

Sémécol, Séance 2 (1^{er} mars 2019). La transition dans un monde aux ressources finies

L'objectif de cette séance est présenté par Sébastien Lachaize (Laboratoire de Physique et Chimie des Nano-Objets, INSA Toulouse) de l'Atécopol. Il est important de faire le lien entre énergie et matières premières : les humains ne produisent pas d'énergie, ils la capturent grâce à des infrastructures qui demandent des matériaux et elles-mêmes de l'énergie. Deux questions se posent dans notre monde fini et dans le contexte de la « transition énergétique », c'est-à-dire de la diminution drastique, rapide et nécessaire en émissions de CO₂, et donc en utilisation d'énergies fossiles (Séance 1) :

- (1) Est-ce qu'il y a assez de ressources pour un programme en énergie renouvelable *high tech* à grande échelle ? (où les énergies fossiles utilisées actuellement seraient donc entièrement remplacées).
- (2) Est-ce qu'un tel programme est viable à long terme, ou bien fera-t-il face également à la finitude des ressources ?

Les contraintes en matières premières dans un monde en croissance et en transition énergétique

Olivier VIDAL, chercheur à l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) à Grenoble.

Le contexte actuel est une économie mondiale en croissance économique (qui reste l'objectif de tous les gouvernements) et un projet ambitieux d'économie bas-carbone. La croissance s'accompagne d'une consommation différenciée de deux types de matières premières suivant le niveau de développement des pays. Ciment, acier, aluminium et cuivre sont utilisés en très grande quantité (plusieurs millions de tonnes par an) pour les infrastructures de base (transport et villes). Leur production mondiale a été très forte (+5%/an) après 1945 du fait de leur consommation par les pays « développés », où elle stagne désormais (mais sans diminuer pour autant) ; leur production est de nouveau très forte (+5%/an) du fait de la Chine, qui par exemple consomme la moitié de l'acier mondial. La demande des pays arrivés à un niveau élevé de richesses augmente surtout pour un deuxième type de matières premières, les métaux dits rares. De l'ordre de cent mille tonnes par an, leur production augmente d'environ 10%/an. Ces métaux sont nécessaires à l'électronique, notamment ordinateurs et smartphones (qui utilisent la majorité des éléments du tableau périodique : figure 1), automobiles et énergies renouvelables (panneaux solaires et éoliennes).

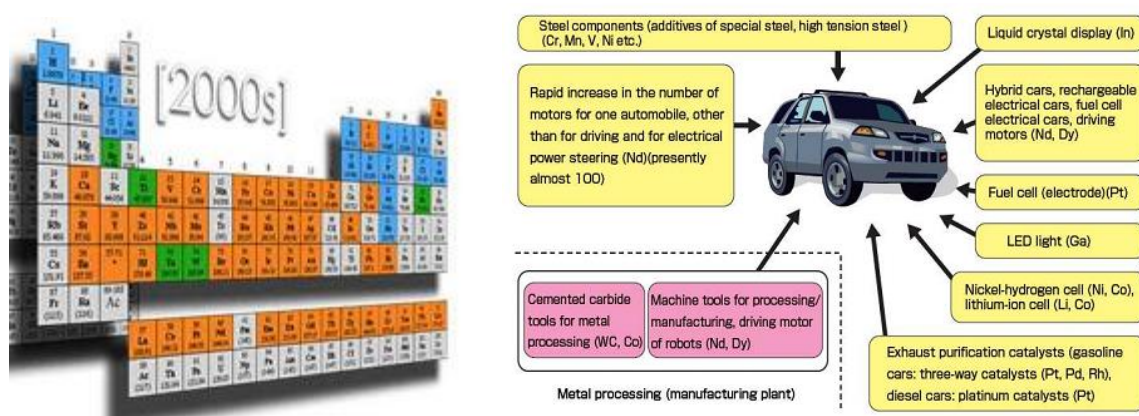


Figure 1 : éléments utilisés dans les téléphones portables (en bleu, depuis les années 80 ; en vert, éléments en plus depuis les années 90 ; en orange, en plus depuis les années 2000) et les automobiles récentes (@ Vidal).

Les énergies renouvelables sont intermittentes (vent, soleil) et les flux d'énergie sont dilués. Il y a donc besoin de lourdes infrastructures pour les capter puis les stocker, ce qui implique beaucoup de matières premières : béton, acier et aluminium, qui sont aujourd'hui responsables de 50% des émissions de CO₂ de l'industrie et de 12% de la consommation d'énergie mondiale. De plus, il faudrait connecter les réseaux d'éoliennes et de panneaux solaires avec de nombreux câbles nécessitant énormément de cuivre, puisque le vent et le soleil ne sont pas au même endroit que là où on a besoin et où on consomme l'énergie. Les besoins en cuivre seraient de 150 à 350 millions de tonnes, ce qui représente 7 à 15 années de production annuelle actuelle.

Les taux de croissance observés des matières premières (qui sont donc nécessaires pour la transition énergétique) correspondent à une consommation exponentielle, donc infinie, ce qui est bien évidemment impossible dans un monde fini. Pour savoir si la transition énergétique est possible, il faut savoir combien de temps il reste avant l'épuisement des ressources, et la réponse est en fait loin d'être triviale.

Approche géologique, basée sur l'offre. En 1956, Hubbert a développé un modèle logistique à partir de l'estimation des stocks disponibles et de l'historique des productions pour prédire la date du pic de production du pétrole (Appendix). Le succès de sa prévision pour le pétrole conventionnel aux Etats-Unis (pic prédit et atteint en 1970) a rendu cette approche très populaire, appliquée également aux métaux. Cette approche est mathématiquement simple mais n'est pas basée sur un quelconque modèle réaliste. Elle a été réfutée historiquement : la réalité des productions réalisées s'est révélée presque toujours bien au-dessus des prévisions (sauf pour le mercure mais dans ce cas en raison de réglementations du fait de sa toxicité). Hubbert prévoyait en 1956 un pic de production du pétrole mondial en 2000, à 12.5 milliards de barils par an. Elle a atteint en fait 28 milliards de barils par an (70 millions de barils par jour ; NDR : source eia.gov,) et est aujourd'hui toujours monstrueusement élevée à près de 100 millions de barils par jour (une fois le tour de la terre si on aligne les barils). Les prévisions à la Hubbert s'apparentent en fait à lire dans une boule de cristal.

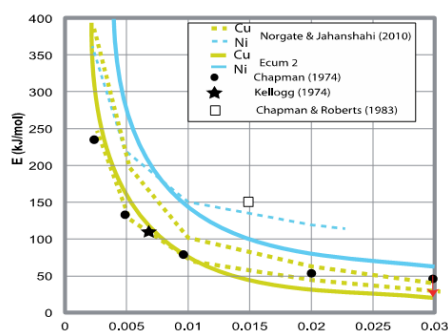
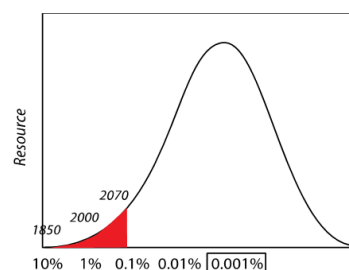
Approche économique, basée sur la demande. Les ressources augmentent plus que prévu car les prévisions se basent sur une technologie donnée ; or, les innovations technologiques permettent d'exploiter de nouvelles réserves, plus difficiles d'accès et/ou de moins bonne qualité. Dans le cas du pétrole, les prévisions de Hubbert ne prenaient en compte que le pétrole conventionnel (ses prédictions pour le pétrole états-unien n'étaient donc à peu près correctes que pour celui-ci). Des réserves connues ne sont pas comptabilisées tant que le coût est trop élevé et la demande insuffisante pour les exploiter : les contraintes économiques sont au moins aussi importantes que les contraintes géologiques. Si les ressources ne sont donc pas simplement finies, mais évoluent en fonction de la demande, on doit pouvoir prédire les productions futures à partir de l'estimation de la demande mondiale, sans se soucier des réserves géologiques. Cela se fait en se basant (1) sur les niveaux de consommation historiques, (2) en observant quand ceux-ci saturent en fonction du niveau de vie atteint (chaque personne possède rarement plusieurs 4x4 et smartphones même si elle en a les moyens), et en intégrant (3) l'évolution du PIB et (4) de la population mondiale. Pour le cuivre, dont la consommation actuelle est d'environ 20 millions de tonnes par an, une telle modélisation prédit ainsi une consommation de 70 millions de tonnes en 2100. Qu'est-ce que cela représente ? Depuis 1900, on a extrait 750 millions de tonnes de cuivre. Il faudrait en extraire un milliard supplémentaire dans les 30 prochaines années, et encore 2 milliards entre 2050 et 2100, ce qui est proprement monstrueux (Figure 2).



Figure 2 : Kennecott Copper Mine, Utah, est le trou le plus important au monde creusé par les humains (source : wikipedia), avec environ 1 km de profondeur et 3 ou 4 km de long. Depuis 1906, 19 millions de tonnes de cuivre ont été extraites de 6 milliards de tonnes de roche, ce qui est l'équivalent d'à peine une seule année de consommation actuelle. Pour continuer sur cette tendance, il faudrait 55 nouvelles mines comme celle-là d'ici 2050, 160 d'ici 2100.

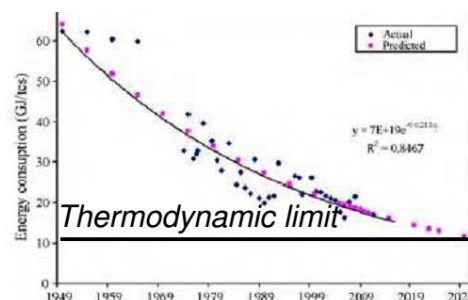
Mais, tout de même, est-ce que de telles quantités de cuivre existent *vraiment* ? En se basant sur les estimations géologiques actuelles, à ce rythme-là toutes les réserves mondiales seraient épuisées en 2050. Cependant, depuis 70 ans, la durée de vie prédite des réserves de cuivre a toujours été de 30 ou 40 ans. Elles n'ont jamais été atteintes grâce à la découverte et l'exploitation de nouvelles réserves. Il n'y aurait donc pas vraiment de limites physiques aux ressources, les économistes ne seraient pas si fous ?¹

Comment cela est-il possible ? Il existe en fait une relation entre concentration du minerai et quantités de gisements (schéma ci-contre). La quantité totale de minerai est maximale à des concentrations très faibles (0.001% est la concentration moyenne de cuivre de la croûte terrestre). Tant qu'on n'a pas atteint ces faibles concentrations (et on en est loin, au moins pour les minerais courants), il n'y a en effet pas de problème de ressources.

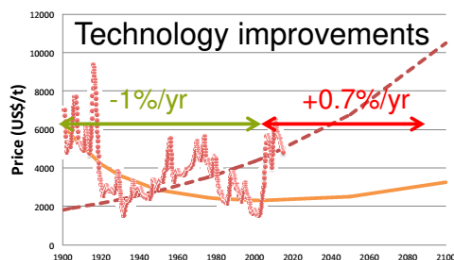


Le problème qui se pose est cependant celui de l'énergie requise pour l'extraction, d'autant plus importante que les concentrations sont faibles (courbes ci-contre, montrant l'énergie requise en fonction de la concentration ; la relation coût d'extraction / concentration est similaire). Cela pose un sérieux problème car il ne faudrait pas que la consommation de minerais requise notamment pour la transition énergétique se paye par une consommation d'énergie primaire plus importante. Mais la figure ci-contre est en fait trompeuse, car elle montre la relation énergie /concentration *pour une technologie donnée*.

Historiquement, les innovations technologiques ont permis des gains d'efficacité énergétique (à droite pour l'acier, moyenne mondiale) qui ont plus que compensé la diminution en concentration de minerai, ce qui explique la relative stabilité historique observée des prix des minerais. Mais, d'une part, il n'est pas possible de prédire jusqu'à quand les innovations technologiques vont continuer à augmenter l'efficacité énergétique ; d'autre part, il existe bien une limite physique, thermodynamique (par exemple l'énergie qu'il faut pour casser un oxyde de fer en fer-métal plus oxygène), dont on se rapproche.

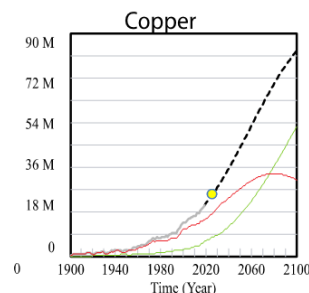


¹ NDR : En 1973, Mancur Olson avait crédité l'économiste Kenneth Boulding de cette citation désormais célèbre « anyone who believes exponential growth can go on forever in a finite world is either a madman or an economist » (source : <https://quoteinvestigator.com/2019/07/11/exponential/>)



Pour le cuivre, les prédictions de prix (proxy de la consommation d'énergie pour l'extraction) indiquent que l'augmentation d'efficacité risque prochainement de ne plus suffire à compenser la diminution de concentration. L'extraction des ressources nécessaires à la transition énergétique risquerait donc d'entraîner un très fort coût en énergie, et donc en émissions de GES, ce qui mettrait à mal les objectifs du GIEC.

Le recyclage reste la dernière opportunité à exploiter. Le taux de recyclage du cuivre, actuellement de 30%, ne peut pas couvrir une demande qui augmente de façon exponentielle. En revanche, avec une demande qui s'infléchirait pour se stabiliser progressivement (courbe noire à droite, calculée comme expliqué plus haut), et en augmentant le taux de recyclage à 75%, le cuivre recyclé (en vert) deviendrait la source majeure de la consommation de cuivre dans 50 ans (la courbe rouge est la production primaire de cuivre). L'avantage majeur du recyclage des métaux est le coût énergétique bien moindre que celui de l'extraction (5 à 10 fois plus faible).



Ces simulations montrent donc qu'au moins pour le cuivre, il n'y aurait pas forcément de problème de finitude des ressources ni même de consommation d'énergie émettrice de CO₂, pour réussir une transition énergétique vers les énergies renouvelables. Il n'est cependant pas sûr que ces conclusions pour le cuivre soient généralisables au-delà des autres métaux classiques pour lesquels on a également du recul historique (fer, aluminium). Pour les métaux rares il est difficile d'évaluer les usages futurs liés aux innovations technologiques ainsi que les réserves existantes. Le recyclage pose également des problèmes aigus pour les produits très complexes et les alliages, pour lesquels il est difficile d'isoler et d'extraire le métal de départ afin de le recycler. Or les panneaux solaires et les éoliennes nécessitent de grandes quantités de métaux rares.

Le problème des ressources pour la transition énergétique ne serait pas tant un problème de réserves qu'un problème d'impacts. Impacts sur les émissions de CO₂ (quelles quantités de pétrole et de charbon seraient nécessaires pour mener à bien la transition énergétique, risquant d'entraîner un dépassement des 2° avant que la transition ne soit achevée ?). Impacts également **écologiques et sociaux** de l'extraction, comme illustré par la mine de cuivre de Kennecott, figure 2 (dans le modèle avec recyclage, la demande ne se stabiliserait qu'à 30M de tonnes de cuivre par an). Ces impacts colossaux (NDR : voir la conférence de Benoît de Guillebon, les énergies renouvelables ne sont pas « propres ») ne sont en fait pris en compte ni dans les modèles géologiques ni dans les modèles économiques car ils ne sont pas chiffrés. Olivier Vidal avait notamment indiqué que les prix des minerais étaient restés à peu près stables non seulement grâce aux progrès technologiques mais aussi en raison de délocalisations vers des pays à la main d'œuvre moins coûteuse et aux réglementations environnementales moins sévères. Les impacts écologiques et sociaux génèrent (NDR : à juste titre²) conflits et résistances. Le Salvador a ainsi inscrit en 2017 dans sa constitution l'interdiction des mines de métaux³.

Pour aller plus loin⁴ : Vidal, O. (2018). *Matières premières et énergie: les enjeux de demain*. ISTE Group.

² <http://www.envjustice.org/>

³ <https://www.theguardian.com/global-development/2017/mar/30/el-salvador-makes-history-first-nation-to-impose-blanket-ban-on-metal-mining>

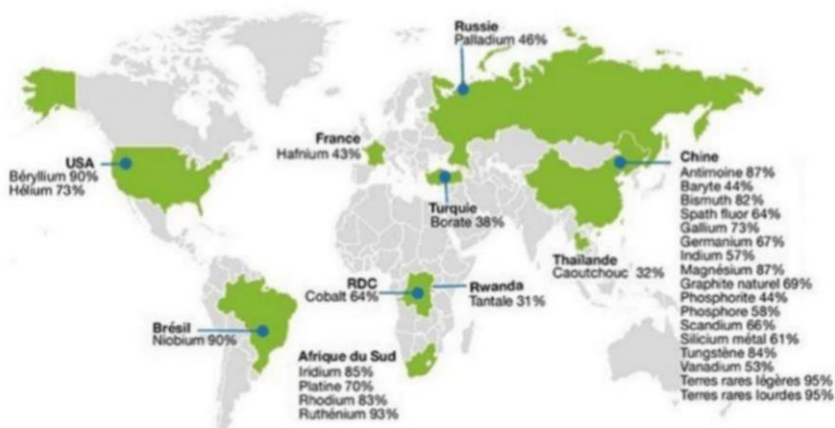
⁴ NDR : voir également la conférence donnée par Olivier Vidal le 11/04/19 à l'INRIA de Grenoble : <https://www.youtube.com/watch?v=TxT7HD4rzP4>

Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société

Benoît de Guillebon, directeur d'APESA, centre technologique en environnement au service de la transition des entreprises et des territoires en Nouvelle-Aquitaine.

L'objet de cette conférence concerne les conséquences environnementales, sociétales et géopolitiques de l'exploitation minière, ainsi que les potentialités et limites du recyclage et de l'économie circulaire pour diminuer la consommation de matières premières.

Aujourd'hui, la France a très peu de ressources minérales, ce qui la rend dépendante de l'extérieur, et notamment de la Chine, de l'Afrique du Sud, du Brésil et des Etats-Unis pour les métaux rares. Cela entraîne un pouvoir politique pour ces pays, notamment pour la Chine (ci-contre : *Principaux pays producteur de matières premières critiques*) qui a énormément investi dans l'exploitation minière : elle possède 40% des réserves de terres rares, mais détient 95% de la production mondiale. Face à la concurrence économique de la Chine, la mine de Mountain Pass aux Etats-Unis (principale mine de terres rares au XXe siècle) a dû fermer. Après avoir repris son activité en 2010, elle dépose de nouveau son bilan en 2015 avant d'être reprise par des Chinois.



Source : « Étude sur la révision de la liste des Matières Premières Critiques – Résumé analytique », Commission européenne, septembre 2017.

Les différences de ressources naturelles et d'investissement entraînent des conséquences géopolitiques et des conflits ⁵. Dans les 60 dernières années, au moins 40% des conflits intra-étatiques auraient été liés à des enjeux de contrôle des ressources naturelles ⁶. Parmi eux, on peut citer la guerre au Kivu (à l'est de la République Démocratique du Congo) pour le coltan ⁷, et les milices armées au Rwanda, en Ouganda et au Burundi pour extraire et protéger la production de tantale. L'exploitation minière a ainsi des conséquences politiques et sociales qui sont accentuées par la spéculation sur le prix des métaux, qui peuvent varier de 1 à 3 (cuivre) voire de 1 à 5 (zinc). Ces spéculations entraînent des difficultés pour les consommateurs et pour l'industrie. Il faudrait renforcer la résilience de nos économies nationales face à ces fluctuations de prix.

À cela s'ajoutent des effets environnementaux : alors qu'il faut de plus en plus d'énergie pour extraire des métaux faiblement concentrés, l'énergie elle-même devient moins accessible (figure ci-dessous). De plus, le creusement des mines peut entraîner la stérilisation des sols. Dans le cas des métaux sulfurés (zinc, cuivre), la roche stérile qui est mise de côté car ne contenant pas le minerai recherché entre au contact de l'air et de l'eau, et

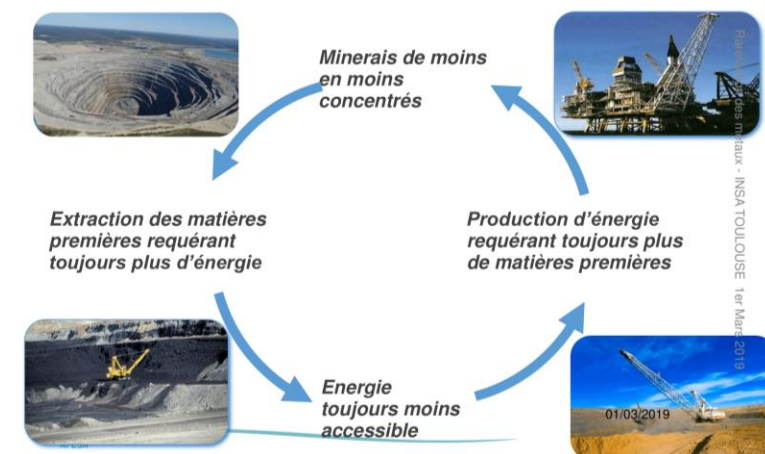
⁵ Pitron, G. (2018). *La guerre des métaux rares: la face cachée de la transition énergétique et numérique*. Éditions Les Liens qui libèrent.

⁶ PNUÉ (2009) : « From Conflict to Peace-building : the Role of Natural Resources and the Environment », (<http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7867>)

⁷ Documentaire de Patrick Forestier « Du sang dans nos portables » (2007)

rejette des acides sulfuriques, voire parfois de l'arsenic, qui viennent polluer la terre et les rivières ⁸. La situation peut empirer si les digues servant à retenir l'eau et la boue cèdent, déclenchant ainsi de grosses vagues de pollution ⁹.

Figure 10 : Le « cercle vicieux » entre ressources minérales et énergie



Afin de réduire ces problèmes liés à l'extraction des métaux, une des solutions est l'économie circulaire. Dans le processus de production habituel, on prélève, on transforme, on utilise puis on jette. Entre les deux premières étapes, pour les métaux, 99% de la roche est abandonnée, d'autant plus aujourd'hui que les minerais exploités sont plus pauvres. Face au constat selon lequel seulement 1% des produits prélevés seraient encore en usage un an après, la nécessité des "3R" de l'économie circulaire s'impose : réduire (la consommation de métaux et d'énergie) ; réparer et réutiliser afin de faire durer les objets le plus longtemps possible ; et finalement recycler, lorsque les objets sont en fin de vie.

Le recyclage seul a de nombreuses limites. Il est notamment assez inutile tant que la demande suit une croissance exponentielle : le recyclage ne fait que décaler le problème dans le temps tant qu'on ne réduit pas aussi parallèlement la demande. Limites également en cas de complexité technologique, lorsque plusieurs métaux sont utilisés pour produire un même objet, ou d'usage dispersif comme pour le cobalt dans les peintures. De plus, lorsqu'il est recyclé, le métal se dégrade. Ainsi, dans les voitures, il y a principalement de l'acier et du plastique mais aussi de nombreux petits systèmes motorisés (fenêtres automatiques) qui contiennent du cuivre. Lors du processus de recyclage qui nécessite beaucoup d'énergie, il est compliqué d'extraire tout le cuivre, et de l'isoler afin de le recycler. Il faudrait donc que les produits soient conçus dès le départ en vue d'être recyclés (objets simples, facilement démontables).

Cependant, pour être réellement profitable, le recyclage a besoin d'incitations financières. En effet, lorsque le prix des matières premières chute, il revient moins cher aux entreprises de se fournir directement en métal neuf plutôt qu'en métal recyclé. Ainsi, l'entreprise de recyclage Rhodia à la Rochelle a fermé en 2016 par manque de compétitivité lorsque les prix des matières premières ont chuté. Il faut aussi créer plus d'incitations pour que les

⁸ https://www.liberation.fr/societe/2013/03/12/saint-felix-de-palieresarsenic-et-vieilles-poubelles_888018.

Egalement dans le cas des mines de charbon : <http://www.raccooncreek.org/about-the-watershed/history-of-watershed-restoration-efforts/>

⁹ <https://ejatlas.org/conflict/aznalcollar-tailings-dam-failure-spain>; <https://www.20minutes.fr/planete/2360139-20181025-inondations-aude-elles-declenche-vague-pollution-arsenic>

consommateurs recyclent leurs objets de consommation (aujourd'hui, seulement 15 à 20% des téléphones portables sont recyclés).

Certaines entreprises se sont engagées à réduire leur consommation d'énergie et leurs déchets. Par exemple, Interface (moquettes de bureau), depuis leur promesse il y a 25 ans, ont réduit leurs déchets et augmenté la part de leurs produits recyclés de manière significative. Une des solutions est celle de l'« économie de la fonctionnalité » où les produits sont loués plutôt que vendus, l'industrie se transformant ainsi en service. Suivant cette logique, Michelin a commencé à louer ses pneus, ce qui a permis de multiplier la durée de vie de ceux-ci par deux et demi. Cette nouvelle forme d'économie encourage en effet le réemploi, la réutilisation et la réparation, avec des produits facilement réparables et des magasins de pièces détachés (ex: le groupe SEB pour l'équipement domestique ou Patagonia pour les vêtements de sport).

Comme le souligne de Guillebon lors des questions, un nouveau discours d'efficacité énergétique et de sobriété se met (ou doit se mettre) lentement en place, prônant un mode de vie moins consommateur et un modèle économique qui fonctionnerait sans croissance (*Prosperity without growth*, Tim Jackson). De Guillebon met en avant la nécessité de revenir à des technologies plus simples, moins coûteuses en ressources et en énergie ainsi que le renoncement à l'idéal du "tout, tout de suite" qui est très cher énergétiquement.

Appendix : l'approche géologique de Hubbert

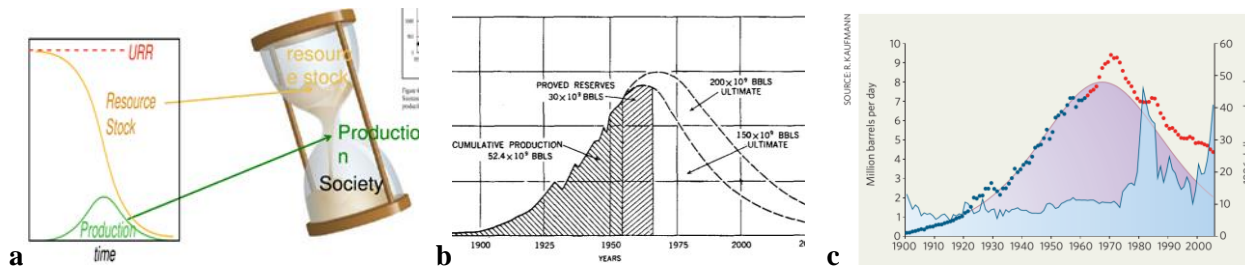


Figure S1 : **a.** Le modèle logistique ou « du sablier » se base sur l'estimation d'une ressource ou stock (URR : 'ultimate recoverable reserves'), qui par définition est fixe (constante). Au début, l'exploitation s'accroît de façon exponentielle car les ressources sont facilement accessibles, mais atteint son maximum lorsque la moitié des ressources est épuisée ; ensuite, l'exploitation décroît au fur et à mesure que les ressources existantes sont de plus en plus limitées (@Vidal). **b.** (NDR) Hubbert montre en 1956 qu'on peut utiliser les données de production passées du pétrole pour ajuster une courbe logistique et prédire le pic de production. Ainsi, pour des réserves de pétrole brut des 48 états contigus des États-Unis estimées alors entre 150 et 200 millions de barils, il prédit que le pic de production devait être atteint entre 1966 et 1971 (Hubbert, M. K. (1956). Nuclear energy and the fossil fuel. *In* Drilling and production practice. American Petroleum Institute). **c.** (NDR) Le pic de production de pétrole conventionnel aux États-Unis (points rouges) a bien été atteint en 1970; la courbe ombrée en violet correspond aux prédictions de Hubbert (Witze, A. (2007) That's oil, folks. *Nature* 445, 14).