné sont généralement utilisées pour consommer davantage par ailleurs. Enfin, il est démontré que parvenir à une économie véritablement circulaire est impossible dans une économie en croissance.

4.1 Des « progrès » à relativiser

La consommation de ressources par unité de PIB et par habitant a repris une croissance soutenue depuis les années 2000

Force est de constater que les efforts engagés par les entreprises et les Etats pour accroître la productivité des ressources n'ont permis à ce jour qu'un découplage relatif ponctuel (F.Krausmann et alii, 2009). La quantité de ressources naturelles (biomasse, énergie, minerais de métal et minéraux industriels, minéraux pour la construction) nécessaire à la production d'une unité de PIB (on parle d'« intensité matières » et d'« intensité énergétique » du PIB) a certes reculée de 40% à l'échelle mondiale entre 1900 et 2005 (F.Krausmann et alii, 2009). Mais comme on l'a vu plus haut, cela n'a pas empêché la multiplication par 8 de l'extraction mondiale de ressources au cours du siècle. Les rares moments où cette dernière a reculé correspondent à des périodes de récession économique brutale (crise de 1929, guerres mondiales, chocs pétroliers...). De plus, on constate que l'intensité matérielle du PIB mondial s'accroît à nouveau depuis les années 2000 (IRP/UNEP, 2016) : en 2000, 1,2 kg de matières était nécessaires pour produire un dollars US de PIB ; ce chiffre est passé à près de 1,4 en 2010.

Evolution de l'extraction par unité de PIB (en vert, échelle de gauche) et par habitant (en bleu, échelle de droite) entre 1970 2010



Source : Source : IRP/UNEP, 2016

D'autre part, une mesure sans doute plus juste de l'empreinte écologique des modes de vie à l'ère industrielle consiste à rapporter la consommation de ressources non plus au PIB mais à la population mondiale. Le tableau apparaît alors encore moins encourageant. En effet, parce que l'extraction mondiale de matières premières a progressé plus vite que la population tout au long du 20^{ème} siècle (F.Krausmann et alii, 2009), la consommation moyenne par habitant de ressources a plus que doublé, passant de 4,6 à 10,3 tonnes par habitant et par an entre 1900 et 2005. On remarque que l'augmentation a été particulièrement soutenue entre 1945 et le premier choc pétrolier, mais aussi depuis le début des années 2000.

Les « progrès » des pays occidentaux se révèlent trompeurs

Rappelons que la contribution des différentes régions du monde à la croissance de la consommation de ressources naturelles est loin d'être identique (F.Krausmann et alii, 2009). Pendant la majeure partie du 20^{ème} siècle (jusqu'au tournant des années 1970 environ), les pays occidentaux⁸ sont responsables de la moitié de la consommation mondiale de matières premières, en sachant que leur poids dans la population mondiale est bien moindre et se réduit continuellement sur la période. Autrement dit, leur consommation massive de ressources traduit une croissance très rapide de leur PIB par habitant⁹. A contrario, la contribution des pays du sud à l'accroissement de l'extraction mondiale est due principalement à l'augmentation particulièrement soutenue de leur population.

Pour autant, différents facteurs – tels que la déformation de la structure de la demande finale au profit des services (moins consommateurs de matières premières), la mise en place de technologies et de process de production et de consommation plus efficaces ou encore la montée de la finance dans le PIB – ont permis un certain nombre de progrès au cours des dernières décennies. Une étude récente montre que (A. Schaffartzik et alii, 2014) : la consommation de matières par unité de PIB des pays occidentaux a été divisé par deux sur la même période ; leur consommation de matières premières totale et par habitant de ces pays ont même diminué au cours des années 2000.

Ces progrès méritent cependant être interprétés avec prudence, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, si la consommation mondiale de matières premières moyenne par personne se situe à 10,3 tonnes en 2005, ce niveau ne représente toutefois qu'un peu moins de 60% de la moyenne par habitant de l'Europe occidentale et moins d'un tiers de celle de l'Amérique du Nord.

Ensuite, plusieurs études suggèrent que les progrès des pays occidentaux observés sur la dernière période traduisent avant tout un mouvement croissant d'externalisation de la consommation de ressources vers les pays en développement (Bruckner et alii, 2012 ; Wiedmann et alii, 2013). La diminution de la consommation de ressources naturelles des pays industrialisés et, a contrario, la très forte croissance de la consommation de certaines régions du Sud que l'on observe depuis le début du 21^{ème} siècle constituent les deux faces de la même pièce. La délocalisation d'activités industrielles fortement consommatrices de matières premières des pays du Nord vers les pays du Sud se traduit, pour les premiers, par une réduction des besoins d'importations de matières premières et par une amplification des importations de biens manufacturés en provenance des seconds, ce qui impliquent pour ces derniers d'accroître leurs importations de matières premières (OCDE, 2011). Ceci concerne tout particulièrement l'Asie qui représente la moitié de la consommation mondiale de matières premières en 2010.

⁸ Amérique du Nord, Europe de l'Ouest, Japon, Australie, Nouvelle-Zélande

⁹ Selon les statistiques de l'ONU, les pays en développement (c'est-à-dire l'ensemble des pays moins les pays occidentaux mentionnés plus haut) représentent 90% de la croissance de la population mondiale entre 1950 et 2005, et concentrent 81% de la population à cette dernière date.

La Chine, premier importateur mondial de matières premières

L’accélération économique de la Chine depuis 15 ans est au cœur de ces mouvements de fond. En même temps qu’elle accédait au statut d’« atelier du monde » (premier exportateur mondial de marchandises depuis 2009), la Chine est devenue le premier importateur mondial de matières premières (OCDE, 2015) : sa part dans les importations mondiales a quadruplé, passant d’un peu moins de 4% en 2000 à près de 16% en 2012. Cette évolution est particulièrement spectaculaire concernant les métaux, la Chine s’octroyant désormais 80% des importations mondiales de nickel, 65% des importations de plomb, 62% des importations de manganèse et 40% des importations de cuivre en 2010 (OCDE, 2012). De même, la Chine est depuis le printemps 2015 le premier importateur mondial de pétrole brut (L’usine nouvelle, 2015).

Au total, pour juger des « progrès » des pays occidentaux sur le plan de la consommation de matières premières on ne peut se contenter de mesurer leur consommation apparente de matières¹⁰. Il convient d’ajouter les consommations de matières induites par la production des biens manufacturés qu’ils importent (P.Roman, 2014). On s’aperçoit alors que l’empreinte matérielle globale des pays occidentaux a suivi le rythme de l’augmentation de leur PIB, et donc qu’aucune amélioration de la productivité des ressources n’a eu lieu au cours des dernières décennies (Wiedmann et alii, 2013). Ce constat apparaît essentiel pour comprendre l’absence quasi-complète de progrès significatif à l’échelle mondiale (G.Giraud, 2014).

4.2 La croissance économique dépend étroitement de celle de la consommation d’énergie

L’énergie, première des ressources

Une attention plus particulière mérite d’être donnée à l’hypothèse d’un découplage énergétique (réduction de la consommation énergétique par unité de PIB). Comme le soulignent de nombreux auteurs, l’énergie présente un statut particulier parmi les ressources naturelles. L’énergie est la base de toute activité humaine dans la mesure où elle constitue l’apport préalable et nécessaire à l’extraction, la transformation, au transport et à l’utilisation de toutes les autres matières premières. Ainsi, la révolution industrielle fut avant tout une révolution de l’énergie : c’est bien l’extraction de nouvelles formes d’énergie (charbon d’abord puis pétrole et gaz) qui a permis le changement d’échelle de la production qui caractérise l’ère industrielle. En 2014, le charbon, le pétrole et le gaz représentent encore respectivement 29%, 31% et 21% de la production d’énergie primaire mondiale (AIE, 2016).

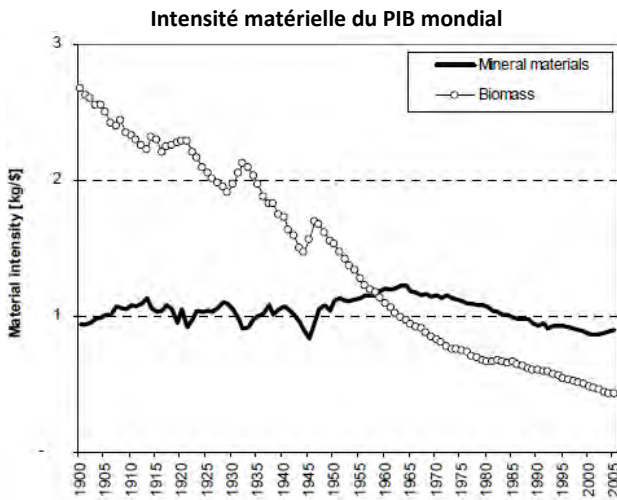
La croissance de la consommation d’énergie sous-tend celle du PIB

Dans ces conditions, on peut s’interroger sur l’intensité de la relation entre la croissance économique et celle de la consommation d’énergie à long terme. Sur ce plan, les travaux de Fridolin Krausmann et de ses confrères montrent que la plus grande part de la réduction de l’intensité matérielle de l’économie mondiale (extraction de ressources par unité de PIB) pendant le 20^{ème} siècle est due à la baisse de l’intensité de la consommation de biomasse (voir graphique de gauche ci-contre). L’intensité de la consommation de ressources minérales (énergies, minerais, minéraux) augmente quant à elle jusqu’à la fin des années 1960, avant de reculer pour retrouver un niveau proche de ce qu’il était en 1900. Autrement dit, aucun progrès ne semble avoir été réalisé concernant le contenu en ressources non renouvelables du PIB.

Les travaux de l’économiste Gaël Giraud (2014) offrent un éclairage encore plus saisissant. Ils montrent en effet que le ratio de la richesse produite sur la quantité

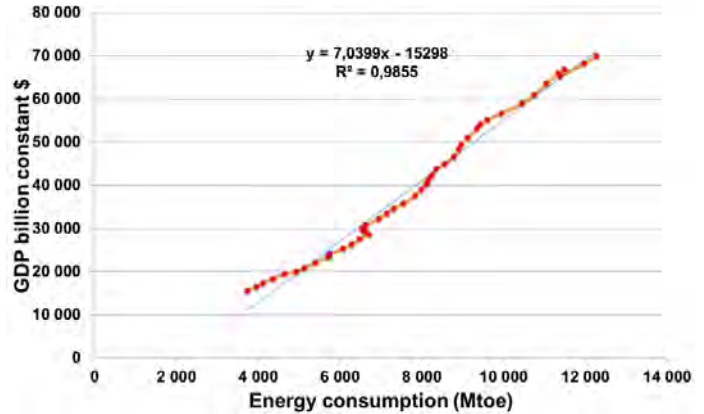
¹⁰ Rappelons que la consommation intérieure apparente de matières de chaque pays comprend les matières premières extraites du territoire national, auxquelles sont ajoutées les importations physiques et retirées toutes les exportations physiques.

d'énergie primaire utilisée est quasiment constant entre 1965 et 2011 à l'échelle mondiale (voir graphique de droite ci-dessous). Si les pays étaient réellement parvenus, en moyenne, à produire davantage de richesses avec de moins en moins d'énergie



Source : F.Krausmann et alii, 2009

Evolution du PIB mondial (dollars constants de 2013) en fonction de la consommation mondiale d'énergie primaire (en Mtep)



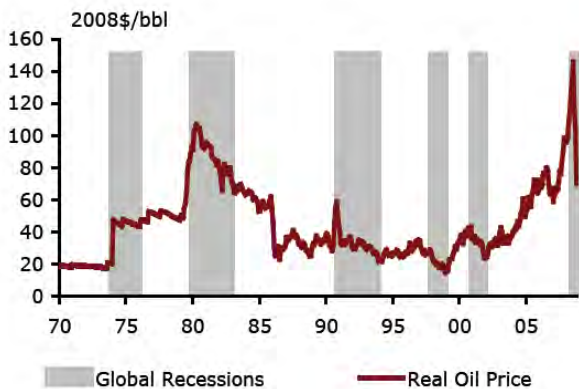
Source : G.Giraud, 2014

Note : le premier point, en bas à gauche, correspond à l'année 1965 et le dernier, en haut à droite, à 2011

(découplage absolu), la droite aurait pris une allure de plus en plus verticale. Or, comme le souligne Gaël Giraud, nous en sommes très loin.

Les analyses de Gaël Giraud montrent également que, pour plus d'une quarantaine de pays (comprenant notamment l'ensemble des membres de l'OCDE), de 1970 à 2011, une augmentation de 10% de la consommation d'énergie primaire par habitant a induit en moyenne une augmentation d'environ 6% du PIB par habitant. En d'autres termes, le taux de dépendance du PIB par habitant par rapport à la consommation d'énergie par habitant est estimé à 0,6, ce qui s'avère considérable : par comparaison, la dépendance du PIB par habitant par rapport au capital est cinq fois plus faible (0,12). Selon Gaël Giraud, cela signifie que les gains en termes d'efficacité énergétique sont quasi-nuls depuis cinquante ans et, surtout, que c'est la possibilité d'augmenter la consommation d'énergie qui joue un rôle déterminant dans la croissance. En d'autres termes, c'est essentiellement l'accélération de la consommation d'hydrocarbures faciles d'accès qui a rendu possible la forte croissance des économies industrielles. Symétriquement, cela veut dire qu'une baisse de la consommation d'énergie primaire par habitant de 10% entraînerait une diminution de 6% du PIB par habitant.

Récessions économiques et prix du pétrole



Source : J.Rubin, 2008 ; CIBC World Markets

Les récessions économiques sont souvent précédées par une augmentation brutale des prix du pétrole

Cette influence déterminante de la consommation d'énergie sur l'évolution du PIB se trouve confirmée par une étude historique montrant que sur 11 récessions qu'ont connues les Etats-Unis depuis la deuxième guerre mondiale, 10 ont été précédées d'une augmentation brutale des prix du pétrole (J.D.Hamilton, 2009¹¹).

¹¹ Cité par Pablo Servigne et Raphaël Stevens (2015)

4.3 Les économies de ressources peuvent être annulées par l’« effet rebond »

Une autre explication possible de cette absence de progrès significatif sur le chemin du découplage réside dans le phénomène dit d’« effet rebond ». Un certain nombre de réflexions attirent l’attention en effet sur les effets potentiellement contre-productifs des progrès technologiques en matière d’économie de ressources (F. Fizaine, 2014 ; C. Arnspurger et D. Bourg, 2016 ; J.Schor, 2013). Dès le 19^{ème} siècle, l’économiste William Stanley Jevons démontre que la réduction de la consommation de ressources par unité produite (ce que l’on appelle l’amélioration de l’efficacité énergétique ou matérielle de la production) n’aboutit pas nécessairement à une réduction de la consommation de ressources. Bien au contraire, les gains d’efficacité, parce qu’ils permettent de réduire les prix des ressources, peuvent susciter un accroissement de la consommation. C’est le fameux « paradoxe de Jevons » ou « effet rebond ».

Du côté des entreprises, les gains d’efficacité peuvent être utilisés pour baisser le prix des produits qu’elles commercialisent, pour augmenter la taille, la puissance, les performances ou encore les fonctionnalités de ces produits (voiture plus lourde, ordinateur plus puissant, etc.), pour investir dans de nouvelles capacité de production, etc. Les consommateurs de leur côté auront tendance à acheter davantage d’un produit quand il coûte moins cher ou à utiliser les économies réalisées avec celui-ci pour accroître leurs achats d’un autre produit.

Un exemple emblématique est celui de l’automobile (F. Fizaine, 2014). Aujourd’hui nos voitures consomment deux fois moins d’essence au km par rapport à 1950. Mais dans le même temps, la distance parcourue en voiture par personne a été multipliée par 10. Loin d’avoir permis la diminution de la consommation, le progrès technologique a plutôt encouragé les personnes à prendre davantage la voiture. Il a donc contribué à créer une consommation qui n’existait pas avant.

Au total, comme on a pu le vérifier au fil du temps, l’économie de ressources est loin de déboucher immédiatement sur une diminution de la consommation. Au contraire, parce qu’il permet de rendre moins coûteux certains usages, le progrès technologique est susceptible d’entraîner davantage de consommation et donc de pressions sur les ressources naturelles. Ces constats viennent souligner la limite des mesures de circularité à des échelles micro (sites de production, entreprises, secteurs) : des performances isolées peuvent aller de pair avec des effets rebonds au sein du système dans son ensemble (C. Arnspurger et D. Bourg, 2016).

4.4 Atteindre une économie circulaire est mathématiquement impossible dans une économie en croissance

Tendre vers une économie satisfaisant la quasi-totalité de ses consommations de matières premières par le seul recyclage intégral de ses déchets

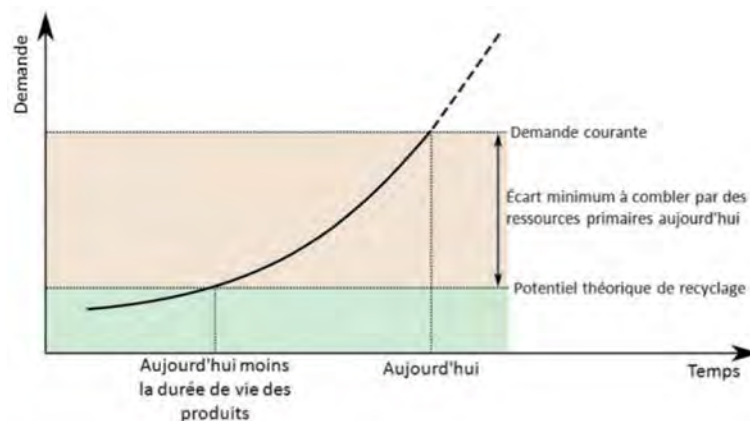
Un certain nombre de travaux viennent remettre en cause de façon radicale l’idée, souvent véhiculée par les médias, qu’il serait possible de bâtir une économie circulaire sur le seul principe du recyclage. Selon Jean-François Labbé (2016), économiste au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), une interprétation au premier degré du principe de circularité de l’économie pourrait laisser croire que la maximisation des taux de récupération des matières et la minimisation des pertes se produisant aux différentes étapes du cycle (extraction minière, métallurgie, fabrication des semi-produits, fabrication des produits de consommation, usage de ces produits, collecte en fin de vie, puis procédés de récupération des métaux à partir de ces produits collectés) seraient suffisant pour réduire à une part très minime les besoins en approvisionnement primaire (provenant de gisements naturels). Cependant, cette vision d’une économie tendant vers la circularité se révèle erronée dès lors que l’économie continue de s’inscrire dans une trajectoire de croissance.

Même optimal, le recyclage est totalement insuffisant pour fournir les ressources nécessaires à une économie en croissance

Plusieurs travaux ont démontré que, même en cas de recyclage complet de la matière, il est impossible de parvenir à une économie véritablement circulaire lorsque la croissance de la demande de ressources se poursuit par ailleurs (J.-F. Labbé, 2016 ; F.Fizaine, 2014 ; F. Grosse, 2011, 2014). Il s'agit en fait d'une impossibilité mathématique : dans une économie en croissance, les volumes de matières recyclées que l'on est en mesure d'injecter dans le système restent nécessairement inférieurs à la consommation totale de matières premières. Pour le comprendre, il faut prendre en compte le temps de séjour des matières dans l'économie, c'est-à-dire le laps de temps qui s'écoule entre le moment (t) où la matière est ajoutée au stock de produits en usage dans la société et le moment ($t+n$) où elle est extraite du stock pour être recyclée ou rejetée dans les déchets ultimes. Ce temps de séjour est extrêmement variable selon les matières (et notamment selon les métaux) et les usages (J.-F. Labbé, 2016).

Dans ce cadre, si la consommation de biens incorporant telle matière s'accroît entre t et $t+n$ (par exemple, une croissance annuelle de 2%), on comprend que le volume de matière injecté en t et récupéré en $t+n$ (pour être recyclé) ne représentera qu'une assez faible fraction du volume total de la consommation de matière en $t+n$. L'écart entre le volume recyclé et le volume consommé sera alors comblé par la consommation de ressources naturelles (primaires). En d'autres termes, les quantités disponibles aujourd'hui pour le recyclage sont issues des quantités consommées hier, et le recyclage de la quantité consommée hier ne peut couvrir la consommation d'aujourd'hui si cette dernière s'est accrue entre hier et aujourd'hui. C'est ce qu'illustre le schéma ci-dessous.

Le besoin de matières premières primaires dans un scénario de recyclage à 100 %



Source : J.-F. Labbé, 2016

Illustration du raisonnement avec l'exemple du cuivre (J.-F. Labbé, 2016)

Dans le cas du cuivre, en prenant une croissance annuelle de la consommation de 2,87 % (moyenne observée depuis 53 ans), une durée moyenne de séjour dans ses usages de 35 ans et un taux de recyclage de variant de 43 % à 53 %, le cuivre secondaire issu du recyclage ne peut couvrir au mieux que 16,0 à 19,7 % de la demande. Même si l'on parvenait, avec tous les efforts nécessaires, à un taux de recyclage de 80 %, et en retenant les mêmes hypothèses de durée de séjour (35 ans) et de croissance annuelle (2,87 % par an), le cuivre secondaire issu du recyclage ne pourra jamais satisfaire davantage que 30 % de la demande.

Quelques clés pour évaluer la contribution du recyclage à l'approvisionnement d'une économie en croissance

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette démonstration (J.-F. Labbé, 2016 ; F.Fizaine, 2014 ; F. Grosse, 2011, 2014) :

- Dès lors qu’il y a croissance prolongée de la consommation d’une ressource, le taux de croissance de la production primaire de cette ressource nécessaire pour faire face à la demande doit rester au moins égal au taux de croissance de la consommation, et ce même avec un taux de recyclage de 100%.
- Ce raisonnement vaut pour tout autre taux de croissance positif. Rappelons que même une croissance annuelle de la consommation de seulement 1% reste une croissance exponentielle qui entraîne un doublement du niveau de consommation au bout de 70 ans (voir tableau de gauche ci-dessous).
- La part de la consommation d’une ressource satisfaite par les ressources recyclées (secondaires) sera d’autant plus faible que le taux de croissance de la consommation sera élevé, le taux de recyclage sera faible, la durée de séjour dans le stock en usage sera longue (voir tableau de droite ci-dessous).
- Une couverture à 100% de la consommation de matières premières par des matières issues du recyclage implique de subordonner progressivement la consommation de chaque nouvelle unité de matière première au démantèlement d’une autre unité de matière première du stock.

Taux de croissance annuels et temps de doublement de la consommation d’une ressource

Taux de croissance annuel	Temps de doublement correspondant
1.00%	69.7 ans
2.00%	35.0 ans
2.85%	24.7 ans
3.00%	23.4 ans
4.00%	17.7 ans
5.00%	14.2 ans
7.00%	10.2 ans
9.00%	8.0 ans
15.00%	5.0 ans

Source : J.-F. Labbé, 2016

Taux maximaux possibles de couverture de la consommation par les ressources secondaires avec un taux de recyclage de 100%

K = 100%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1%	99.0%	97.1%	95.1%	90.5%	78.0%	60.8%
	2%	98.0%	94.2%	90.6%	82.0%	61.0%	37.2%
	3%	97.1%	91.5%	86.3%	74.4%	47.8%	22.8%
	4%	96.2%	88.9%	82.2%	67.6%	37.5%	14.1%
	5%	95.2%	86.4%	78.4%	61.4%	29.5%	8.7%
	10%	90.9%	75.1%	62.1%	38.6%	9.2%	0.9%

K = 60%		Durée moyenne de séjour du métal dans ses usages (d)					
		1 an	3 ans	5 ans	10 ans	25 ans	50 ans
Taux de croissance annuel de la consommation (R)	0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%	60.0%
	1%	59.4%	58.2%	57.1%	54.3%	46.8%	36.5%
	2%	58.8%	56.5%	54.3%	49.2%	36.6%	22.3%
	3%	58.3%	54.9%	51.8%	44.6%	28.7%	13.7%
	4%	57.7%	53.3%	49.3%	40.5%	22.5%	8.4%
	5%	57.1%	51.8%	47.0%	36.8%	17.7%	5.2%
	10%	54.5%	45.1%	37.3%	23.1%	5.5%	0.5%

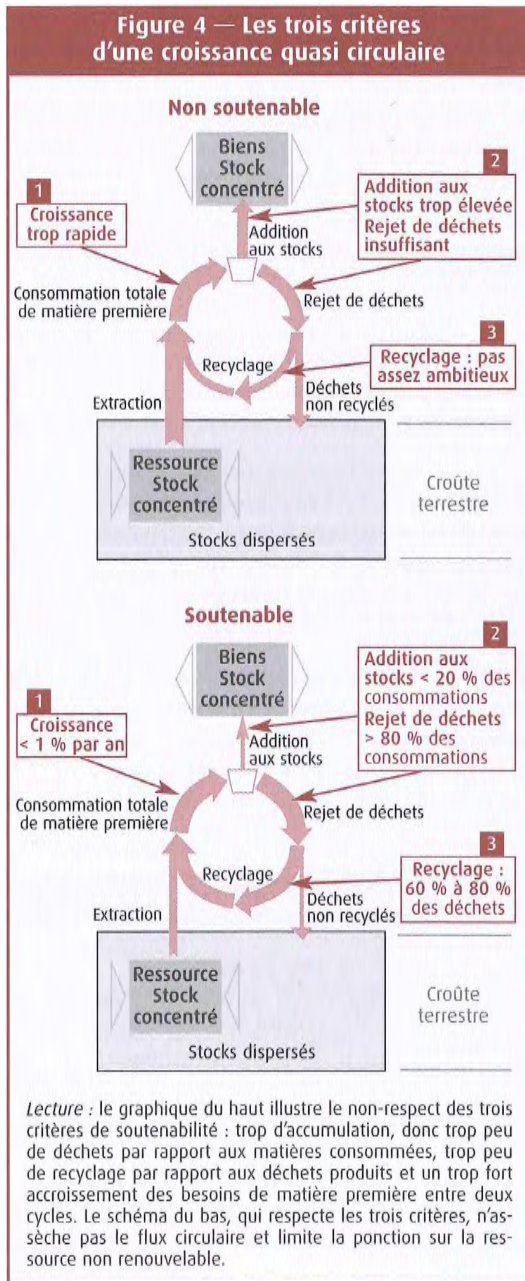
Source : J.-F. Labbé, 2016

Le recyclage ne fait que repousser la croissance dans le temps : un exemple théorique (J.-F. Labbé, 2016)

Pour une consommation de 100 en l’an 2000 et une croissance de 3 % par an, cette consommation atteindra 400 en 2047. Sans recyclage, la production primaire devrait donc être de 400 en 2047. Avec un recyclage de 80 % de ce qui aura été consommé 10 ans auparavant, la production primaire nécessaire pour satisfaire la demande en complément des quantités recyclées ne sera que de 162 en 2047, mais elle atteindra 400 en 2078, soit 31 ans plus tard. Ainsi, il y aura toujours un besoin des mêmes quantités primaires croissantes, mais 31 ans plus tard que cela aurait été le cas sans recyclage.

L’économie circulaire dépend avant tout de la maîtrise de la consommation

Au total, si l’optimisation du recyclage est évidemment nécessaire, elle n’est en rien un gage de soutenabilité de la croissance (J.-F. Labbé, 2016 ; F.Fizaine, 2014 ; F. Grosse, 2011, 2014 ; C. Arnsperger et D. Bourg, 2016). L’approvisionnement secondaire, parce qu’il est différé dans le temps, ne permet pas de stopper la croissance des besoins de



Source : F.Grosse, Futuribles, 2014

ressources primaires, il permet seulement de « gagner du temps » contre leur raréfaction. Plus le taux de croissance de la consommation est élevé et plus l’écart avec les quantités recyclées est important. En bref, assigner comme objectif ultime à l’économie circulaire de parvenir à découpler la croissance économique de l’épuisement des ressources naturelles se révèle erroné.

Ce constat conduit à faire de la maîtrise de la croissance matérielle de l’économie le facteur clé pour parvenir à une économie véritablement circulaire (J.-F. Labbé, 2016 ; F.Fizaine, 2014 ; F. Grosse, 2011, 2014 ; C. Arnsperger et D. Bourg, 2016). En effet, comme le montre le tableau de droite page précédente, seule une croissance matérielle nulle permet d’accroître significativement la proportion de la consommation de ressources satisfaite par des ressources issues du recyclage. La croissance zéro est d’autant plus nécessaire dans une optique d’allongement de la durée de vie des produits. En effet, si l’allongement de la durée de séjour des produits dans le stock en usage peut permettre de freiner les consommations (en repoussant dans le temps les besoins de renouvellement), il contribue par ailleurs à réduire le flux annuel de matières potentiellement recyclables et donc à réduire la part de la consommation de ressources pouvant être couverte par des ressources recyclées. Seul un scénario de croissance nulle (couplé à un recyclage à 100%) permet de concilier l’allongement de la durée de vie des produits avec une couverture de l’ensemble de la consommation de ressources par des ressources recyclées : un scénario de croissance nulle permet de rompre avec un accroissement continu du stock en place et donc de limiter les nouvelles consommations de matières aux seuls besoins de renouvellement de ce stock.

Comme le résume Christian Arnsperger et Dominique Bourg (2016), plus on se rapproche d’une croissance zéro et de taux de recyclage de 100 % pour toutes les matières utilisées, plus on s’approchera de la circularité.

Or, la consommation croissante de ressources naturelles que l’on observe historiquement à l’échelle mondiale est en contradiction complète avec cette exigence. Au cours des quatre dernières décennies (1970-2010), la consommation mondiale de matières premières a ainsi triplé, augmentant en moyenne de 2,7% par an. De plus, contrairement à la population et au PIB, la croissance de la consommation de ressources s’est même accélérée au cours de la décennie 2000-2010, pour atteindre 3,7% par an. Force est de constater qu’entre les intentions initiales et la réalisation d’une économie vraiment circulaire,

il y a loin de la coupe aux lèvres.

5. La poursuite de la croissance matérielle est-elle possible ?

Si l’amélioration du confort matériel des sociétés ne semble pouvoir se poursuivre sans générer une croissance de la consommation de ressources naturelles, on peut alors se demander si cette dernière sera encore possible à l’avenir. Or, ici aussi, différents travaux laissent planer le doute. La perspective d’un prolongement de la croissance exponentielle de l’extraction mondiale de ressources se trouve doublement remise en question. D’une part, il existe des limites physiques à l’exploitation des ressources épuisables, et en particulier des énergies fossiles et des métaux. D’autre part, les ressources renouvelables (énergies renouvelables, biomasse, matières issues du recyclage) ne semblent pas en mesure de se substituer intégralement à elles, ni quantitativement ni qualitativement.

5.1 Des limites à la consommation de ressources non renouvelables

Le « peak oil », emblème des rendements décroissants de l’extraction des ressources non renouvelables

Toute exploitation d’une ressource non renouvelable est amenée à connaître un pic après lequel la production baisse inexorablement

Avec l’avènement de l’ère du pétrole¹², la conceptualisation du déclin de l’extraction des ressources non renouvelables va connaître une avancée majeure à travers la notion de « pic de production ». Proposée par le géophysicien américain Marion King Hubbert, celle-ci décrit le fait que l’exploitation de tout gisement pétrolier est amenée à suivre une courbe en « cloche » : au début, les ressources extractibles sont facile d’accès, la production explose, puis atteint un sommet et enfin décline inexorablement (on parle de déplétion) lorsqu’il ne reste plus que les matières difficiles d’accès (P.Servigne et R.Stevens, 2015).

Cette logique de pic de production peut être étendue à l’ensemble des ressources épuisables. De nombreux travaux l’ont souligné, l’extraction des matières premières énergétiques (pétrole, gaz, charbon, etc.) et non énergétiques (minéraux, métaux, etc.) est confrontée à des rendements décroissants (D.meadow et alii, 2014 ; P.Bihouix, 2010, 2014 ; U.Bardi, 2015 ; F. Fizaine, 2014). En effet, les ressources présentes dans le sous-sol sont plus ou moins concentrées dans certains lieux. Par économie de coûts, les gisements les plus concentrés et les plus accessibles sont généralement exploités en premier. Au fur et à mesure de leur épuisement, l’extraction se porte sur des gisements de moindre qualité, et ainsi de suite. Ainsi, les études académiques font état d’une baisse continue de la concentration moyenne des gisements en exploitation (F. Fizaine, 2014). Cette dégradation continue de la qualité des gisements se traduit par des conditions d’exploitation de plus en plus difficiles qui impliquent d’engager des moyens toujours plus importants – prospection¹³, études, machines, infrastructures, etc. – pour obtenir la même quantité de ressource. En d’autres termes, si les gisements présentant un moindre taux de concentration sont plus nombreux que les gisements plus concentrés, il faut garder à l’esprit que les coûts de production augmentent au fur et à mesure que la concentration des gisements diminue (F. Fizaine, 2014 ; P.Bihouix, 2014 ; P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015). Pour l’exprimer en termes physique, il faut consommer toujours plus d’énergie et de métaux pour une produire une même unité de ressources au fur et à mesure que la qualité des gisements se dégrade.

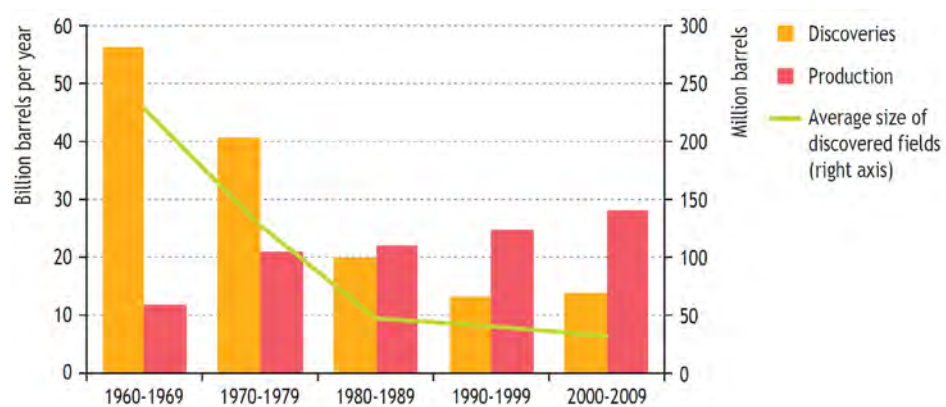
¹² Rappelons que le pétrole occupe la première place dans la consommation mondiale d’énergie primaire depuis le début des années 1960.

¹³ Les rendements décroissants concernent également la phase d’exploration : au fur et à mesure des découvertes, on connaît certes de mieux en mieux la géologie, mais il y a aussi de moins en moins de gisements à découvrir ; l’efficacité de l’exploration diminue et les coûts unitaires augmentent (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015).

Depuis les années 1980, nous consommons plus de pétrole que nous n’en découvrons

Le concept du « peak oil » va trouver sa pleine reconnaissance lorsque l’histoire donnera raison à son créateur. Hubbert avait prévu dès 1956 que la production de pétrole conventionnel des Etats-Unis atteindrait son niveau maximal autour de 1970, ce qui arriva effectivement en 1971 (U.Bardi, 2015). Le pic de production traduit lui-même, avec un décalage dans le temps, le pic mondial des découvertes de nouveaux gisements pétroliers. Celui-ci a été atteint au début des années 1960¹⁴ et depuis 1981 nous consommons plus de pétrole que nous n’en découvrons et l’écart n’a cessé de croître depuis (C.Campbell, 2015). Aujourd’hui le monde consomme sept barils pour chaque baril découvert, malgré une technologie de plus en plus performante (P.Servigne et R.Stevens, 2015).

Découverte et production annuelles mondiales de pétrole conventionnel



Source : International Energy Agency, 2010

Le pic de production de pétrole conventionnel a été atteint en 2006

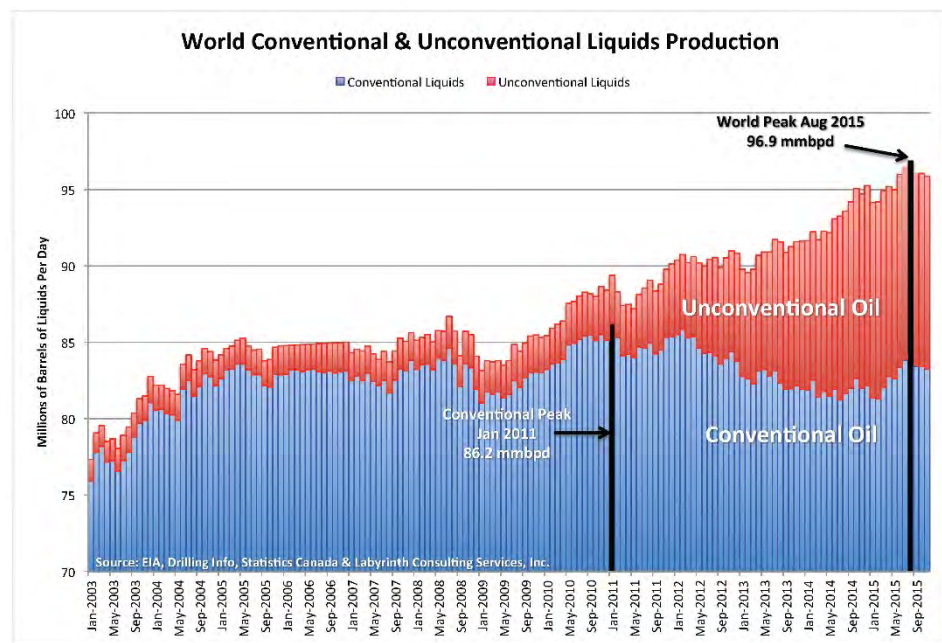
Selon l’Agence internationale de l’énergie, le pic de production de pétrole conventionnel¹⁵ a été franchi en 2006 (AIE, 2010). Pablo Servigne et Raphaël Stevens (2015) précisent que selon les statistiques les plus récentes (BP Statistical Review of world energy 2014), la moitié des vingt premiers pays producteurs, représentant plus des trois quarts de la production pétrolière mondiale, ont déjà franchi leur pic de production de pétrole conventionnel, parmi lesquels les Etats-Unis, la Russie, l’Iran, l’Iraq, le Venezuela, le Mexique, la Norvège, l’Algérie et la Libye. Notons que les pics de production de pétrole conventionnel évoqués ici (1971 et 2006) ont été suivis de deux « chocs pétroliers ». D’une manière générale, comme en témoignent nombre d’études de gouvernements, d’organisations internationales, de multinationales, un consensus est en train de se former sur le fait que l’ère du pétrole abondant et bon marché est révolue (P.Servigne et R.Stevens, 2015).

¹⁴ Le pic des découvertes de gaz a quant à lui été atteint au début des années 1970 (4D, 2013)

¹⁵ Hydrocarbures conventionnels et non conventionnels sont de même type : il s’agit dans les deux cas de pétrole et de gaz provenant de la transformation de matière organique contenue dans une roche (la roche mère). Ils se distinguent par les conditions de leur extraction du sous-sol. Classiquement, l’industrie pétrolière exploite les roches réservoirs les plus perméables, au sein desquelles les hydrocarbures sont concentrés, en y forant des puits par lesquels les hydrocarbures remonteront (ou seront remontés) à la surface. Les techniques employées sont dites "conventionnelles". Les hydrocarbures non conventionnels incluent, d’une part, les hydrocarbures piégés dans les roches-mères très peu perméables, dont l’extraction requiert la mise en œuvre de technologies spécifiques (dites "non conventionnelles"), et d’autre part, les sables bitumineux, pétroles lourds et extra-lourds dont la qualité très visqueuse ne permet pas une exploitation "conventionnelle" (www.ifpenergiesnouvelles.fr)

Le boom des hydrocarbures non-conventionnels s'apparente de plus en plus à un « feu de paille »

La forte progression de la production nord-américaine de pétrole et de gaz non-conventionnels au cours de la première moitié des années 2010 a occupé une large place dans les médias. Et pour cause, sans elle la production mondiale n'aurait pu continuer à augmenter sur la période. Toutefois, selon bon nombre d'observateurs, le boom des hydrocarbures non conventionnels devrait être de courte durée en raison de limites géologiques et économiques (P.Servigne et R.Stevens, 2015). L'extraction de ces ressources se caractérise en effet par des pics de production beaucoup plus précoces et des taux de déclin beaucoup plus rapides : la production atteint son maximum au cours du premier mois d'exploitation du puits, puis décline très rapidement, à des taux compris entre 60 % et 90 % dès la première année (A. Saussay, et alii, 2015). Ainsi, pour compenser le déclin des puits existants et, a fortiori, continuer à augmenter la production d'un gisement, les compagnies américaines doivent forer toujours plus de puits et engager toujours plus de dettes. Ce qui conduit à une situation financière pour le moins inquiétante : selon un rapport de l'administration américaine de l'énergie, la trésorerie combinée de 127 compagnies qui exploitent le pétrole et le gaz de schiste américain a accusé un déficit de 106 milliards de dollars pour l'année fiscale 2013-2014 (US Energy Information Administration, 2014). Selon l'EIA, la production américaine d'hydrocarbures non conventionnels devrait atteindre son plafond en 2016 avant de décliner à partir de 2021 (US Energy Information Administration, 2014).



Source : A. Berman, 2015

La baisse récente des cours du pétrole résulte avant tout de phénomènes de court terme et annonce une remontée prochaine des prix

Le fort recul des cours du pétrole observé entre l'été 2014 et le début de l'année 2016 reflète avant tout la conjonction de facteurs de court terme (A. Saussay, et alii, 2015 ; H. Camatte et alii, 2016).

- La production nord-américaine de pétrole non-conventionnel a augmenté de façon continue de 2009 à mi-2015.
- La croissance de la demande mondiale a été moins soutenue que prévue, notamment dans les économies émergentes.
- Réunis fin 2014, les membres de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) ne se sont pas accordés sur une réduction coordonnée de leur production en vue de soutenir les prix. Refusant de jouer seule le rôle de « variable

d’ajustement », l’Arabie Saoudite a décidé de maintenir sa production. Se faisant, elle chercherait à maintenir durablement les cours du pétrole bas pour freiner les investissements et l’exploration non-conventionnelle en Amérique du Nord, et maintenir ainsi ses parts de marchés.

- L’ampleur de la baisse des cours résulte également de la financiarisation des marchés pétroliers, les acteurs de marché privilégiant les informations allant dans le sens de la tendance en cours (à la hausse ou à la baisse).

Parce qu’elle fragilise le secteur pétrolier, cette baisse brutale des cours annonce une remontée prochaine. Elle met à mal en particulier les producteurs non-conventionnels américains. Déjà affaiblis comme on l’a vu par un modèle économique reposant sur un flux d’investissement permanent pour soutenir la production non-conventionnelle, ces entreprises doivent désormais faire face à une chute des prix du pétrole qui remet en question leur capacité à faire face aux dettes accumulées ces dernières années. Ainsi, le pourcentage de défaut pour la dette émise par les producteurs de gaz ou de pétrole aux États-Unis a atteint 11,3% en décembre 2015, un record depuis 2000 (H. Camatte et alii, 2016). De façon concomitante, la chute des cours a pour conséquence un recul sans précédent des investissements du secteur pétrolier (M. Auzanneau, 2016). Selon l’Agence Internationale de l’Energie, les investissements et dépenses en capitaux dans le secteur pétrolier ont diminué de 20 % en 2015, une réduction qui s’accroîtrait en 2016 (cité par H. Camatte et alii, 2016). Ce recul a fait chuter l’an dernier les découvertes de nouvelles réserves à leur plus bas niveau depuis 60 ans. Sachant qu’une large partie des investissements sert uniquement à maintenir la production des gisements existants, une telle réduction des investissements laisse augurer d’une offre mondiale de pétrole amoindrie dans les années à venir¹⁶, et donc d’une hausse des cours du pétrole.

Vers une succession de pics de production des ressources non renouvelables

Comme le soulignent les économistes Pierre-Noël Giraud et Timothée Ollivier (2015), le principe de pic de production peut être étendu à toute ressource énergétique ou non énergétique épuisable. Sa production ne peut augmenter continuellement jusqu’à s’effondrer instantanément quand le stock est épuisé. De ce fait, substituer une ressource non renouvelable par une autre ne constitue qu’un ajustement de court terme : il ne s’agit pas de pallier l’épuisement d’une ressource car la pression est reportée sur une autre, ce qui ne manquera pas d’accélérer sa vitesse d’épuisement (F. Fizaine, 2014).

Selon le géologue Bernard Durand¹⁷ (2013), le pic de l’ensemble de la production pétrolière (conventionnelle et non conventionnelle) devrait avoir lieu vers 2020 en l’absence de toute contrainte autre que géologique (voir graphique ci-contre). Par ailleurs, des analyses prospectives montrent que la probabilité est forte pour que la production mondiale de gaz (conventionnelle et non conventionnelle) commence à décliner vers 2030 et celle de charbon plafonne à partir de 2025-2030 avant de décliner en 2070 (B. Durand, 2013 ; J. Laherrère, 2013). Autrement dit, l’hypothèse d’un remplacement du pétrole par le gaz et le charbon paraît pour le moins fragile puisqu’elle contribuerait surtout à accélérer l’épuisement de ces derniers (P. Servigne et R. Stevens, 2015).

Bien que susceptibles d’être recyclés, les métaux sont également soumis à ce principe de pic de production au niveau des activités extractives primaires. Les études portant sur la raréfaction des métaux font cependant rarement référence à la notion de pic, évaluant le nombre d’années de réserves disponibles au niveau de la production actuelle. S’agissant des possibilités de substitution des métaux entre eux, Florian Fizaine rappelle que le nombre d’éléments naturels sur le tableau de Mendeleïev étant par nature fini, le

¹⁶ La production des États-Unis a d’ores et déjà reculé de 700 000 barils/jour en un an depuis le pic d’avril 2015 (M. Auzanneau, 2016).

¹⁷ Ancien directeur de la Division Géologie-Géochimie de l’Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (IFPEN)

nombre de substitution possible l’est aussi (F. Fizaine, 2014). De plus, les substitutions peuvent s’avérer trop complexes à mettre en œuvre (Office parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2016). C’est particulièrement le cas des métaux rares qui sont utilisés pour leurs propriétés très spécifiques : il y a tellement de paramètres à prendre en compte que leur substitution peut se révéler impossible.

Extraction de métaux et extraction d’énergie, vers un épuisement mutuel

L’ère industrielle a entraîné une croissance massive et une diversification de l’usage des métaux

Comme l’explique Patrice Christmann du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), si un certain nombre de métaux sont utilisés de longue date par les sociétés humaines, le vrai âge des métaux commence cependant avec l’ère industrielle et explose après-guerre. Les effets cumulés de la disponibilité d’une énergie abondante et bon marché et de découvertes réalisées en chimie et en physique permettent l’usage de quantités de plus en plus importantes de la quasi-totalité des métaux.

Les métaux sont en effet indispensables à la fabrication de la plupart des infrastructures, des bâtiments et des biens manufacturés (biens d’équipement, véhicules de transports, électroménager, produits électroniques/informatiques, etc.). Pour s’en convaincre, on peut constater le stock moyen de matières par personne dans les pays développés pour les principaux métaux consommés (IRP/UNEP, 2010) : fer = 7000 à 14000 kg ; acier = 7085 kg ; aluminium = 350 à 500 kg ; cuivre = 140 à 300 kg ; zinc = 80 à 200 kg ; plomb = 20 à 150 kg). L’augmentation de la production de métaux est sans précédent historique (P.Christmann, 2016) : la production d’acier a été multipliée par 57, celle d’aluminium par environ 7 000, celle de cuivre par 36.

Cette massification se double d’une diversification des métaux utilisés. Jusqu’aux années 1980, l’industrie utilisait essentiellement les grands métaux classiques (cuivre, acier, aluminium, etc.). Mais depuis, le développement des nouvelles technologies, intégrant un nombre croissant de fonctionnalités, requiert désormais des dizaines de métaux rares, c’est-à-dire des métaux aux propriétés spécifiques dont la production annuelle est nettement inférieure à celle des métaux majeurs et dont elle constitue généralement un sous-produit (P.Christmann, 2016 ; P.Bihouix, 2010, 2015).

Les métaux sont indispensables au secteur énergétique et inversement

L’essor des nouvelles technologies numériques de l’information et de la communication est souvent évoqué comme un facteur majeur de l’accroissement et la diversification de l’usage des métaux : pas moins de soixante éléments chimiques sont utilisés dans la production des ordinateurs, des tablettes et autres smartphones (P.Christmann, 2016). Cela ne doit pas faire oublier qu’un autre champ d’activité contribue également fortement à cette tendance : le secteur énergétique (P.Christmann, 2016 ; F. Fizaine, 2014 ; P. Bihouix, 2014). D’une part, les activités d’extraction et de transformation de combustibles fossiles nécessitent d’importantes quantités de métaux, que ce soit pour les infrastructures de production (construction des puits de pétrole, des plateformes pétrolières, des raffineries, oléoduc et gazoduc, etc.) ou pour les procédés (raffinage, catalyse, etc.). D’autre part, les métaux, et en particuliers les métaux de spécialité, sont indispensables aux nouvelles technologies énergétiques appelées à jouer un rôle central dans la transition énergétique (éolien, photovoltaïque, batterie, smart grids, piles à combustible, LED, etc.). Par exemple, les diverses technologies de panneaux solaires photovoltaïques utilisent plusieurs métaux rares : argent, arsenic, bismuth, cadmium, cuivre, iode, indium, gallium, sélénium, silicium tellure. De même, le néodyme et le dysprosium sont nécessaires à la fabrication des aimants permanents présents dans les éoliennes.

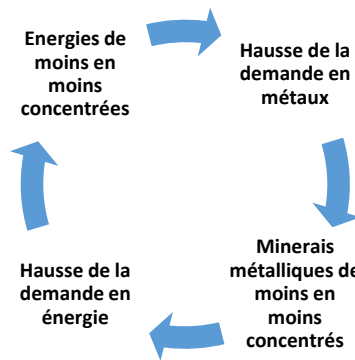
La réciproque est aussi vraie. L’envolée de la production de métaux évoquée précédemment n’a été possible que grâce à la disponibilité d’énergies fossiles bon marché (P.Christmann, 2016 ; P. Bihouix, 2014). Par exemple, pour faire fonctionner les énormes tombereaux utilisés dans les mines à ciel ouvert ou retirer les impuretés du

minérai. A l'heure actuelle, l'extraction et le raffinage des minerais métalliques représente environ 10% de la consommation d'énergie primaire mondiale ; selon une étude prospective, cette part pourrait atteindre 40% à l'horizon 2030 (F. Fizaine, 2014). En résumé, il devient difficile de dissocier la disponibilité énergétique de la disponibilité des métaux.

Une spirale négative entre extraction d'énergie et extraction de métaux

Or, comme l'expliquent plusieurs spécialistes des métaux (P. Bihouix, 2014 ; F. Fizaine, 2014), comme toute demande supplémentaire d'énergie ou de métal se traduit par l'exploitation de gisements de rendement inférieurs, l'interdépendance entre extraction d'énergie et extraction de métaux peut constituer un facteur amplificateur des rendements décroissants et accélérer ainsi la raréfaction des ressources. D'un côté, l'exploitation d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) moins accessibles entraîne un besoin accru en métaux (par exemple, pour construire les plateformes deep offshore) ; de l'autre, l'extraction de minerais de métal moins concentrés implique de mobiliser davantage d'énergie pour creuser toujours plus profond et séparer les métaux du reste de minérai.

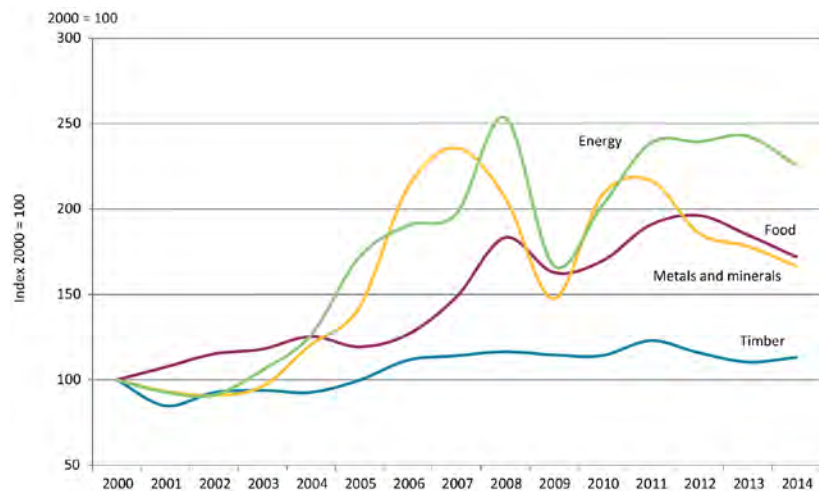
L'épuisement mutuel des énergies et des métaux



Source : F. Fizaine, 2014

Ce lien entre production des énergies fossiles et production des métaux se traduit par une évolution conjointe de leur prix de marché. On se souviendra que les années 2000 ont été marquées par une envolée simultanée des prix du pétrole et des métaux (voir graphique ci-dessous).

Evolution des prix des principales commodités sur les marchés mondiaux entre 2000 et 2014



Source : IRP/UNEP, 2016

Une fois passé le pic de production, il est illusoire de compter sur l’ensemble des ressources restantes

Lorsque le pic de production d’une ressource non renouvelable est franchi, il reste en théorie encore une grande quantité de ressources à exploiter, comme le suggère en particulier l’indicateur (souvent repris dans les médias) des réserves rapportées au niveau de production actuel. Toutefois, la rétroaction positive entre extraction d’énergie et extraction de métaux rend quelque peu chimérique l’idée que l’on pourrait exploiter intégralement les réserves restantes (U. Bardi, 2015 ; P. Servigne et R. Stevens, 2015 ; F. Fizaine, 2014). L’histoire montre que l’exploitation des gisements pétroliers s’arrête bien avant d’arriver au « dernier baril » disponible.

Autrement dit, comme le soulignent de nombreux auteurs, l’épuisement économique intervient bien avant l’épuisement géologique car il relève davantage d’une dégradation qualitative des gisements plutôt que d’un tarissement des quantités ultimes disponibles (F. Fizaine, 2014) : une large partie des ressources en place ne possèdera jamais des qualités géologiques (concentration, accessibilité, etc.) suffisantes pour être exploitée économiquement. L’épuisement économique d’une ressource survient lorsque l’augmentation des coûts d’extraction, induite par les rendements décroissants, devient telle que les prix de marchés atteignent un niveau au-delà duquel il n’existe plus de demande (F. Fizaine, 2014 ; U. Bardi, 2015). Il s’ensuit un arrêt de la production puisque l’industrie ne se donnera jamais la peine d’extraire des ressources devenues si coûteuses qu’elles ne peuvent être vendues.

Ces constats incitent à relativiser le pouvoir régulateur des mécanismes de prix (F. Fizaine, 2014). Il ne suffit pas de transmettre vers l’aval l’augmentation du prix des ressources naturelles pour résoudre le problème de leur disponibilité. La solvabilité des agents économiques connaît elle aussi des limites.

Epuisement économique : l’exemple des métaux (F. Fizaine, 2014)

S’agissant des métaux, Florian Fizaine indique que les gisements de minerais métalliques actuellement exploités présentent des taux de concentration souvent 100 à 10 000 fois supérieure à la concentration moyenne des mêmes métaux dans les roches communes de la croûte terrestre. Or, dans l’hypothèse d’une exploitation des minerais de métaux à une concentration équivalente à celle de la croûte terrestre, une étude académique a montré que celle-ci requerrait une multiplication du prix des métaux par un facteur 10 à 10 000 (étude citée par F. Fizaine, 2014).

La perspective de ces contraintes croissantes pourrait cependant être nuancée si dans le même temps le progrès technique offrait des opportunités de réduction des coûts au moins équivalentes. Mais, comme on va le voir, la baisse tendancielle du « taux de retour énergétique » montre que cette hypothèse ne s’est pas concrétisée jusqu’ici.

L’« énergie nette », frontière ultime de la consommation de ressources naturelles

Le taux de retour énergétique : combien faut-il consommer d’énergie pour obtenir une unité d’énergie ?

Il ressort des analyses précédentes le constat que la disponibilité des ressources non renouvelables ne peut être évaluée seulement à partir des ressources en place. Elle doit être évaluée à partir des ressources consommées pour extraire les ressources elles-mêmes. Ce postulat est au cœur de la notion de « taux de retour énergétique » ou Energy Return On Investment (EROI) en anglais. Introduite dès les années 1970 par l’écologue Howard T. Odum et développée ensuite par son disciple Charles A.S. Hall, l’EROI permet de calculer l’énergie nette, c’est-à-dire la quantité d’énergie qui reste à la société lorsque l’on soustrait à l’énergie produite celle qui a été consommée pour la produire (B. Thévard, 2013). Plus précisément, l’EROI indique la quantité d’énergie obtenue (output) à partir d’une unité d’énergie (input).

L’EROI permet ainsi d’observer l’évolution dans le temps du rendement énergétique de la « production » d’énergie, de façon globale et pour différentes sources énergétiques.

Par exemple, l’EROI de la production pétrolière des Etats-Unis était de 100 pour 1 en 1930 (exprimé 100:1) : pour une unité d’énergie investie, on en récupérait 100.

La soutenabilité matérielle des économies développées implique de disposer d’un taux de retour énergétique minimum

Largement ignoré par les politiques énergétiques nationales, l’EROI constitue pourtant un indicateur crucial pour anticiper les conséquences de la raréfaction des ressources non renouvelables sur le fonctionnement des sociétés, c’est-à-dire les limites ultimes de ce que nous sommes en mesure d’extraire et de produire (U. Bardi, 2015 ; P. Servigne et R. Stevens, 2015 ; B. Thévard, 2013). Il est en effet essentiel de comprendre que la complexification des sociétés (diversification et spécialisation des rôles sociaux, économiques et politiques, extension des infrastructures et du contrôle sociopolitique, développement de l’économie des services...) est étroitement liée à une consommation croissante d’énergie par habitant, comme l’a montré l’anthropologue et historien américain Joseph Tainter dans un ouvrage de référence (1988). Ainsi, le développement économique exceptionnel de l’Occident depuis la fin du 19^{ème} siècle repose en bonne partie sur l’augmentation de l’énergie nette permise par l’exploitation des énergies fossiles (Y. Cochet, 2014). Comme on l’a indiqué plus haut, le charbon, le pétrole et le gaz représentent encore en 2014 plus de 80% de la production d’énergie primaire mondiale (AIE, 2016).

De ce point de vue, plusieurs travaux académiques montrent qu’un surplus énergétique conséquent est requis pour être en mesure d’assurer l’ensemble des services actuellement offerts à la population (J.Lambert et alii, 2012¹⁸) :

- pour pouvoir extraire, raffiner et transporter le pétrole jusqu’aux stations-services, il faut un EROI de = 1,5:1 ;
- pour construire les infrastructures, les camions, les bateaux, les voitures, les avions et tracteurs qui permettront d’utiliser le pétrole raffiné, EROI = 3:1 ;
- pour produire l’alimentation, EROI = 5:1 ;
- pour permettre à la population de vivre dans de bonnes conditions, d’avoir un habitat, des meubles, des vêtements, EROI = 7:1 ;
- pour maintenir un système éducatif primaire et secondaire, EROI = 10:1 ;
- pour offrir un système de santé et d’enseignement supérieur EROI = 12:1
- pour permettre l’accès aux arts et aux loisirs, EROI = 14:1

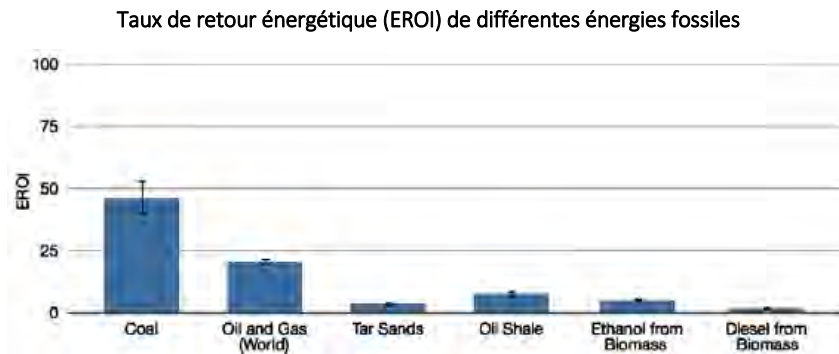
Se dessine ainsi un seuil en deçà duquel la capacité des sociétés développées à soutenir l’ensemble de leur organisation actuelle se trouve remise en question. Un EROI de 5:1 semble être un seuil minimum (C. Hall et alii, 2009)

Une baisse tendancielle du surplus énergétique disponible pour la société...

Parce qu’il faut creuser de plus en plus profond, aller de plus en plus loin en mer et utiliser des techniques et infrastructures de production de plus en plus coûteuses pour maintenir le niveau de production, les surplus d’énergie offerts par les énergies fossiles connaissent une baisse tendancielle (F. Fizaine, 2014). Certains se situent déjà en deçà de 14:1¹⁹. Par exemple, l’EROI de la production pétrolière des Etats-Unis est passé de 100 pour 1 en 1930 à 35:1 en 1990 puis 11:1 aujourd’hui (C.Cleveland, 2005). A l’échelle mondiale, selon C.Hall et alii (2014), l’EROI moyen de la production de pétrole et de gaz conventionnel se situe autour de 20:1 (voir graphique ci-dessous). Celui de la production de charbon apparaît nettement supérieur, tandis que ceux des hydrocarbures non conventionnels s’avèrent bien plus faibles : 2:1 pour les sables bitumeux (« Tar sands »), 5:1 pour pétrole de schiste (« Oil shale »).

¹⁸ Cité par B.Thévard, 2013

¹⁹ Les références qui suivent sont citées par Pablo Servigne et Raphael Stevens (2015)

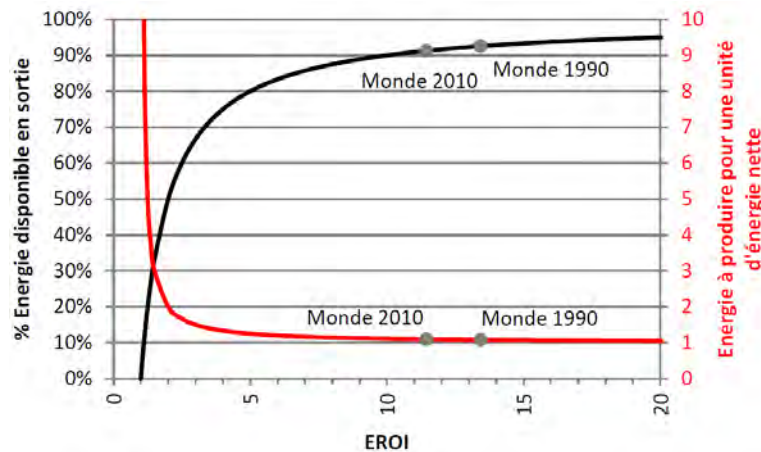


Source : C.Hall et alii (2014)

... qui conduit à la « falaise de l’énergie nette »

Selon Florian Fizaine, cette tendance à la baisse du taux de retour énergétique des énergies fossiles pose la question de la capacité du secteur énergétique à fournir à l’avenir la même quantité d’énergie aux autres activités humaines qu’aujourd’hui, voire à en fournir toujours davantage pour permettre la croissance économique. En effet, avec un EROI en baisse, le maintien d’une quantité d’énergie nette constante pour la société ne peut se faire qu’au prix d’une croissance incessante de la production du secteur énergétique. Or, si l’énergie nette baisse peu lorsque l’EROI se situe au-delà de 8:1, elle recule en revanche très rapidement lorsque l’EROI passe en dessous de ce seuil (F. Fizaine, 2014). Comme l’explique Florian Fizaine, cette analyse met en lumière l’existence d’une « falaise de l’énergie nette » (« net energy cliff ») : l’effort à réaliser pour dégager de l’énergie disponible pour les activités humaines devient critique lorsque l’EROI se rapproche de plus en plus de la valeur unitaire. Lorsque l’EROI est en dessous de 1, on dépense plus d’énergie que l’on en produit. Cette perspective a donné lieu à une représentation graphique présentée dans plusieurs articles et notamment dans la thèse de Florian Fizaine (voir graphique ci-dessous).

Evolution de l’énergie nette (échelle de gauche) et de l’énergie à extraire pour maintenir l’énergie nette (échelle de droite) en fonction de l’EROI



Source : F. Fizaine, 2014

Lecture : lorsque l’EROI se situe à 20:1, il faut produire à peine plus d’1 unité d’énergie pour obtenir 1 unité d’énergie nette (échelle de droite) ; on dispose ainsi en sortie de 95% de l’énergie produite (échelle de gauche) ; lorsque l’EROI se situe à 2:1, il faut produire 2 unité d’énergie pour obtenir 1 unité d’énergie nette ; on ne dispose en sortie plus que de 50% de l’énergie produite.

Vers un « peak everything » ?

Au vu du caractère déterminant de l’énergie pour la réalisation et la croissance des activités humaines, la baisse du TRE devrait impacter, outre l’extraction de matières premières, l’ensemble des activités reposant fortement sur l’utilisation de ressources naturelles. Ce qui amène le spécialiste américain du peak oil Richard Heinberg à envisager

à l’avenir un « peak everything » (« pic de tout »). In fine, le fait que l’on consomme de plus en plus d’énergie pour produire la même quantité de biens et de services, va totalement à l’encontre du découplage (D.Meadows et alii, 2004 ; T.Caminel, 2014, 2015).

Pour une autre approche de la productivité matérielle de l’économie

L’éclairage apporté par le taux de retour énergétique incite à mieux appréhender l’évolution de la productivité des ressources. A l’heure actuelle, les organismes statistiques nationaux et internationaux mesurent celle-ci en divisant le PIB par la consommation intérieure de matières, laquelle correspond à la somme des flux de matières extraites du territoire ou importées, réduite des flux de matières exportées. Or, cette approche présente l’inconvénient de ne pas prendre en compte les consommations de matières brutes nécessaires à la production des produits semi-finis ou finis importés/exportés (consommations « cachées ») ni le stock de capital productif accumulé (et les consommations cachées de ressources qu’il implique). On peut penser qu’une mesure plus pertinente de la productivité dans un contexte de raréfaction des ressources devrait consister à comparer non pas une valeur monétaire et une quantité physique, mais des quantités physiques entre elles.

Concrètement, si l’on prend l’exemple de l’agriculture, cela peut consister à rapporter la quantité d’énergie requise pour produire une quantité donnée de nourriture. Or, de ce point de vue, l’agriculture conventionnelle apparue après-guerre – laquelle repose sur une forte consommation d’énergie (machines, engrais, semences, etc.) – apparait de loin comme la forme de production alimentaire la moins efficace jamais pratiquée (R.Heinberg, 2008). Selon l’ingénieur agronome Pablo Servigne (2015), depuis 1940 l’efficacité énergétique de l’agriculture industrielle a été divisée par plus de 20 : en 1940, avec une calorie d’énergie, on produisait 2,3 calories de nourriture, tandis qu’aujourd’hui il faut 7,3 calories d’énergie pour produire une calorie de nourriture. Qu’en serait-il si l’on appliquait cette approche aux différentes filières industrielles ?

5.2 Les ressources renouvelables pourront difficilement prendre le relais

Les énergies renouvelables ne peuvent se substituer quantitativement et qualitativement aux énergies fossiles

Poser la question des alternatives possibles aux énergies fossiles ne consiste pas simplement à savoir si des solutions technologiques existent et fonctionnent, il s’agit d’évaluer si elles permettraient de préserver le mode de vie des sociétés industrialisées (B.Thévard, 2012). Autrement dit, une question clé à se poser est de savoir si les énergies renouvelables peuvent se substituer en quantité et en qualité aux usages actuels des énergies fossiles, et dans une temporalité compatible avec la déplétion de ces dernières. Or, il semble que les conditions sont loin d’être réunies pour que cela soit possible.

Les énergies renouvelables ne sont toujours pas la priorité des investissements énergétiques

Tout d’abord, les investissements énergétiques sont loin de donner la priorité aux énergies renouvelables (M. Klare, 2014). L’industrie de l’énergie continue d’investir massivement dans les énergies fossiles et en particulier de plus en plus dans les pétroles et gaz non conventionnels. Selon l’Agence internationale de l’énergie (AIE), l’investissement mondial cumulé dans l’extraction et la transformation de nouveaux combustibles fossiles atteindra une somme estimée à 22 870 milliards de dollars entre 2012 et 2035, tandis que les investissements dans les énergies renouvelables, l’hydroélectricité et l’énergie nucléaire s’élèveront à seulement 7 320 milliards de dollars. Durant cette période, les investissements dans le pétrole seul, estimés à 10 320 milliards de dollars, devraient dépasser les dépenses pour les énergies éolienne, solaire, géothermique, hydraulique, nucléaire, les biocarburants et toutes les autres formes d’énergies renouvelables combinées.

Des échelles de déploiement qui paraissent difficiles à atteindre

Ensuite, même si les investissements étaient au rendez-vous, il faut avoir en tête les ordres de grandeur que représente l’ambition d’une couverture de nos besoins énergétiques par les énergies renouvelables. Philippe Bihouix (2015a) souligne par exemple que le plan Wind Water Sun proposé par le professeur Jacobson de Stanford implique d’installer d’ici 2030 3,8 millions d’éoliennes de 5 MW et 89 000 centrales solaires de 300 MW, soit installer en 15 ans 19 000 GW d’éoliennes (30 fois le rythme actuel de 40 GW au plus par an), et inaugurer quinze centrales solaires par jour. Autre exemple, toujours de Philippe Bihouix (2014), pour produire les 22 000 TWh de la consommation électrique mondiale (en 2011), il faudrait installer l’équivalent de 500 années de production actuelle de panneaux solaires. Et s’il fallait couvrir l’ensemble de la consommation énergétique mondiale, il faudrait au bas mot 2000 années de production de panneaux solaires. Du reste, une perspective historique montre que les nouvelles ressources énergétiques se sont toujours additionnées aux précédentes, sans véritable substitution (J.-C. Debeir et alii, 2015²⁰). Si la part relative des différentes sources d’énergie dans le mix énergétique global peut évoluer au cours du temps, la consommation en valeur absolue de chacune de ces sources d’énergie a tendance à accroître : en ce sens, nous ne sommes jamais sortis de l’âge du charbon puisque nous n’en avons jamais autant extrait qu’aujourd’hui.

Les ressources nécessaires au déploiement des énergies renouvelables pourraient manquer à l’appel

La marche à gravir paraît d’autant plus immense qu’il y a de fortes chances pour que le déploiement industriel des énergies renouvelables bute sur la question de la disponibilité des matières premières. D’une part, sa mise en œuvre opérationnelle sera rendu plus difficile par la fin du pétrole abondant et bon marché. D’autre part, les technologies mobilisées pour exploiter les énergies renouvelables présentent une intensité matérielle nettement supérieure aux technologies traditionnelles de l’énergie, que ce soit pour les métaux rares, les métaux de base ou les ressources minérales (F. Fizaine, 2014 ; P. Bihouix, 2014). Par exemple, il faut en moyenne 10 fois plus de métaux par kWh renouvelable que par kWh thermique (C. Arnsperger et D. Bourg, 2016). Selon Philippe Bihouix (2015a), il faudrait ainsi multiplier par 15 la production annuelle de matières premières (acier, ciment, cuivre, terres rares, etc.) pour assurer l’approvisionnement du plan Wind Water Sun. Mettre à disposition une telle quantité de matières premières paraît hors de portée, d’autant plus qu’il faudrait rééditer l’exploit au bout de quelques décennies pour renouveler les capacités de production (P. Bihouix, 2014). Autant d’éléments qui amènent à s’interroger sur la soutenabilité d’une transition énergétique reposant sur des ressources énergétiques renouvelables dont le déploiement est fondé sur des ressources épuisables (F. Fizaine, 2014 ; P. Bihouix ; 2014).

Les énergies alternatives ne présentent pas les mêmes niveaux de performances que le pétrole

Enfin, force est de constater qu’aucune source d’énergie renouvelable ne présente les mêmes qualités de densité énergétique²¹, de facilité de transport et de polyvalence²² que celles qu’offre le pétrole (R. Heinberg, 2008). Plus largement, les énergies renouvelables qui connaissent actuellement le plus fort développement – l’éolien et le photovoltaïque – présentent un taux de retour énergétique²³ (ou Energy Return On Investment (EROI) en anglais) nettement plus faible que celui exigé par le fonctionnement des sociétés développées. Une étude approfondie a démontré récemment que l’ensemble de la filière

²⁰ Cité par M. Combes, 2015

²¹ La densité énergétique d’une batterie électrique est de 100 à 150 fois inférieure à celle du pétrole (1kg de batterie contient environ 80 Wh contre 11 500 Wh pour 1 kg de pétrole) (Thévard, 2012).

²² Le raffinage permet d’adapter le pétrole à une palette d’usages (transport, chauffage, fabrication de produits chimiques, de médicaments, de textile, etc.).

²³ Les références qui suivent sont citées par Pablo Servigne et Raphael Stevens (2015)

photovoltaïque en Espagne n’offre qu’un EROI de 2,5:1 en raison des multiples coûts énergétiques indirects qu’impliquent les énergies intermittentes : surveillance, assurances, stockage de l’énergie produites, etc. (P. Prieto et C. Hall, 2013). Quant à l’éolien, en intégrant la nécessité de l’adosser à un système de stockage ou une centrale électrique thermique, son EROI se situerait à 3,8:1 (D. Weißbach et alii, 2013). Les agrocarburants quant à eux présentent des EROI inférieurs à 2:1 (D. Murphy et alii, 2010). Notons au passage que le TRE de l’énergie nucléaire n’est pas plus encourageant : entre 5:1 et 15:1 (D. Murphy et alii, 2010). Seule l’hydroélectricité affiche des performances confortables avec un TRE supérieur à 75:1 (C. Hall et alii, 2014). Cependant, une étude récente a montré que les 3 700 projets hydroélectriques en cours ou planifiés dans le monde n’augmenteraient la production électrique mondiale que de 2% (C. Zarfl et alii, 2014). Selon les calculs à long termes établis par Florian Fizaine, la baisse tendancielle du EROI des énergies renouvelables conduit à ce que le surplus énergétique généré par celles-ci soit insuffisant pour maintenir nos sociétés actuelles (F. Fizaine, 2014).

En résumé, les énergies renouvelables ne semblent pas être en mesure de compenser le déclin des énergies fossiles, et en particulier du pétrole, tant en terme de puissance que de diversité d’usage (F. Fizaine, 2014 ; P. Servigne et R. Stevens, 2015 ; P. Bihouix, 2013 ; R. Heinberg, 2008).

L’exploitation des ressources renouvelables connaît elle aussi des rendements décroissants

Comme le soulignent différents auteurs (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015 ; F. Fizaine, 2014), les ressources énergétiques et non énergétiques renouvelables n’échappent pas au principe de rendements décroissants. Dès le 19^{ème} siècle, des économistes tels que Malthus ou Ricardo ont attiré l’attention sur la dégradation des rendements au fur et à mesure de l’exploitation de nouvelles terres. Les plus fertiles sont exploitées en premier. Afin de suivre la croissance des besoins, les nouvelles terres mises en culture s’avèrent moins productives, et ainsi de suite.

Encore aujourd’hui, la perspective « bioéconomique » visant à substituer massivement les métaux et les plastiques (issus du pétrole) par des matières biosourcées présentant des caractéristiques techniques et chimiques similaires paraît illusoire. En effet, la production de biomasse d’un écosystème est par définition limitée et l’emprise de l’humanité sur la production mondiale de biomasse déjà très élevée (R. Debref et alii, 2016). D’autre part, on ne saurait réduire la biomasse à une fonction de pourvoyeuse d’intrants de l’industrie de transformation : elle constitue également un tissu vivant offrant des services écosystémiques cruciaux pour le maintien de la vie sur terre (E. Delgoulet et J. Pahun, 2015). En bref, parce que les écosystèmes vivants se caractérisent par un taux de prélèvement (ou rejet) maximum soutenable (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015), la voie de la bioéconomie ne permet d’envisager au mieux qu’un état stationnaire (F. Fizaine, 2014).

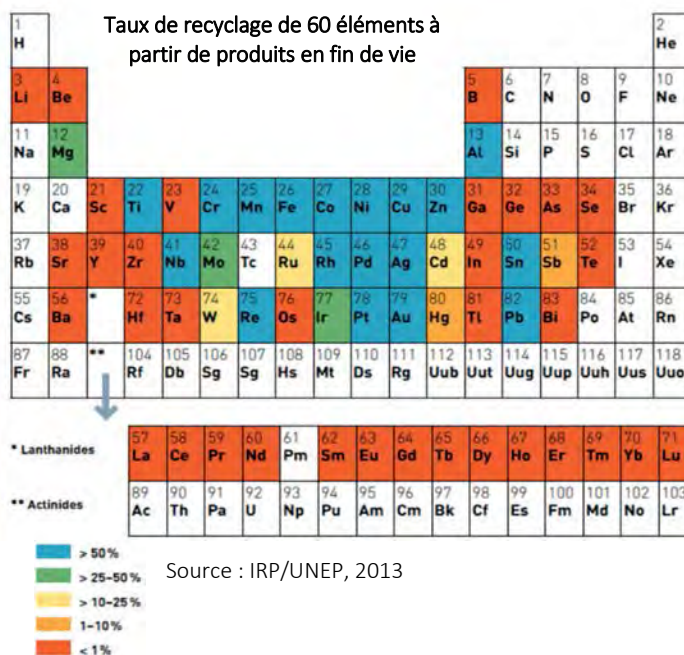
Il en est de même s’agissant des énergies renouvelables. Les gisements solaires ou éoliens n’ont pas tous les mêmes caractéristiques et tendent à être exploités par ordre décroissant de qualité (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015). Ainsi, au fur et à mesure que les meilleurs gisements d’énergies renouvelables sont mis en exploitation, toute demande d’énergie supplémentaire devrait se traduire par la mobilisation de sources énergétiques aux rendements inférieurs (F. Fizaine, 2014).

L’amélioration significative des taux de recyclage bute sur plusieurs limites

Les avantages d’un recyclage plus performant

On l’a déjà souligné plus haut, à la différence des énergies fossiles qui se dissipent lors de leur usage, les métaux présentent eux l’avantage de pouvoir être recyclés. On distingue généralement deux phases de recyclage (F. Fizaine, 2014 ; J.-F. Labbé, 2016) : la récupération et le recyclage des chutes et rebuts de fabrication ; la récupération des produits hors d’usage (« en fin de vie ») et le recyclage des matières qui les composent

(métaux, minéraux, mais aussi plastiques et autres matières organiques). En théorie, le recyclage présente plusieurs avantages (F. Fizaine, 2014 ; J.-F. Labbé, 2016 ; A. Geldron, 2016). Il peut permettre d’alléger la pression sur les ressources naturelles concernées, de réduire les coûts de production dans la mesure où les ressources secondaires (issues du recyclage) sont généralement moins onéreuses à produire que les ressources primaires (tirées de l’environnement naturel). La piste du recyclage paraît d’autant plus évidente que les marges de progrès sur le plan des taux de recyclage paraissent considérables (voir tableau ci-contre).



Cependant, comme l’explique Philippe Bihoux (2010, 2013, 2014, 2015) parvenir au recyclage de la quasi-totalité des matières contenues dans les déchets paraît hors de portée dans le contexte socio-économique actuel. Se concentrant sur le cas spécifiques des métaux, il identifie plusieurs difficultés.

Les produits ne sont pas conçus de façon à optimiser le recyclage

La diversité, la complexité et la miniaturisation croissantes des produits, des composants (dizaines de métaux différents dans un téléphone portable ou un ordinateur) et des matières (milliers d’alliages métalliques différents, mélange de plastiques et d’additifs, matériaux composites) nous empêche d’identifier, de séparer et de récupérer facilement les matières premières. Ceci empêche de recycler en conservant les qualités de chaque matériau : comme on ne peut pas dissocier chacun d’eux facilement, on se contente d’organiser quelques grandes filières de récupération dans lesquelles les métaux de spécialité sont mélangés au reste et finissent dans des usages moins nobles (comme les fers à béton du bâtiment par exemple). Autrement dit, ils ont bien été recyclés, mais leurs qualités spécifiques (par exemple, la propriété anticorrosion du nickel) seront définitivement perdues. Ainsi, les matériaux recyclés (matières premières secondaires) étant en principe de moins bonne qualité, ils ne peuvent convenir qu’à des applications peu exigeantes, les usages appelant des performances élevées reposant toujours sur des ressources primaires.

Les technologies hi-tech sont les moins favorables au recyclage

Les nouvelles technologies ne font qu’aggraver ces difficultés. D’une part, elles requièrent souvent des performances plus grandes, qui obligent à utiliser des métaux et des alliages de grande pureté, rendant inutilisables les métaux « mélangés » issus du recyclage. D’autre part, elles présentent généralement une complexité accrue qui

renforce les limites du recyclage que l’on vient d’évoquer. Le développement des nanotechnologies constitue à l’évidence un facteur aggravant.

Un recyclage amélioré n’empêche pas la dissipation irréversible des métaux

Enfin, l’usage de certains métaux n’est pas exempt de formes dissipatives qui rendent ceux-ci définitivement irrécupérables. Il s’agit par exemple des métaux utilisés comme additifs chimiques dans les verres, les plastiques, les encres, les peintures, les cosmétiques, les fongicides, les lubrifiants et bien d’autres produits industriels ou de la vie courante²⁴. D’une manière générale, même si nous étions capables de mettre en œuvre des cycles de recyclage multiples, les ressources initiales finissent par disparaître irrémédiablement. Avec un métal recyclé à 50%, après seulement quatre cycles, presque 95% de la quantité de départ est déjà perdue (U.Bardi, 2015).

²⁴ Selon Philippe Bihouix (2015), ces usages dispersifs concernent environ 5% du zinc, 10 à 15% du manganèse, du plomb et de l’étain, 15 à 20% du cobalt et du cadmium, et, cas extrême, 95% du titane dont le dioxyde sert de colorant blanc universel.

6. L’Europe apparaît particulièrement exposée aux tensions sur l’accès aux ressources naturelles mondiales

On a vu dans les parties précédentes que la poursuite de la croissance de la consommation de ressources naturelles paraît difficilement soutenable à l’avenir en raison de la déplétion des ressources épuisables et de la difficulté à les substituer intégralement par des ressources renouvelables. La croissance continue de la consommation de ressources constitue également un obstacle irréductible à l’avènement d’une économie véritablement circulaire.

Ainsi c’est une nouvelle donne matérielle qui se dessine pour l’économie mondiale. Or, à l’instar de la géographie des effets du changement climatique qui révèle de fortes différences d’exposition selon les régions du monde, la problématique de l’approvisionnement en ressources naturelles ne s’impose pas de la même manière à toutes les régions et tous les pays du monde. Si elle devrait susciter une concurrence croissante et donc des tensions accrues entre ces derniers, la question de l’accès aux ressources naturelles mondiales semble se poser tout particulièrement pour l’Europe.

4.1 Une nouvelle donne matérielle pour l’économie mondiale

Plusieurs points saillants ressortent des analyses précédentes :

1. l’économie des sociétés industrielles repose sur une consommation massive et croissante de ressources naturelles non renouvelables ;
2. l’énergie joue un rôle déterminant dans la croissance économique et l’extraction des ressources naturelles ;
3. certaines ressources non renouvelables, notamment les énergies fossiles et certains métaux, approchent de leur pic de production, après lequel les quantités produites amorcent un déclin inexorable ;
4. le déclin de la production sera probablement abrupte car les activités d’extraction consomment une part croissante des ressources qu’elles produisent et les rendements décroissants des différentes ressources peuvent se renforcer mutuellement ;
5. les gains de productivité des ressources et les technologies alternatives offerts par le progrès technique ne permettront vraisemblablement pas d’opérer un découplage absolu entre croissance économique et pressions sur l’environnement.
6. l’émergence d’une économie véritablement circulaire – c’est-à-dire satisfaisant la quasi-totalité de ses consommations de matières premières par le seul recyclage intégral de ses déchets – n’est envisageable que dans un scénario de croissance matérielle nulle.

Dans ces conditions, selon les différents auteurs évoqués plus haut, une nouvelle donne économique globale se dessine à un horizon proche. Avec le déclin de la production mondiale de pétrole après 2020 et celui de la production de gaz attendu vers 2030, la quantité d’énergie mise à disposition de l’humanité par les combustibles fossiles devrait décliner après 2025 (B. Durand, 2013). Comme les énergies renouvelables ne pourront constituer à temps une véritable alternative tant quantitativement que qualitativement, on peut s’attendre à un déclin de la quantité d’énergie moyenne disponible par habitant (R. Heinberg, 2008). Ce dernier sera d’autant plus rapide du fait de l’augmentation de la population mondiale. En raison du lien étroit entre activité économique et énergie, nous devrions donc assister à la poursuite du ralentissement de la croissance puis à une baisse du PIB (D. Meadows et alii, 2004 ; T. Caminel, 2015).

Ce déclin de la disponibilité des énergies fossiles marquerait un moment historique. La croissance économique soutenue dont bénéficient les pays occidentaux depuis la révolution industrielle, et en particulier au cours de la période d’après-guerre, et les économies émergentes plus récemment apparaît en effet comme un phénomène à la fois extraordinaire et temporaire dans l’histoire de l’humanité (D.Demilly et alii, 2013 ; J.Schor, 2013 ; D.Meadows et alii, 2004) : extraordinaire car la production par habitant avait jusqu’ici stagné ou augmenté de manière presque imperceptible au niveau mondial²⁵ ; temporaire puisque cette poussée de croissance a été rendu possible avant tout par l’exploitation de ressources énergétiques concentrées et bon marché mais disponibles en quantité limitée et non renouvelables²⁶.

Parce que la croissance économique est une fonction du surplus d’énergie et que celui fourni par les énergies fossiles ne cesse de décroître, l’expansion économique de la première moitié de l’ère du pétrole ne peut qu’être suivie d’une contraction économique durant sa seconde moitié (C.Campbell, 2015). En effet, comme le montre l’histoire économique, la montée des prix des ressources – en raison de tensions entre l’évolution de l’offre et celle de la demande – se fait nécessairement au détriment de certaines dépenses des ménages et des entreprises et donc de certaines activités et de certains emplois (B. Thévard 2012 ; U.Bardi, 2015). Au total, l’économie mondiale devra donc vraisemblablement fonctionner avec des ressources énergétiques – et plus largement minérales – en recul à l’avenir.

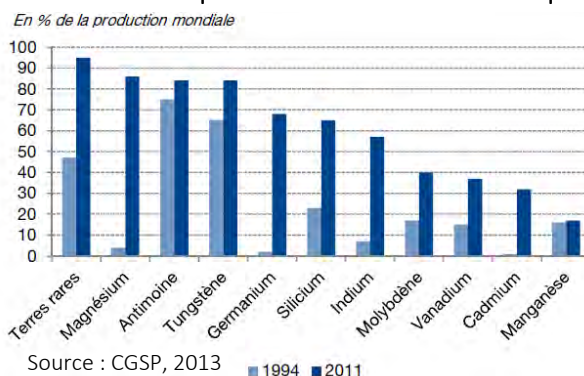
4.2 L’accès aux ressources naturelles mondiales devraient connaître des tensions croissantes

Les réserves d’énergies fossiles et de métaux sont inégalement réparties à travers le monde

Les ressources énergétiques et non énergétiques épuisables sont loin d’être réparties de façon homogène entre les différentes régions du monde, que ce soit en termes de gisements et de capacités de production.

S’agissant des ressources énergétiques fossiles, un rapport de l’IDDRI (D.Demilly et alii, 2013) indique que les réserves de pétroles sont très inégalement réparties à la surface du globe, avec six pays (Venezuela, Arabie Saoudite, Iran, Irak, Koweït et Émirats arabes unis) détenant plus des deux tiers des réserves mondiales. Les réserves mondiales de gaz sont un peu mieux réparties à la surface du globe, mais seuls dix pays se partagent deux tiers des réserves, dont la Russie (24 % des ressources mondiales), l’Iran (16 %) et le Qatar (13,5 %).

Part de la Chine dans la production mondiale de métaux de spécialité



²⁵ Le taux de croissance annuel du PIB/hab de l’Europe entre 1000 et 1819 se situe à 0,14% (A.Maddison, 2001, cité par D.Demilly, 2013).

²⁶ Comme l’explique Juliet Schor (2013), la croissance de la période industrielle apparaît avant tout comme une « croissance extensive », c’est-à-dire reposant sur la mise en œuvre d’une quantité croissante d’énergie et de capital productif.

Concernant les métaux, on constate une production quasi-monopolistique pour un grand nombre d’entre eux, et notamment pour les métaux rares. Par exemple, la mine d’Araxá, au Brésil, produit 80 % du niobium mondial, tandis que celle de Spor Mountain, aux Etats-Unis, assure à elle seule plus de 85 % des 230 tonnes annuelles de béryllium produites dans le monde (A. Ligier, 2016). De même, plus de 85 % des réserves mondiales de lithium se concentrent dans un espace incluant certains territoires du Chili, de l’Argentine et de la Bolivie (J.-C. Guillaneau, 2016). La palme revient cependant à la Chine (voir graphique ci-dessus). Elle est actuellement le premier producteur mondial de près de quarante matières premières minérales (C. Christmann, 2016) et sa part dans la production mondiale de métaux rares est passée de moins de 30% il y a trente ans à 86 % en 2014 (US Geological Survey, Mineral Commodity Summary, 2015²⁷). De fait, très bien pourvue en ressources minérales et ayant fortement développé son industrie minière ces dernières années, la Chine jouera un rôle déterminant dans l’évolution de l’approvisionnement des marchés mondiaux de matières premières (C. Christmann, 2016).

Au total, si on laisse de côté les Etats-Unis, la production mondiale de ressources non renouvelables est en large partie dominée par les pays du sud.

Le phénomène de raréfaction des ressources peut être amplifié par les stratégies de préférence nationale

Un certain nombre d’économies du sud détiennent ainsi d’une part significative des gisements de ressources naturelles non renouvelables. Comme on le sait, l’exportation de matières premières constituent une source de revenus cruciale pour plusieurs d’entre elles. Ces revenus peuvent devenir tellement stratégiques que lorsque les échanges progressent moins vite que prévus ou les prix des ressources baissent sur les marchés mondiaux, certains pays peuvent se retrouver en grande difficulté économique ; on pense par exemple à la situation actuelle du Venezuela.

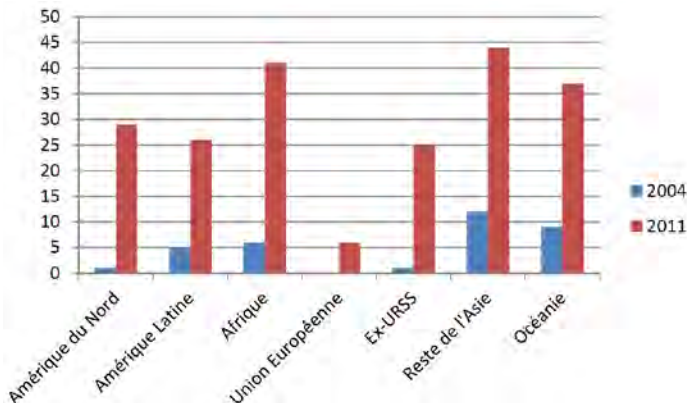
Mais tous les pays producteurs de matières premières ne sont pas dans cette situation de dépendance aux exportations. Certaines économies émergentes disposent non seulement de ressources naturelles importantes, mais également d’une capacité de production industrielle significative et d’un marché intérieur en expansion. Cette situation soulève alors une question clé : à l’avenir ces pays seront-ils toujours en mesure (et enclin) de faire profiter d’autres pays du monde de leurs ressources et biens manufacturés ? Au fur et à mesure de leur développement économique et de la réduction de leurs réserves, ces pays ne seront-ils pas amenés à limiter leurs exportations afin de conserver une part croissante de leur production en vue de satisfaire leur propre consommation ? Les dernières années montrent que ces questions sont loin d’être saugrenues.

Plusieurs institutions internationales constatent que de plus en plus d’économies émergentes adoptent des stratégies industrielles visant à protéger leurs ressources et à créer des situations favorables à leurs industries situées en aval (Commission Européenne, 2008 ; OCDE, 2010...). Parmi ces mesures figurent les taxes et les quotas d’exportation, les subventions, les ententes sur les prix, ainsi que les dispositions restrictives en matière d’investissement étranger. Plus de 450 restrictions à l’exportation concernant plus de 400 matières premières différentes ont été identifiées par la Commission Européenne (2008). La Chine, la Russie, l’Ukraine, l’Argentine, l’Afrique du Sud et l’Inde figurent parmi les principaux pays appliquant de telles mesures. La mise en place par la Chine de quotas d’exportation de terres rares à partir de 2005 et, surtout, de l’embargo total sur les exportations de terres rares à destination du Japon en 2010-2011 constitue un exemple aussi emblématique que médiatisé de ce type de stratégie (A. Rollat, 2014).

²⁷ Cité par F. Valérian, 2016

La montée des investissements étrangers dans les ressources minières

Nombre d’investissements chinois dans des exploitations minières étrangères, 2004-2011



Source : Conseil général de l’économie, 2014

D’autre part, les pays émergents développent des stratégies d’investissement vis-à-vis des pays exportateurs de ressources, dans le but apparent de se ménager un accès privilégié aux matières premières (Commission Européenne, 2008). Par exemple, la Chine et l’Inde ont sensiblement accru leur engagement économique en Afrique au cours des dernières années; dans le cas de la Chine, cette stratégie comporte des projets d’infrastructure majeurs ainsi que la participation active à des projets de prospection et d’extraction dans des pays tels que la Zambie (cuivre), la République démocratique du Congo (cuivre, cobalt), l’Afrique du Sud (minerai de fer), le Zimbabwe (platine) ainsi que le Gabon, la Guinée équatoriale et le Cameroun (bois).

Au total, on se dirige vers une situation où les pays occidentaux seraient de plus en plus pris en tenaille entre un recul plus rapide que prévu du volume des ressources disponibles sur les marchés mondiaux et une compétition croissante entre pays importateurs pour se les procurer (B.Durand, 2013). Parce qu’elle soulève un risque d’escalade dans la montée des prix mais aussi celui d’une rupture ponctuelle ou durable d’approvisionnement (CGSP, 2013), cette situation augure à l’évidence de tensions géopolitiques accrues.

4.3 Les failles de l’économie globalisée : hyperspécialisation et hypercomplexité

La raréfaction des ressources tend à exacerber les risques d’une économie hyper-globalisée

Plusieurs observateurs attirent l’attention sur le fait que ces tensions croissantes dans l’accès aux matières premières ne peuvent qu’accentuer les risques liés à l’approfondissement de la mondialisation économique auquel on assiste ces dernières décennies. Comme on le sait, les économies nationales et les territoires qui les composent sont de plus en plus étroitement interconnectés à l’échelle mondiale du fait de la mise en place de chaînes de valeur internationales : on entend par là un processus de fragmentation du processus de production en un grand nombre de tâches effectuées dans des pays distincts pour tirer le meilleur parti des avantages comparatifs des différents lieux de production. Ce renforcement de la division internationale du travail, en favorisant les économies d’échelles, les spécialisations économiques et un fonctionnement en flux tendus d’envergure mondiale peut apparaître comme l’étape ultime de la recherche d’efficacité des sociétés humaines. Toutefois, cette évolution s’est faite au prix d’une amplification inédite des interdépendances et de la complexité au sein du système économique. Or, dans un contexte de pénuries croissantes de ressources, un tel système soulève des risques de dysfonctionnement majeurs (P.Bihouix, 2014 ; P.Servigne et R.Stevens, 2015). Pour deux raisons en particulier.

Les chaînes de valeur mondiales favorisent la propagation des chocs

Les récentes perturbations à grande échelle, telles que l’éruption volcanique en Islande de 2010, le tsunami au Japon et les inondations en Thaïlande en 2011, ont exposé la fragilité des chaînes d’approvisionnement. Un choc inattendu dans un pays qui transforme des produits utilisés dans les usines des économies en aval de la chaîne peut avoir de graves conséquences négatives (Hoekman, 2013). En d’autres termes, avec la segmentation/dispersion de leurs processus de production à l’échelle mondiale, les entreprises multinationales constituent un vecteur de choix pour la propagation

internationale des chocs économiques (F.Toubal, 2013). Ce faisant les économies nationales sont devenues plus vulnérables face aux risques « systémiques » : des chocs ayant leur origine dans une partie du système économique pouvant rapidement se transmettre à l’ensemble de la planète par le biais des chaînes de valeur mondiales (M.Durand, 2013). Une des explications de cette fragilité croissante réside dans l’hyperspécialisation des territoires sur leurs avantages comparatifs. Parce les différents maillons du système économique se concentrent à l’échelle mondiale en certains lieux, de façon non redondantes, chacun d’eux tend à devenir un organe vital pour l’ensemble de l’économie (P.Servigne et R.Stevens, 2015) : tous les secteurs et toutes les régions participant de l’économie globale dépendent de plus en plus de ce qui se passe dans de nombreux autres endroits de la planète. En résumé, cette perte de diversité fragilise le système global – la disparition des alternatives les moins efficaces nuit à la robustesse et à la capacité d’adaptation de l’ensemble (P.Servignen, 2011 ; B.Thévard, 2014) – mais aussi de chaque territoire – la focalisation de leurs savoir-faire et capitaux productifs sur des segments d’activité étroits ne permet pas de palier rapidement les éventuelles ruptures d’approvisionnement.

La complexité croissante des sociétés repose sur une consommation tout accrue de ressources

D’autre part, la tendance à la complexification du fonctionnement de l’économie mondiale pose problème. Elle induit en effet une augmentation des risques de dysfonctionnement. Des travaux en science des systèmes montrent qu’au-delà d’un certain niveau de complexité, les outils sur lesquels reposent le pilotage du système ne sont plus assez puissants pour comprendre et prévoir son fonctionnement et il devient impossible de les maîtriser totalement (D.Helbing, 2013²⁸). De plus, la complexité croissante du système économique entre en contradiction avec la baisse du taux de retour énergétique. Comme l’explique l’anthropologue et historien américain Joseph Tainter dans un ouvrage de référence consacré à l’étude de l’effondrement des civilisations anciennes (telles que l’Empire Romain), les sociétés tendent à se diriger vers des niveaux plus élevés de complexité²⁹ au fur et à mesure qu’elles essaient de résoudre les problèmes qu’elles rencontrent. Or, cet approfondissement de la complexité implique d’investir toujours plus d’énergie par habitant. Il vient donc buter tôt ou tard sur les rendements décroissants de la production des ressources primaires. Le rapport coût/bénéfice de la complexité devient de plus en plus défavorable, ce qui rend inévitable une baisse du niveau de complexité (simplification) de la société. Laquelle se traduit notamment par un accroissement de l’autonomie de ses différentes composantes. Appliquée à l’économie mondiale contemporaine, cette approche amène à souligner le fait que le développement des chaînes de valeur globales depuis le début du 21^{ème} siècle coïncide avec une nouvelle accélération de la consommation mondiale de ressources naturelles, et que la perspective d’une réduction de l’énergie disponible paraît incompatible avec le maintien à long terme d’un tel système économique globalisé, au moins en ce qui concerne les flux physiques.

En bref, les opportunités offertes par une intégration toujours plus poussée des territoires au sein du système économique mondial tendent à être contrebalancées par des risques de dysfonctionnements majeurs de plus en plus élevés, qui seront exacerbés par la raréfaction croissante de certaines ressources non renouvelables.

²⁸ Cité par P.Servigne et R.Stevens, 2015

²⁹ Diversification et spécialisation des rôles sociaux, économiques et politiques, développement des infrastructures et du contrôle sociopolitique, accroissement de l’économie des services...

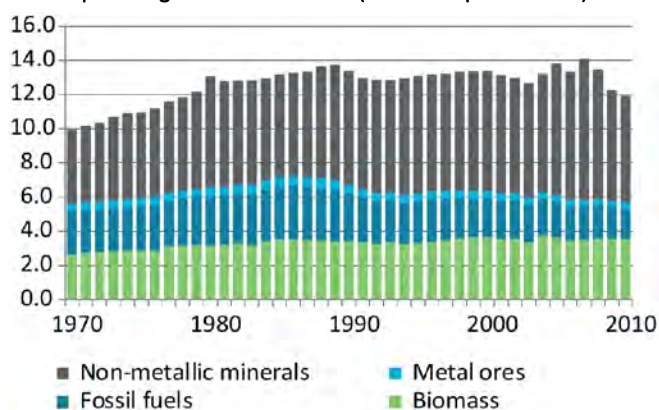
4.4 L'Europe apparaît particulièrement vulnérable face aux tensions sur l'accès aux ressources naturelles

Le fait que les matières premières ne puissent être produites n'importe où mais qu'en même temps elles se situent en amont de tout le processus productif soulève pour les États des problèmes de sécurité d'approvisionnement (P.-N. Giraud et T. Ollivier, 2015). A cet égard, l'Europe apparaît comme une région particulièrement concernée par la problématique de l'accès aux ressources naturelles.

L'Europe est fortement dépendante des ressources du reste du monde

La dépendance de l'Europe à l'égard des autres régions du monde résulte de la conjonction de deux phénomènes : elle a peu de ressources, mais en consomme beaucoup. Ceci conduit à faire de l'Europe le premier importateur mondial de ressources naturelles.

Extraction annuelle domestique de l'Europe de 1970 à 2010 par catégories de ressources (en tonnes par habitant)



Source : IRP/UNEP, 2016

L'extraction européenne est en recul

Ne détenant qu'une faible part des réserves mondiales d'énergies fossiles et de minerais métalliques, l'Europe voit sa production reculer pour ces deux catégories de ressources depuis plusieurs décennies (voir graphique ci-dessous). Le dernier rapport de l'International Resource Panel³⁰ indique également que la part de l'Europe dans l'extraction mondiale de ressources est passée de 20,9 à 10,5% entre 1970 et 2010 (IRP/UNEP, 2016).

L'Europe et l'Amérique du Nord présente une empreinte matérielle nettement supérieure aux autres régions du monde

D'autre part, l'Europe présente une empreinte matérielle par habitant (voir présentation de l'indicateur d'empreinte matérielle ci-dessous) nettement supérieure autres régions

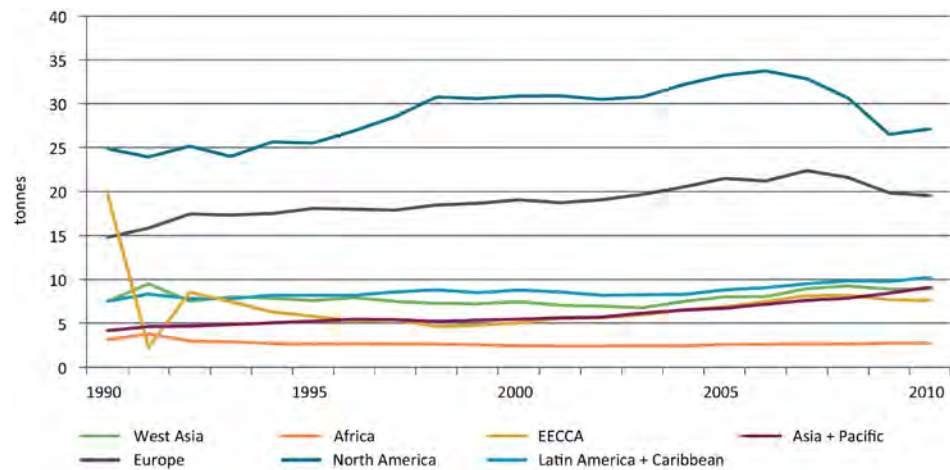
du monde, à l'exception de l'Amérique du Nord (voir graphique ci-dessous). Le rapport de l'IRP indique également que l'empreinte matérielle européenne a connu une croissance constante jusqu'à la crise de 2008.

L'indicateur d'empreinte matérielle/material footprint (IRP/UNEP, 2016)

Pour la première fois, le dernier rapport établi par l'IRP intègre un indicateur d'empreinte matérielle (« material footprint »). Celui-ci vise à attribuer l'extraction mondiale de ressources naturelles à chaque pays en fonction de sa consommation finale. Ceci implique de prendre en compte l'extraction domestique de chaque pays ainsi que le volume physique de ses flux d'importation et d'exportation de produits (on parle de « balance commerciale physique »). Comme le souligne le rapport, il est également essentiel de prendre en compte les « flux cachés » liés ces flux d'importations/exportations : il s'agit des matières mobilisées (biomasse, métaux, minéraux, combustibles fossiles, etc.) lors de l'extraction, la fabrication, le conditionnement et le transport des produits des produits tout au long de leur chaîne de valeur, et qui ne sont pas comptabilisées dans le volume de ces produits tel que mesuré lorsqu'ils traversent la frontière. En ajoutant ces flux cachés, on obtient ce que l'on appelle les « équivalents matières premières » des importations et des exportations (« raw material equivalent »/RME). Au total, l'indicateur d'empreinte matérielle est calculé de la façon suivante : extraction domestique + équivalent matières premières des importations – équivalents matières premières des exportations.

³⁰ Lancé en 2007 par Programme des Nations Unies pour l'environnement (United Nations Environment Programme/UNEP), l'International Resource Panel (IRP), à l'instar du GIEC, réunit des scientifiques de haut niveau et vise produire une série de rapports synthétisant les dernières avancées scientifiques, techniques et socio-économiques concernant la gestion durable des ressources naturelles.

Empreinte matérielle annuelle des différentes régions du monde de 1990 à 2010
(en tonnes par habitant)

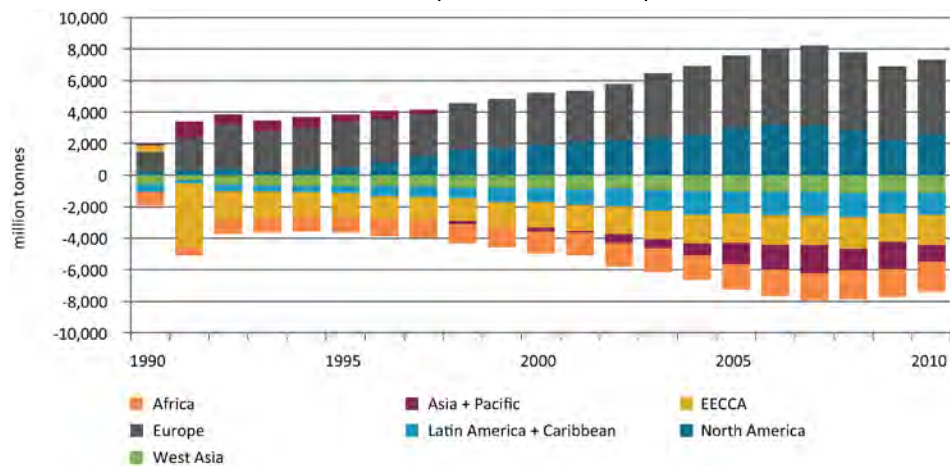


Source : IRP/UNEP, 2016

L'Europe est le premier importateur mondial de ressources naturelles

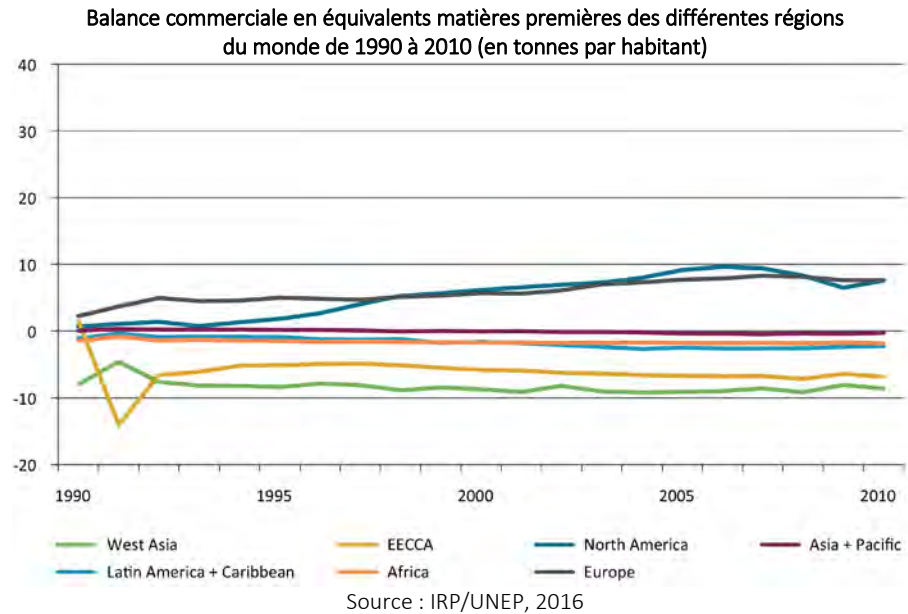
De fait, l'Europe constitue un importateur de ressources naturelles de premier plan à l'échelle mondiale. Le dernier rapport de l'IRP se penche en effet sur la balance physique des échanges de matières premières entre les grandes régions du monde. Concrètement, il s'agit de soustraire au volume des importations de chaque région le volume des exportations à destination des autres régions, tout en prenant en compte les « équivalents matières premières » des flux d'importations et d'exportations (voir présentation de l'indicateur d'empreinte matérielle ci-dessus). Un pays présentant une balance positive signifie qu'il importe davantage de ressources qu'il n'en exporte : il est un importateur net. De ce point de vue, les graphiques ci-dessous montrent que l'Europe est le premier importateur net de ressources dans le monde – que l'on raisonne en valeur absolue ou par habitant – et que l'empreinte matérielle européenne continue d'augmenter (IRP/UNEP, 2016).

Balance commerciale en équivalents matières premières des différentes régions du monde de 1990 à 2010 (en millions de tonnes)



Source : IRP/UNEP, 2016

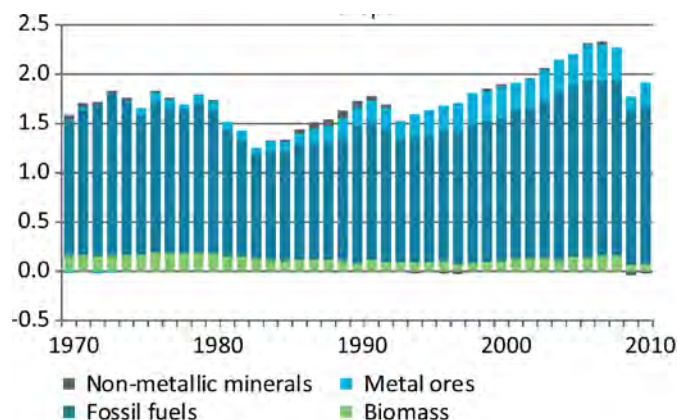
Un autre enseignement marquant du graphique ci-dessous est que, dès lors que l'on intègre les flux cachés liés aux importations et exportations, l'Asie n'apparaît plus comme un importateur net de matières premières majeur mais se révèle être exportateur net ; ce qui illustre le fait qu'une large part de la production asiatique est destinée in fine aux marchés occidentaux.



L'Europe est fortement dépendante des importations de combustibles fossiles et de métaux

Enfin, si on laisse de côté les flux cachés liés aux échanges économiques, et que l'on revient à leur volume physique lors du passage de la frontière, l'Europe apparaît ici aussi comme le premier importateur net mondial de matières. On observe aussi que les importations nettes de l'Europe ont connues une croissance vigoureuse tout au long des années 1990 jusqu'à la crise de 2008, et qu'elles se composent en quasi-totalité d'énergies fossiles et de minerais métalliques (voir graphique ci-dessous). Comme le montrent par ailleurs les statistiques d'Eurostat, la dépendance aux importations – part de la consommation intérieure couverte par les importations – ne cesse d'augmenter pour ces deux catégories de ressources et atteint, en 2014, 87% pour les produits pétroliers, 67% pour le gaz, 46% pour le charbon, 52% pour l'ensemble des métaux (le taux de dépendance pouvant atteindre des niveaux beaucoup plus élevés pour certains métaux).

Balance commerciale physique de l'Europe de 1970 à 2010 (en tonnes par habitant)



L'économie européenne est menacée par un accès de plus en plus contraint aux ressources naturelles

Cette situation de dépendance aux ressources du reste du monde constitue un enjeu de taille pour l'avenir de l'économie européenne. L'exposition aux risques de montée des prix et de pénurie concerne tout particulièrement l'industrie qui transforme l'essentiel

des ressources naturelles consommées par l’économie européenne. Rappelons par exemple qu’en France l’industrie représente en 2014 95% des consommations intermédiaires de produits issus de l’industrie extractive (charbon, gaz, pétrole, uranium, minerais métalliques, minéraux, etc.), 75% des produits issus des industries de réseau (électricité, gaz, vapeur, etc.), 67% des consommations intermédiaires de produits issus de l’agriculture-sylviculture-pêche et 30% des produits issus de la cokéfaction et du raffinage³¹ (Insee, tableaux entrées-sorties de la comptabilité nationale). Dans un contexte de concurrence mondialisée, les questions de coût et de disponibilité des matières premières et de l’énergie peuvent constituer des dimensions clé de la compétitivité pour des pans entiers de l’industrie. Du reste, la maîtrise de l’accès aux ressources naturelles constitue d’ores et déjà une dimension majeure de la stratégie industrielle de la Chine (J. Ruet, 2016), mais aussi du Japon et de la Corée du Sud (...).

Sur le volet énergie, l’Ademe souligne que la facture énergétique de l’industrie française a augmenté de plus de 11% entre 2005 et 2013 alors même que sa consommation a reculé de 18% sur la période (Ademe, 2015). Hervé Bourrier, directeur général d’Arcelor-Mittal France s’inquiète quant à lui de la pérennité des industries énérgo-intensives (chimie ; papier et carton ; caoutchouc et plastique ; agroalimentaire ; métallurgie, etc.) en France en raison des écarts de prix de l’énergie entre l’Europe et d’autres régions du monde (H. Bourrier, 2015). Il constate notamment que si les prix du gaz naturel étaient au même niveau des deux côtés de l’Atlantique en 2003, ils sont 3 fois plus élevés en Europe en 2013 en raison de l’irruption des gaz de schiste. De même pour l’électricité, alors que les prix étaient 40 % plus élevés en Europe en 2003, ils sont 120 % plus élevés en 2013. Ce différentiel de compétitivité coût pourrait entraîner selon lui recul significatif de la part de marché de l’Europe dans les industries énérgo-intensives à court-moyen termes.

D’autre part, force est de constater que les métaux rares sont utilisés en particulier sur des marchés en pleine croissance comme ceux liés aux objets numériques ou à la transition énergétique (F. Valérian, 2016). Dès lors, comment garder pied sur de tels marchés de hautes technologies si l’on éprouve de plus grandes difficultés que les concurrents pour accéder aux matières premières qu’ils requièrent ? De plus, si la transition énergétique peut apparaître comme un levier permettant de réduire la dépendance européenne en matière d’énergies fossiles, ne conduit-elle pas par ailleurs à attiser une autre dépendance à l’égard des métaux rares ? Ces questions, posées récemment par l’Office parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques, ont conduit celui-ci à établir une synthèse des études de criticité des métaux (criticité évaluée à l’aune de leur importance économique et du risque d’approvisionnement) réalisées par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, la Commission Européenne, et l’United States Geological Survey (voir tableau page suivante).

Dans une période marquée des deux côtés de l’Atlantique par une préoccupation politique croissante pour le phénomène de désindustrialisation, les questions de sécurisation des approvisionnements, d’efficacité énergétique et matérielle et d’innovation deviennent des enjeux de première importance pour les politiques industrielles.

³¹ Soulignons également la forte exposition du secteur du transport dont les consommations énergétiques dépendent à plus de 90% des énergies fossiles et représentent 30% des consommations intermédiaires de produits issus du raffinage en France.

L’empreinte matérielle de l’économie : quels enjeux de compétitivité et de résilience ?

Tableau récapitulatif des métaux stratégiques (hors terres rares)				
Élément	Usages principaux (Europe sauf mention contraire)	Consommation mondiale	Principaux producteurs (monde)	Commentaires
Antimoine	Retardateur de flamme (43 %) Batteries plomb-acide (32 %)	150 000 t/an En hausse lente du fait de la demande chinoise (2-3 % par an)	Chine : 86 % Les statistiques sont rares et imprécises.	Toxique, d’où une tendance à la substitution en Europe
Béryllium	Télécoms et électronique (64 %) Industrie aérospatiale (16 %) Nucléaire civil et militaire (secteur stratégique)	320 t/an Stable (croissance < 3% par an)	États-Unis (90 %), notamment gisement de SporMountain (85 %, BRGM 2009)	Très toxique Marché de niche : peu de producteurs, beaucoup de ressources non exploitées
Borates	Verres et céramiques (65 %) Agriculture (engrais) (13 %)	Production mondiale : 3 720 000 t/an (USGS 2014) En hausse : croissance estimée à 3-4 % par an	Turquie (41 %) États-Unis (32 %)	Le métal bore est peu utilisé ; l’unité de base pour les échanges est le contenu en oxyde de bore B ₂ O ₃ . Pas de tensions prévues.
Chrome	Acier (presque 100 %, notamment pour les aciers inoxydables) Superalloys (secteur stratégique)	Production mondiale : 29 000 000 t/an (USGS 2014) En hausse : croissance estimée à 3-4 % par an	Afrique du Sud (43 %) Kazakhstan (20 %)	La substitution est impossible. Pas de tensions prévues.
Cobalt	Batteries (30 %) Superalloys (19 %)	73 000 t/an (2012) En forte hausse, croissance estimée à 5-6 % par an	Extraction minière Congo (55 %) Raffinage Chine (42 %) Finlande (12 %) (BRGM 2013)	Production française significative en Nouvelle-Calédonie (4 %). Difficilement substituable, et la demande croît.
Fluorine	Acide fluorhydrique (52 %) Métallurgie de l’acier et de l’aluminium (43 %) (monde)	Production mondiale : 6 850 000 t/an (USGS 2014) Stable (croissance < 3% par an)	Chine (56 %) Mexique (18 %)	La substitution semble possible pour la plupart des applications.
Gallium	Circuits intégrés (41 %) LED (25 %) Panneaux photovoltaïques (17 %) (monde)	100 t/an Très forte hausse (>8 % par an), mais difficile à quantifier précisément car dépend beaucoup de nouvelles technologies. (Estimation Fraunhofer Institute reprise par le BRGM, étude Roskill reprise par la Commission européenne)	Chine (69 %) Allemagne (10 %) Les statistiques sont imprécises.	Métallurgie de pointe (pureté de 99 9999 % nécessaire pour certaines applications). Sous-produit de la bauxite (minerai exploité pour l’aluminium)
Germanium	Fibre optique (30 %) Catalyse du PET (plastique) (25 %) Optique infrarouge (25 %) (monde)	110 t/an (2009) En hausse modérée (4-5 % par an) mais une percée technologique est possible.	Chine (59 %) La production est excédentaire (d’où de bas prix).	Métallurgie de pointe, enjeux similaires à ceux du gallium
Graphite naturel	Industrie lourde (aciéries, fonderies...) (41 %) (monde)	1 000 000 t/an (BRGM 2011) En hausse : croissance estimée à 3-4 % par an Les statistiques sont très imprécises.	Chine (69 %)	Utilisé dans les réfractaires (matériaux résistants à la chaleur) : revêtements de four, conduits de matière en fusion... Les gisements chinois se raréfient.
Indium	Oxyde d’indium-étain, notamment écrans LCD (56 %) (monde)	Production mondiale : 820 t/an (USGS 2014) Stable (croissance < 3% par an)	Chine (58 %)	L’oxyde d’indium-étain (ITO) est à la fois conducteur électrique et transparent. Sous-produit des mines de zinc.

Source : Sénat, 2016

Tableau récapitulatif des métaux stratégiques (hors terres rares)				
Élément	Usages principaux (Europe sauf mention contraire)	Consommation mondiale	Principaux producteurs (monde)	Commentaires
Lithium	Verres et céramiques (30 %) Accumulateurs et piles au lithium (22 %, en hausse)	30 000 t/an (BRGM 2011) Très forte hausse : croissance estimée à 7-9 % par an, surtout à cause des batteries	Chili (32 %) Australie (28 %) (calcul sur données BRGM 2011)	Juste en-dessous du seuil de criticité pour la Commission européenne. Les possibilités de recyclage des batteries semblent encourageantes.
Magnésite	Matériaux réfractaires (83 %)	24 800 000 t/an (USGS 2013) Stable (croissance < 3% par an)	Chine (69 %)	La substitution semble difficile.
Magnésium	Alliages d’aluminium (40 %) Moulages (39 %)	771 000 t/an (USGS 2013, sans la production américaine)	Chine (86 %)	Les capacités de production sont bien supérieures aux besoins actuels (utilisation à 60 %)
Métaux platinoides (ruthénium, rhodium, palladium, osmium, iridium, platine)	Catalyseurs (55 %) notamment pots catalytiques Bijouterie (17 %) (monde)	600 t/an (platine + palladium + rhodium) En hausse modérée (4-5 % par an). Des voitures électriques ou à l’hydrogène pourraient diminuer la demande de pots catalytiques à long terme.	Afrique du Sud (61 %) Russie (27 %)	Le platine et le palladium sont les moins rares. Les platinoides ont des propriétés similaires. Pas de substitution possible à ce jour, sauf entre platinoides pour certaines applications.
Molybdène	Aciers alliés (80 %) Catalyseurs (14 %) (monde)	218 000 t/an Hausse prévisible entre 3 et 6 % par an mais l’offre augmentera plus vite du fait de la mise en exploitation de gisements nouveaux.	Chine (40 %) États-Unis (27 %) Chili (11 %) Statistiques imprécises, notamment en ce qui concerne la Chine.	Substitution difficile, même si d’autres éléments d’alliage peuvent être utilisés.
Niobium	Aciers alliés et micro-alliés (High Strength Low Alloy Steels) (88 %) dont : construction (31 %) automobile (28 %) oléoducs et gazoducs (24 %)	130 000 t/an Très forte hausse : croissance estimée à 8 % par an (demande globale d’acier en hausse, et proportion d’acier HSLA en hausse)	Brésil (92 %) Canada (7 %)	La production est très concentrée. La société CBBM détient les gros projets au Brésil.
Rhénium	Superalloys (78 %), notamment turbines pour l’aéronautique Catalyseurs (14 %)	53 t/an (2009) L’évolution dépendra principalement du dynamisme du secteur de l’aéronautique, donc notamment du prix des hydrocarbures.	Chili (47 %) États-Unis (20 %) (2009)	La demande est très liée au secteur du transport aérien (chutes de l’offre après les attentats de 2001 ou la crise de 2008). L’aviation militaire, secteur stratégique, consomme également du rhénium.
Sélénium	Coloration des verres (35 %) Métallurgie (25 %) Agriculture (15 %) Photovoltaïque, photodétection (10 %)	2500 t/an Les applications photovoltaïques (CIS, CIGS) pourraient entraîner une forte hausse de la consommation.	Chili (26 %) Estimations approximatives du fait de la non-publication des données américaines, calcul sur données BRGM (2009)	Sous-produit de l’extraction du cuivre (ou nickel). Les estimations sont faites à partir de la localisation, connue, des ressources en cuivre.
Silicium	Chimie (54 %) Alliages d’aluminium (38 %) Photovoltaïque (8 %)	2 200 000 t/an Les estimations varient, mais la croissance devrait être inférieure à 3 % par an	Chine (56 %)	La Commission enquête sur un éventuel dumping chinois en matière de panneaux solaires. Des taxes punitives à l’importation ont été mises en place.
Tantale	Condensateurs miniaturisés (48 %) Superalloys (16 %)	1 500 t/an En hausse moyenne à forte selon les estimations (3 à 5,5 % par an)	Rwanda (50 %) Congo (17 %) (USGS 2014) Il s’agit là d’estimations, une grande partie de la production étant artisanale et donc non déclarée.	L’exploitation artisanale facile du tantale encourage l’instabilité politique dans la région des Grands Lacs africains. Des restrictions à l’importation sont mises en place aux États-Unis (loi Dodd-Frank de 2010) pour éviter de financer la guerre civile en République Démocratique du Congo.
Tellure	Aciers (35 %) Photorécepteurs (35 %) Catalyse (20 %) (États-Unis 2009)	220 t/an (estimation)	États-Unis (29 %) Japon (23 %) Estimations très approximatives du fait de la non-publication des données américaines, calcul sur données BRGM (2010)	Semblable au sélénium : c’est un sous-produit de l’exploitation minière du cuivre, qui n’est pas déclaré, et les estimations sont faites à partir des informations relatives au cuivre.
Tungstène	Métal « widia » (outils pour usiner l’acier) (60 %) Aciers alliés (13 %)	95 000 t/an En hausse modérée (4,5 % par an). De nouveaux projets miniers devraient permettre de garder l’équilibre offre-demande.	Chine (85 %)	Le recyclage va sans doute prendre de l’ampleur du fait des prix élevés.

Au-delà des enjeux de compétitivité, quelle résilience de l’économie européenne pour satisfaire durablement les besoins domestiques ?

A plus long terme, la forte dépendance de l’Europe à l’égard des ressources des pays du Sud, la raréfaction de certaines ressources et les tensions croissantes sur les marchés mondiaux semblent questionner de façon plus fondamentale l’avenir économique de l’Europe. Jusqu’ici, la colonisation³² puis le principe de libre-échange – selon lequel les ressources de tout pays appartiennent au plus offrant (C.Campbell, 2015) – ont permis à l’Europe s’adjuger une part des ressources naturelles mondiales bien supérieure à son poids démographique. Mais la dynamique soutenue de rattrapage économique que connaissent un certain nombre de pays du Sud sur la dernière période tend à relativiser la taille du marché européen et pourrait affaiblir le pouvoir de négociation de l’Europe face aux pays exportateurs de ressources. En bref, tabler sur le fait que l’Europe continuera à s’adjuger la même part des ressources mondiales à l’avenir constitue un pari de plus en plus audacieux.

Le sens de l’histoire ne conduit-il pas plutôt à envisager un avenir dans lequel les pays européens devront s’accommoder d’une part réduite d’un gâteau lui-même rétréci ? En d’autres termes, dans le monde qui vient, l’Europe peut-elle continuer à s’en remettre aussi massivement aux ressources et capacité de production du reste du monde pour satisfaire ses besoins matériels ? Au vu des analyses présentées tout au long de cette note, on comprend que les enjeux vont au-delà des interrogations sur l’évolution de la compétitivité européenne. A terme, c’est bien la question de la capacité à satisfaire durablement, au plan quantitatif comme qualitatif, les besoins domestiques qui semble devoir être posée. Les réponses à apporter paraissent d’autant plus cruciales que les stratégies de spécialisation économiques promues ces dernières décennies pour faire face à la compétition mondiale ont eu plutôt tendance à réduire l’éventail de production de chaque pays.

³² Plusieurs travaux rappellent que l’expansion industrielle des pays du Nord s’est faite au prix d’une exploitation acharnée des ressources des territoires du Sud dans le cadre de la colonisation (C.Bonneuil et J.-B. Fressoz, 2013 ; U.Bardi, 2015).

7. La métropole lyonnaise face à l'enjeu des ressources naturelles

Plusieurs raisons laissent à penser que les enjeux de compétitivité et de résilience soulevés par l'empreinte matérielle de l'économie européenne concernent directement la métropole lyonnaise. Tout d'abord, cette dernière peut-elle rester à l'écart de la mobilisation des principales institutions internationales observée ces dernières années ? Ensuite, la France, et donc la métropole lyonnaise, n'échappent pas à la situation de vulnérabilité observée à l'échelle de l'Europe. D'autre part, parce qu'elles constituent les principaux lieux de consommation des ressources naturelles, les métropoles ont sans doute une responsabilité particulière à assumer dans la maîtrise des pressions environnementales exercées par les activités humaines. Enfin, on peut considérer que l'enjeu des ressources naturelles constitue une dimension incontournable du devenir du tissu industriel de la métropole lyonnaise.

7.1 Une mobilisation des institutions internationales



Les années 2000 ont été marquées par la prise de conscience en Europe des risques soulevés par la raréfaction croissante des énergies fossiles et des métaux ainsi que par la concentration de ces ressources dans un nombre limité de pays. En 2008, les Etats membres adoptent le Paquet énergie climat et l'objectif des « 3x20³³ », puis la stratégie « Énergie 2020 » pour « une énergie compétitive, durable et sûre » en 2010. Du côté des matières minérales, on peut signaler l'adoption en 2008 de l'initiative sur les matières premières, et en 2010 de la feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources. Au-delà de l'Europe, il convient de signaler également la mise en place en 2007 du Panel international des ressources (International Resource Panel) à l'initiative du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) avec pour mission de fournir des évaluations scientifiques indépendantes et faisant autorité sur l'utilisation durable des ressources naturelles.

7.2 La France paraît tout aussi vulnérable que l'ensemble de l'Europe

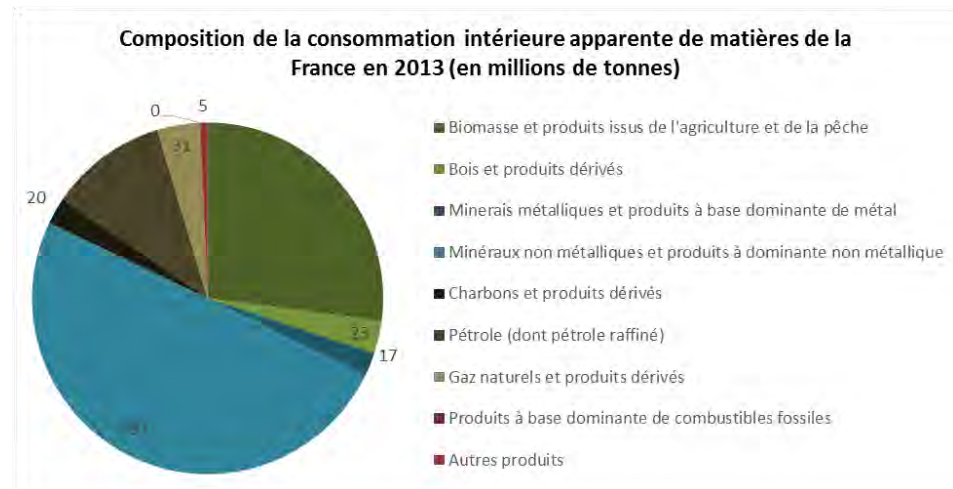
Depuis la crise, la consommation de matières de la France s'est stabilisée autour de 790 millions de tonnes par an

Les comptes macroéconomiques de flux de matières enregistrent en masse l'ensemble des flux matériels (en dehors de l'eau) qui alimentent l'économie nationale (extraction intérieure ou importations de matières premières, importations de biens manufacturés) et l'ensemble de ceux qui en sortent (exportations de matières premières ou de biens manufacturés). Principal indicateur utilisé par le Commissariat Général au Développement Durable pour suivre les flux de matières consommés par l'économie nationale, la « consommation intérieure apparente de matières » (ou « Domestic Material Consumption » - DMC en anglais) est égale à la somme des quantités de matières premières extraites du territoire national et des quantités de matières et de produits importés, à laquelle est soustrait la quantité de matières et produits exportés. Ces flux ne prennent donc pas en compte les « flux cachés » (voir plus haut empreinte matérielle de l'Europe).

Selon le Commissariat Général au Développement Durable, environ 784 Mt de matières ont été consommées par la France en 2013 (CGDD, 2016). Comme l'indique le graphique ci-dessous, la moitié est constituée des minéraux, utilisés principalement dans la construction. Plus du quart est composé de la biomasse issue de l'agriculture et de la

³³ Il s'agit d'atteindre à l'horizon 2020 : 20 % d'efficacité énergétique en plus, 20 % d'émission de gaz à effet de serre en moins, 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'Union européenne.

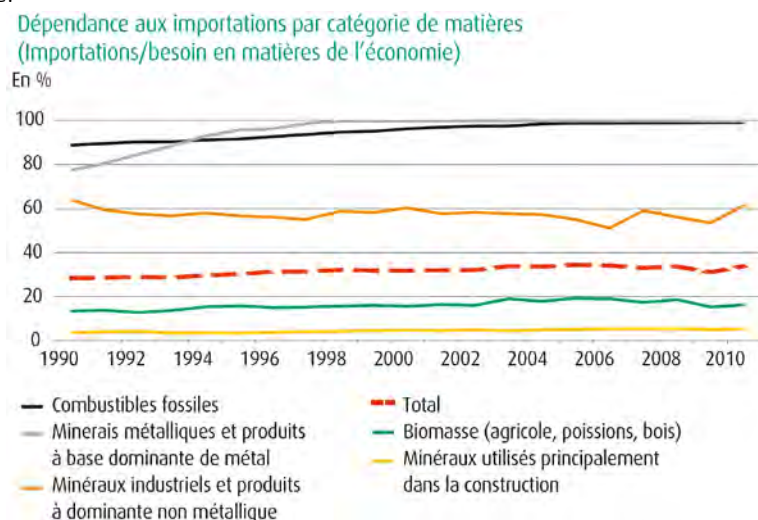
pêche. La consommation intérieure apparente de combustibles fossiles, dont près des deux tiers sont des produits pétroliers, représente environ 17 % du total.



Source : CGDD, 2016

La dépendance de la France aux importations est quasi-totale pour les combustibles fossiles et les minerais métalliques

Si l'on prend en compte l'ensemble des matières qui entrent physiquement dans l'économie française, c'est-à-dire même celles qui sont utilisées *in fine* pour les exportations, le besoin total de matières de la France s'élève en 2013 à 977 Mt (CGDD, 2016). Près des 2/3 de ce besoin est satisfait par des matières extraites du territoire national. Mais cette part tend à reculer, au profit des importations. Ces dernières s'avèrent particulièrement cruciales pour satisfaire la consommation de combustibles fossiles et minerais métalliques. La dépendance extérieure de la France apparaît ainsi plus élevée que celle relevée à l'échelle de l'Europe. Les importations jouent également un rôle important pour les minéraux industriels³⁴. Exprimées en euro, les importations de combustibles fossiles (bruts raffinés) s'élèvent à près de 74 milliards d'euros et représentent 11% de l'ensemble des importations françaises en 2014 (Insee, comptes nationaux). De fait, la France n'échappe à la situation de vulnérabilité du reste de l'Europe.



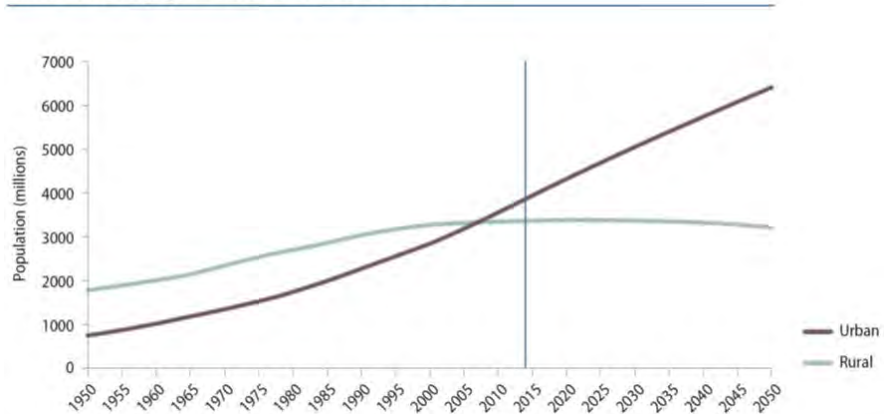
Source : CGDD, 2013

³⁴ Il s'agit de roches naturelles – telles que les argiles, la silice, le kaolin, le quartz, le talc, le mica, le feldspath, l'andalousite et le sel – entrant dans les procédés de fabrication ou dans la composition de produits de consommation courante (plastiques, papiers, peintures, céramiques, automobile, cosmétique, pharmacie, agroalimentaire...) en raison de leurs propriétés physiques et chimiques spécifiques.

7.3 Une large partie des consommations mondiales de ressources naturelles se concentre dans les métropoles

Parce qu'elles concentrent une part croissante de la population mondiale, les métropoles constituent les principaux pôles de consommation des ressources extraites dans l'environnement. Elles sont en première ligne face à la problématique des ressources et chacune d'elles est appelée à prendre ses responsabilités pour apporter des réponses durables pour satisfaire les besoins de leurs habitants et de leur économie. Dès lors, on peut faire l'hypothèse que le monde de demain sera plus difficile pour les métropoles qui n'auront pas anticipé les conditions de leur résilience matérielle.

Urban and rural population of the world, 1950–2050



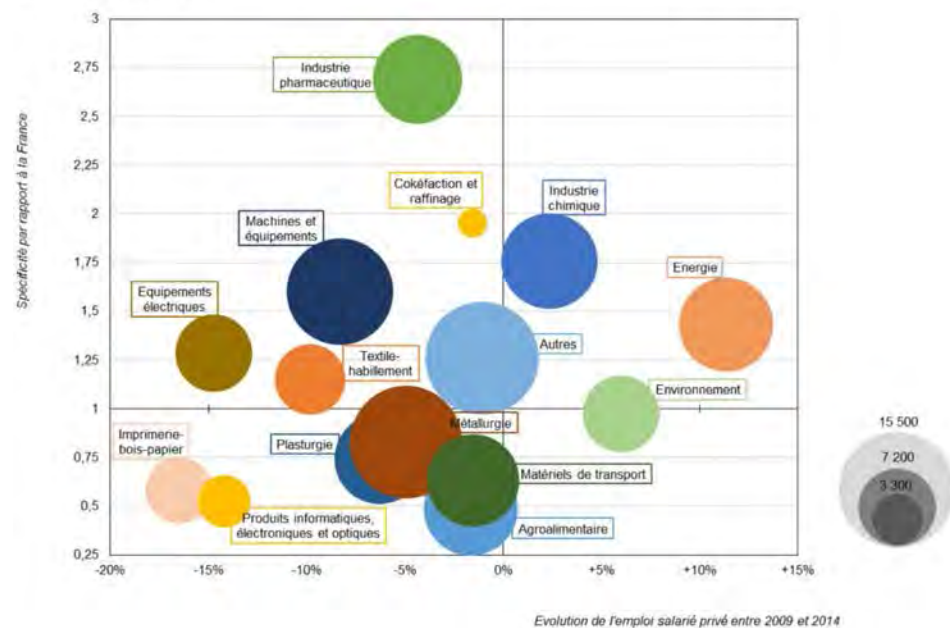
Source : ONU, 2014

7.4 La métropole lyonnaise se caractérise dans le paysage français par l'importance de son tissu industriel

Enfin, comme le soulignait encore récemment une étude de l'Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine de Lyon (2016), l'industrie demeure un moteur essentiel pour l'économie lyonnaise. Or, plusieurs de ses filières majeures paraissent directement exposées aux risques d'approvisionnement évoqués plus haut : chimie, raffinage, métallurgie, matériel de transport, etc.

Poids de l'emploi salarié privé, évolution 2009-2014 et spécificité des secteurs industriels dans l'aire urbaine de Lyon

Source : Acoiss-Urssaf 2009-2014



Source : Agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine de Lyon, 2016

Ressources documentaires

- Agence internationale de l’énergie – Word Energy Outlook 2010
- Agence d’urbanisme de l’aire métropolitaine lyonnaise – Mutations et nouveaux moteurs de l’économie lyonnaise – 2016
- Arnsperger Christian, Bourg Dominique – « Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d’un indicateur de circularité » - in Revue de l’OFCE 1/2016, n°145
- Auzanneau Matthieu – 2015 risque d’être l’année du pic pétrolier et des limites physiques de la croissance – Le Monde, blog Oil Man, 11 février 2016
- Auzanneau Matthieu – Liberté, Egalité, Responsabilité. Où en sommes-nous ? – Le Monde, blog Oil Man, 15 juillet 2016
- Bardi Ugo – Le grand pillage. Comment nous épuisons les ressources de la planète – Les petits matins, Institut Veblen, 2015
- Berman Art – The Crude Oil Export Ban--What, Me Worry About Peak Oil? – Forbes, décembre 2015
- Bihoux Philippe et de Guillebon Benoit – Quels futurs pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société – EDP Sciences, 2010
- Bihoux Philippe – « Matérialité du productivisme » – in Penser la décroissance. Politiques de l’Anthropocène – Presses de Sciences Po, 2013
- Bihoux Philippe – L’âge des Low-Tech. Vers une civilisation techniquement soutenable – Seuil, 2014
- Bihoux Philippe – Notre soif de minerais et d’énergie va poser un énorme problème – Grand Lyon, interview Millénaire3, juin 2015
- Bihoux Philippe – « Du mythe de la croissance « verte » à un monde post-croissance » – in Crime climatique stop ! L’appel de la société civile, éditions du Seuil, 2015
- Bonneuil Christophe, Fressoz Jean-Baptiste – L’Événement Anthropocène. La Terre, l’histoire et nous – Paris : éditions du Seuil, 2013
- Bourrier Hervé - « Peut-on encore fabriquer des produits énérgo-intensifs en France ? » - Annales des Mines/Responsabilité et environnement 2015/2, n°78
- Boutaud Aurélien et Gondran Natacha – « Bienvenue dans l’Anthropocène ? » - in La future métropole vue par 50 contributeurs – Grand Lyon, DPDP, 2014
- Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C., Wiebe, K.S. – « Materials embodied in international trade. Global material extraction and consumption between 1995 and 2005 » – in Global Environmental Change, Volume 22, Issue 3, 2012
- CAMATTE Hadrien, DARMET-CUCCHIARINI Maxime, GILLET Thomas, MASSON Emmanuelle, MESLIN Olivier, PADIEU Ysaline, TAVIN Alexandre – Baisse du prix du pétrole : quelles conséquences pour l’économie mondiale et pour la France ? – Direction générale du Trésor, TRÉSOR-ÉCO, n° 168, Avril 2016
- Caminel Thierry – Quelques notions de physiques pour commencer – in Produire plus, polluer moins : l’impossible découplage ? – Les petits matins, Institut Veblen, 2014
- Caminel Thierry – « L’impossible découplage entre énergie et croissance » – in Économie de l’après-croissance. Politiques de l’Anthropocène II – Presses de Sciences Po, 2015
- Campbell Colin – « L’ère du pétrole » - in Le grand pillage. Comment nous épuisons les ressources de la planète – Les petits matins, Institut Veblen, 2015
- Christmann Patrice – « Développement économique et croissance des usages des métaux » - in Annales des Mines/Responsabilité et environnement, 2016/2, n°82
- Cleveland Cutler J. – Net Energy From the Extraction of Oil and Gas in the United States, 1954-1997 – in Energy, vol.30, 2005
- Cochet Yves – Sur la transition énergétique et l’avenir – Institut Momentum, juin 2014
- Commissariat Général au Développement Durable – Le cycle des matières dans l’économie française – Repères, septembre 2013
- Commissariat Général au Développement Durable – La face cachée des matières mobilisées par l’économie française – Le point sur, n°177, octobre 2013
- Commissariat Général au Développement Durable – Matières mobilisées par l’économie française : une baisse stabilisée depuis la crise de 2008 – Le point sur, n°761, mai 2016
- Commissariat Général au Développement Durable – Bilan énergétique de la France pour 2013 – Service de l’observation et des statistiques, juillet 2014
- Commissariat Général à la Stratégie et Prospective – Approvisionnements en métaux critiques. Un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne – Document de travail, n°2013-04, juillet 2013
- Commission Européenne – Initiative «matières premières». Répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe – Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, 2008
- Commission Européenne – Report on critical raw materials for the EU – Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014
- Commission Européenne – L’économie circulaire. Connecter, créer et conserver la valeur – 2014

- Commission Européenne – Boucler la boucle: la Commission adopte un nouveau train de mesures ambitieux sur l'économie circulaire en vue de renforcer la compétitivité, de créer des emplois et de générer une croissance durable – Communiqué de presse, 2 décembre 2015
- Commission Européenne – L'innovation au service d'une croissance durable: une bioéconomie pour l'Europe – Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, 2012
- Conseil économique, social et environnemental – Transitions vers une industrie économe en matières premières – Avis, janvier 2014
- Conseil général de l'économie - L'économie circulaire, ou la compétition pour les ressources - Etude annuelle 2014
- Daly H. E. – « Toward Some Operational Principles of Sustainable Development » - in *Ecological Economics*, vol. 2, n° 1, 1990
- Daly Herman E. – « Institutions for a steady-State-Economy » in *Steady State Economics* – Island Press, 1991
- Daly H. E. – « Operationalizing sustainable development by investing in natural capital », in Jansson A., Hammer M., Folke C. et Costanza R., *Investing in Natural Capital. The Ecological Economics Approach to Sustainability*, Washington DC, Island Press, 1994.
- Daly Herman E. et Farley Joshua – *Ecological Economics. Principles and Applications* – Washington : Island press, 2011
- Debeir Jean-Claude, Deléage Jean-Claude et Daniel Hémerly – Une histoire de l'énergie – Flammarion, 2013
- Debrief Romain et alii. – « Flux de matières et d'énergie : produire dans les limites de la biosphère » - in *L'Économie politique* 2016/1, n° 69
- Dejardin Camille – « État stationnaire : de la hantise à l'urgence » - in *Le Débat*, 2014/5, n° 182
- Delgoulet Élise et Pahun Jeanne – Bioéconomie : enjeux d'un concept émergent – Ministère de l'agriculture, Centre d'études et de prospective, document de travail n°10, décembre 2015
- Demaillly, D., Chancel, L., Waisman, H., Guivarch, C. – Une société post-croissance pour le 21ème siècle. Peut-on prospérer sans attendre le retour de la croissance ? – IDDRI, Studies n°08/13
- Durand Bernard – Les combustibles fossiles, grands oubliés du Débat national sur la transition énergétique (DNTE) – Conférence du 12 Décembre 2013 au Collège de France – ASPO France
- European Environment Agency – *The european environment state and outlook 2015*
- Fizaine Florian – Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique – Thèse de Sciences Economiques, Université de Bourgogne, 2014
- Geldron Alain – « Métaux stratégiques : la mine urbaine française » - in *Annales des Mines/Responsabilité et environnement*, 2016/2, n°82
- Giraud Pierre-Noël, Ollivier Timothée – *Économie des matières premières* – Paris : La Découverte, 2015,
- Giraud Pierre-Noël – « Ressources ou poubelles ? » - *Le Débat*, 2014/5, n° 182
- Giraud Gaël – Le découplage énergie-PIB, ou le rôle (sous-estimé) de l'énergie dans la croissance du PIB – in *Produire plus, polluer moins : l'impossible découplage ?* – Les petits matins, Institut Veblen, 2014
- Grosse François – *Vers une écologie industrielle* – Paris Tech Review, 2011
- Grosse François – La croissance quasi-circulaire. Une approche pragmatique de la gestion durable des ressources matérielles non renouvelables – in *Futuribles*, n°403, novembre-décembre 2014
- Grosse François, « Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières », - in *Annales des Mines/Responsabilité et environnement*, 2014/4, n°76
- Guillaneau Jean-Claude – « Les modes d'action de la stratégie d'approvisionnement japonaise en métaux non-ferreux stratégiques » - in *Annales des Mines/Responsabilité et environnement*, 2016/2, n°82
- Hall, C. A. S., Balogh, S., Murphy, D. J. R. – What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? – in *Energies*, 2, 2009
- Hall, C.A.S., Lambert, J.G., Balogh, S. – EROI of different fuels and the implications for society – in *Energy Policy*, 64, 2014.
- Hall C. et Klitgaard K. – *Energy and the Wealth of Nations. Understanding the Biophysical Economy* – Berlin : Springer, 2012
- Hamilton James D. – *Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007–08* – Brookings Papers on Economic Activity, Spring 2009
- Heinberg Richard – *Pétrole. La fête est finie. Avenir des sociétés industrielles après le pic pétrolier* – Plogastel Saint-Germain : Editions Demi-Lune, 2008
- Heinberg Richard – *La Fin de la croissance : s'adapter à notre nouvelle réalité économique* – Plogastel Saint-Germain : Editions Demi-Lune, 2012
- Helbing Dirk – « Globally networked risks and how to respond » – in *Nature*, vol. 497, mai 2013
- Hughes David – A reality check on the shale revolution – *Nature*, 21 february 2013, Vol.494
- Huwart Jean-Yves et Verdier Loïc – *La mondialisation économique. Origines et conséquences* – OCDE, 2012
- Institut de l'économie circulaire – L'économie circulaire, nouveau modele de prosperite – Table ronde « économie circulaire », conférence environnementale des 20 et 21 septembre 2013, contribution de l'Institut de l'économie circulaire
- International Resource Panel – *Global material flows and resource productivity* – United Nations Environment Programme (UNEP), 2016
- International Resource Panel – *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure* – United Nations Environment Programme (UNEP), 2013

- International Resource Panel – Metal stocks in society. Scientific Synthesis – United Nations Environment Programme (UNEP), 2010
- Kampelmann Stephan – « Mesurer l'économie circulaire à l'échelle territoriale. Une analyse systémique de la gestion des matières organiques à Bruxelles » - in Revue de l'OFCE 1/2016, n°145
- Klare Michael – « Le troisième âge du carbone » – in L'Économie politique, 2014/2 n° 62
- Krausmann K et alii – « Growth in global materials use, GDP and population during 20th century » – in Ecological Economics, vol. 68, n°10, 2009
- Krausmann Fridolin, Schaffartzik Anke, Mayer Andreas, Eisenmenger Nina, Gingrich Simone, Haberl Helmut et Fischer-Kowalski Marina – La société industrielle mondiale ne connaît aucune dématérialisation depuis le XIXe siècle – in La Revue Durable, n°53, janvier 2015
- Labbé Jean-François – « Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux » - in Annales des Mines/Responsabilité et environnement 2016/2, n°82
- Laherrère Jean – Pic du pétrole et autres pics – ASPO France, 2013
- Lambert J.G. et alii – Energy,EROI and quality of life – in Energy Policy, n°64, 2014
- Lambert J.G. et alii – EROI of Global Energy Resources Preliminary, Status and Trends – State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, 2012
- Liger Alain – « Introduction » - in Annales des Mines/Responsabilité et environnement 2016/2, n°82
- Maddison Angus – The World Economy. A millennial perspective – OECD, 2001
- Meadows Dennis et alii – Les limites à la croissance (dans un monde fini) – Editions Rue de l'Echiquier, 2004
- Moll Stephan et Popescu Cristina – In physical terms the EU-27 imports three times more than it exports – Eurostat, Statistics in focus, 51/2012
- Murphy David J. et Hall Charles A. S. – Year in review. EROI or energy return on (energy) invested – in Annals of the new york academy of sciences, vol. 1185, n°1, 2010
- OCDE – Sustainable Materials Management: Making Better Use of Resources – 2012
- OCDE – Productivité des ressources dans les pays du G8 et de l'OCDE – Rapport établi dans le cadre du Plan d'action 3R de Kobe, 2011
- OCDE – Export Restrictions on Strategic Raw Materials and their Impact on Trade – OECD Trade Policy Papers n°95, 2010
- Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques – Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques – 2016
- Prieto, P. et Hall,C. – Spain's Photovoltaic Revolution. The Energy Return on Investment – Springer, 2013
- Rollat Alain – « Devenir recycleur : la stratégie d'un groupe producteur de produits minéraux stratégiques » - in Annales des Mines/Responsabilité et environnement, 2014/4, n°76
- Roman Philippe – Le découplage PIB-matières – in Produire plus, polluer moins : l'impossible découplage ? – Les petits matins, Institut Veblen, 2014
- Saussay Aurélien, Guillou Antoine, Boissel Charles – Baisse des prix du pétrole : aubaine économique, défi écologique – Terra Nova, mai 2015
- Schaffartzik Anke et alii – The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010 – in "Global Environmental Change", 26 (2014)
- Servigne Pablo et Stevens Raphaël – Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes – Seuil, 2015
- Servigne Pablo – Refonder la résilience de nos systèmes alimentaires – interview dans « Pour une région lyonnaise résiliente. Quel dialogue urbain-périurbain ? – Région Urbaine de Lyon (RUL), mars 2015
- Servigne Pablo – La résilience, un concept-clé des initiatives de transition – Barricade, décembre 2011
- Tainter Joseph – L'effondrement des sociétés complexes – Aube : Le retour aux sources, 2013
- Thévard Benoit – La diminution de l'énergie nette, frontière ultime de l'anthropocène – Institut Momentum, 2013
- Thévard Benoit – L'Europe face au pic pétrolier – rapport pour le Groupe des Verts/ALE au Parlement Européen, 2012
- US Energy Information Administration – As cash flow flattens, major energy companies increase debt, sell assets – Today in Energy, 29 juillet 2014
- US Energy Information Administration – Annual Energy Outlook 2014
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs – World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables – Working Paper No. ESA/P/WP.241, 2015
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs – World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights – 2014
- Valérien François – « Métaux rares et dépendance stratégique » - in Annales des Mines/Responsabilité et environnement 2016/2, n°82
- Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czernski K., Gottlieb S., Hussein A. – Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants – in Energy, Volume 52, 2013
- Wiedmann, T.O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., Kanemoto, K. – The material footprint of nations – PNAS, 2013
- Zarfl Christiane, Lumsdon Alexander E., Berlekamp Jurgen, Tydecks Laura, Tockner Klement – A global boom in hydropower dam construction – in Aquatic Sciences, 2014

WWW.
MILLENAIRE3.
COM

RETROUVEZ
TOUTES LES ÉTUDES SUR

MÉTROPOLE DE LYON
DIRECTION DE LA PROSPECTIVE
ET DU DIALOGUE PUBLIC
20 RUE DU LAC - 69399 LYON CÉDEX 03