

Source : <http://www.revue-projet.com/articles/2015-11-bihouix-penurie-des-ressources-tabou-pour-l-industrie/>

Téléchargement 27 11 2015



## Pénurie des ressources : un tabou pour l'industrie

**Croissance verte, troisième révolution industrielle... nos dirigeants politiques et économiques se bercent d'illusions. Nos tablettes, nos data centers, nos imprimantes 3D et nos panneaux solaires, grands consommateurs de ressources rares, se heurteront tôt ou tard à la pénurie.**

En ces temps incertains, où les dégâts écologiques sont tels que la perspective d'un véritable effondrement environnemental devient crédible, où les mauvaises nouvelles se succèdent sans discontinuer, il est parfois bon de se remonter le moral. Une bonne manière de le faire est de se laisser bercer par les annonces de nouvelles découvertes et de solutions techniques miraculeuses qui nous promettent régulièrement des lendemains technologiques meilleurs.

À en croire journalistes, chercheurs, entrepreneurs ou prospectivistes, nous serions à la veille d'une rupture majeure, et heureuse : même si, jusqu'à présent, nous n'avons fait que saccager la planète[1], à chacun de nos problèmes correspondrait une solution technique, et nous aurions parfaitement les moyens de poursuivre un croissance « verte » à base d'énergie « propre » et d'économie circulaire, respectueuse des écosystèmes, rebaptisés récemment « éco-anthropo-systèmes[2] », puisque nous sommes désormais partout ou presque. Mieux, l'économie, de destructrice, deviendrait réparatrice et protectrice, grâce aux biotechnologies qui dépollueraient les sols avec des bactéries modifiées, ou aux objets connectés et aux *big data* qui collecteraient les informations sur les espaces naturels en danger.

La religion du progrès technique a ses augures, et Jeremy Rifkin est l'un des plus talentueux d'entre eux. Sa thèse sur le déploiement massif à venir des énergies renouvelables, dont l'intermittence (donc les besoins de stockage associés) serait notamment gérée par l'hydrogène[3], a séduit jusqu'aux écologistes et convaincu de nombreux décideurs. Il a ainsi popularisé la notion de troisième révolution

industrielle[4], prodiguant même ses coûteux conseils aux instances européennes, à des États, à des collectivités comme San Antonio au Texas, Rome, ou le Conseil Régional du Nord-Pas-de-Calais, visant à la mise en place de *master plans* pour en favoriser l'émergence locale.

Rifkin n'a pas froid aux yeux, ne s'embarrasse pas du mélange des genres, il a le sens de la formule et assène ses vérités sans sourciller, c'est ce qui fait son succès. Dans son nouvel opus[5], il ne prédit rien moins que la fin du capitalisme ou presque, pour cause de gratuité universelle des communications, de l'énergie et des objets. À force de gains de productivité, les coûts finiraient par tendre vers zéro et le système se prendrait ainsi à son propre piège.

La future économie serait basée sur trois révolutions technologiques : celle, désormais bien ancrée, des communications, celle d'un internet de l'énergie – grâce au déploiement massif des énergies renouvelables et aux *smart grids*, ces réseaux de transport d'énergie « intelligents » qui équilibreront à tout instant demande variable et offre intermittente – et celle d'un internet des objets, à la fois connectés et produits à volonté dans des « fab labs » par des imprimantes 3D.

La thèse séduit et chacun peut y trouver son compte : les pourfendeurs d'un fordisme exploiteur, car tout le monde deviendra producteur-consommateur, et l'économie du partage et de la collaboration règnera en maître ; les hédonistes, qui n'y verront aucune remise en cause de la consommation effrénée ou de l'hyper mobilité de nos sociétés modernes (et même bien au contraire, puisque tout y sera gratuit) ; les industriels de tous bords, alléchés par de nouveaux marchés de fabrication, d'installation et de maintenance de tous les nouveaux équipements *high tech* qui seront nécessaires ; les écologistes naïfs espérant une solution technique aux désordres du monde (énergie propre et abondante, imprimantes 3D pour fabriquer les pièces de rechange et lutter contre l'obsolescence programmée des méchants industriels...).

Quel futur radieux ! Las, Rifkin possède un penchant courant chez bien des économistes : à aucun moment ne l'effleure la question de la disponibilité des ressources physiques, ou de la réalité matérielle de ses réflexions. Et, en assénant ses trois assertions principales (la révolution et la quasi-gratuité dans les communications, l'énergie, les objets), il commet trois erreurs fondamentales.



## Un internet sonnante et trébuchant

Commençons par la gratuité des communications et d'internet, qui fleure bon la « dématérialisation de l'économie », dont on commence à revenir[6]. Le numérique n'a évidemment rien de virtuel : le secteur des télécommunications et de l'informatique a un impact environnemental majeur, par son utilisation de ressources et par sa consommation d'énergie.

L'utilisation de ressources non renouvelables, c'est-à-dire dont le stock à notre disposition, aussi grand soit-il, n'est pas inépuisable, concerne nos terminaux (téléphones, ordinateurs... cf. encadré) mais aussi et surtout des équipements invisibles pour le consommateur final (relais, serveurs, antennes et équipements de transmission, répéteurs et câbles transocéaniques qu'on installe pour accompagner la croissance du trafic, etc.). Le *cloud computing* (informatique nuage) n'échappe pas à la règle puisqu'il s'appuie sur la transmission rapide des données et leur stockage dans de gigantesques *data centers*.

## Vie et mort d'un ordinateur

Un ordinateur contient des dizaines de métaux différents, pour beaucoup précieux ou rares : cuivre et argent, lithium et cobalt, étain, gallium, indium et germanium, tantale, or, ruthénium, tellure, antimoine, platine, palladium... On trouve aussi des métaux farfelus dans les infrastructures, comme le germanium ou l'erbium (un lanthanide[7]) dans les fibres optiques en verre. Même si la quantité utilisée dans chaque appareil est souvent faible (typiquement quelques dizaines de milligrammes), le secteur représente une part très importante de la consommation mondiale, et donc de la production minière : 6 % du cuivre (y compris infrastructures), 10 % de l'or et du palladium, 20 % de l'argent, 35 % de l'étain et du cobalt, 60 % du tantale, 80 % de l'indium.

Dans la plupart des cas, ces ressources sont très mal récupérées en fin de vie. Au niveau mondial, une grande partie des déchets électriques et électroniques, dont la quantité est en augmentation rapide (42 millions de tonnes en 2014) n'est pas traitée dans des filières spécifiques et termine en incinération ou en décharge. Même quand ils sont triés, une partie importante des déchets est exportée comme matériel d'occasion (pour circonvenir à la convention de Bâle) et termine dans les circuits « informels » de recyclage, au Ghana, en Inde ou en Chine (cf. la ville de Guiyu), provoquant la pollution irréversible des sols et des nappes phréatiques.

Il est d'ailleurs impossible d'atteindre un recyclage efficace à 100 %. Il y a toujours des pertes de rendement, des limites énergétiques, techniques (cas du tantale), ou économiques (cas du lithium, trop cher à recycler actuellement, par rapport au prix de la ressource primaire), et les métaux sont trop mélangés, ou trop dispersés, en quantités infimes dans des produits trop complexes. On se contente souvent de récupérer quelques métaux « rentables », comme l'or, l'argent et les platinoïdes. De nombreux métaux *high tech* sont recyclés à moins de 1 %.

Tant que nos objets électroniques seront aussi complexes (voir par exemple la liste type des équipements et des fonctionnalités d'un *smartphone*, qui va des deux caméras au gyroscope à trois axes, en passant par le thermomètre, l'hygromètre, le baromètre et l'accéléromètre), leur recyclage en fin de vie sera un cauchemar et nous continuerons à gaspiller de précieuses matières premières. Sans parler bien sûr de la durée de vie trop courte (obsolescence, technique ou marketing obligent) et de la multiplication des équipements.

L'autre problème majeur est la consommation électrique, nécessaire pour faire fonctionner les terminaux, mais aussi tout le système, équipements de transmission et centres de données. Ces derniers dégagent tellement de chaleur qu'ils doivent en outre être climatisés ou placés à proximité de sources froides, comme en Finlande. L'électricité totale consommée par le secteur n'est pas simple à estimer et les chiffres varient quelque peu – notamment selon le périmètre retenu (prise en compte des terminaux utilisateurs ou non, par exemple) – mais les sources s'accordent autour de 10 % de toute l'électricité mondiale actuellement, et le chiffre est en forte progression[8].

Les centres de données dégagent tellement de chaleur qu'ils doivent être climatisés.

Bien sûr, des progrès techniques pour réduire la consommation énergétique sont et vont être faits[9]. Mais tous ces gains sont annihilés par un fabuleux « effet rebond » : le volume des données échangées et stockées explose. En moyenne, 17 000 giga-octets de données ont été échangés par seconde sur internet en 2012, un chiffre multiplié par huit en cinq ans, et qui devrait être encore multiplié par 3 d'ici 2017. La quantité stockée se chiffre en zetta-octets (milliers de milliards de giga-octets). Et l'avènement du *big data*, c'est-à-dire la massification et la multiplication des données brutes captées et conservées à des fins d'analyse et d'exploitation futures, promet de faire là aussi bondir les chiffres.

Enfin, internet n'est pas gratuit. S'il en donne certes l'illusion, avec les programmes *open source*, l'information, l'enseignement (développement des « mooc »[\[10\]](#)), les sites collaboratifs, les plateformes de messagerie et de stockage... il faut en réalité bien payer les équipements installés, les factures d'électricité, les salaires du personnel de nettoyage ou de surveillance des *data centers*. Ceci de façon visible (par les redevances d'accès au réseau, encaissées par les opérateurs de télécommunications), ou de façon invisible, grâce à la publicité et au *profiling* : si vous ne payez pas un service, vous n'êtes pas le consommateur, mais le produit vendu. Nous payons donc bien internet, et au prix fort, mais sans nous en rendre compte, à travers le prix des produits de consommation qui contiennent une part croissante de budget publicitaire.



## Le fantasme de l'énergie abondante

Poursuivant sur sa lancée, Rifkin annonce la gratuité future de l'énergie : les gains de productivité et les effets d'échelle dans la fabrication de panneaux solaires et autres renouvelables vont faire tendre leurs coûts vers zéro, permettant leur déploiement massif et leur interconnexion par les *smart grids* dans un « très jeune » internet de l'énergie. Et donc pourquoi ne serait-il pas « gratuit » lui aussi ?

Le coût des panneaux solaires a effectivement baissé de manière importante ces dernières années, et il devrait continuer de le faire, avec le développement des volumes produits et installés. Les mauvaises langues expliqueront une partie significative de la baisse simplement par le fait que la production s'est déplacée, assez tardivement, des pays occidentaux vers la Chine (où il faudra bien continuer à payer, au moins un peu, les ouvriers des usines). Mais surtout, hélas, projeter la tendance des fabuleux gains de productivité et de chute des prix des équipements informatiques est très cavalier. Les courants forts ne sont pas les courants faibles, on ne transporte pas les électrons comme les photons, on ne stocke pas l'énergie aussi aisément que des octets, bref, il n'y a pas de « loi de Moore[\[11\]](#) » dans le domaine énergétique.

Certes, la Terre reçoit chaque jour une quantité d'énergie solaire plusieurs milliers de fois plus grande que nos modestes (!) besoins. Mais pour produire, stocker, transporter l'électricité, même « verte », il faut des métaux en quantité : platine des piles à hydrogène, néodyme dopé au dysprosium pour les génératrices d'éoliennes de forte puissance ou des voitures électriques, gallium, sélénium et indium, ou cadmium et tellure des panneaux solaires à haut rendement... et métaux rares de l'électronique pour les futures *smart grids*.

Or nous allons connaître des contraintes sur l'offre minière. Nous avons commencé, très logiquement, par exploiter les gisements les plus riches, les plus concentrés, les plus simples à extraire, si bien que la qualité et l'accessibilité des ressources se dégradent, à l'exception peut-être du fer et de l'aluminium, qui composent respectivement 5 % et 8 % de la croûte terrestre. Les nouvelles mines, qui remplacent celles qui s'épuisent ou accompagnent la croissance de la demande, ont des teneurs en minerais plus faibles ou bien sont moins accessibles et plus difficiles à exploiter.

Si les mines sont plus profondes ou moins concentrées, il est nécessaire de dépenser plus d'énergie, et même plus de métaux pour l'ensemble du système de production. Il faut remuer toujours plus de « stériles » (plus de 2 milliards de tonnes rien que pour le cuivre, avec une production minière

mondiale de 18 millions de tonnes à moins de 1 % de concentration), ou bien la profondeur engendre des contraintes, de température en particulier, qui nécessitent des opérations plus complexes (refroidissement, mécanisation, robotisation...). Huit à dix pour cent de l'énergie primaire mondiale, essentiellement fossile, sont déjà consacrés à extraire et réduire les minerais en métaux.

Le cercle vicieux entre besoins en énergie et besoins en métaux rend irréalistes tous les scénarios d'abondance énergétique.

Ce cercle vicieux entre besoins en énergie et besoins en métaux, qui se renforcent mutuellement, rend irréalistes tous les scénarios d'abondance énergétique. Tout dépendra *in fine* des technologies retenues, plus ou moins consommatrices de ressources métalliques plus ou moins disponibles (et même les panneaux au silicium les plus courants ne contiennent pas que du silicium), mais il est fort probable que le déploiement massif d'énergies renouvelables, de voitures électriques ou de batteries de stockage (n'en déplaise à Elon Musk[12]) se heurte à une limite sur les ressources minières ou, à tout le moins, à une augmentation prohibitive du coût des ressources minières.

Et penser qu'un recyclage efficace permettrait de passer outre cette contrainte est illusoire. Il y a d'importantes limites physiques, techniques et économiques à une économie parfaitement circulaire : les usages dispersifs (95 % du titane est ainsi utilisé comme colorant dans les peintures, les plastiques, les cosmétiques...); la complexité des produits qui ne permet pas de séparer d'un point de vue métallurgique toutes les ressources mélangées; la dégradation de l'usage après recyclage (des ressources précieuses se retrouvent piégées dans des alliages de bas de gamme)[13]...



## L'imprimante 3D et la yaourtière

Reste à parler du potentiel des imprimantes 3D, grâce auxquelles, selon Rifkin, les enfants imprimeront leurs jouets à l'école au lieu de les acheter. Leur principe est de fabriquer les objets couche par couche. Pour cela, une poudre de polymère thermoplastique (polyamide, polypropylène...) ou de métal (aluminium, acier inox, titane...) est portée à température de fusion et déposée par l'imprimante sur la couche précédente. Il s'agit d'une technologie additive, effectivement « révolutionnaire » par rapport à l'usinage soustractif : perçage, filetage, découpage... sans parler de la toute première industrie, la taille du silex. À n'en pas douter, des applications intéressantes en perspective. Mais de là à en faire « la machine à vapeur du XXI<sup>e</sup> siècle », ou à clamer, comme Rifkin, la disparition de la production classique et la gratuité future de nos objets de consommation, il y a un pas ! Bien peu d'objets sont en fait éligibles à cette technologie.

Les imprimantes 3D ne peuvent remplacer les usines de matières premières, hauts fourneaux sidérurgiques, cimenteries, verreries, ou raffineries (mêmes « bio »), et même les matières recyclées, verres ou métaux, nécessitent un outil industriel, ne serait-ce qu'un four... Elles ne peuvent fabriquer que des objets mono-matériau, et non ceux issus d'assemblages, qui nécessitent un montage (à la main souvent, dans des *manufactures*). On peut imprimer des pièces aéronautiques complexes, une carrosserie de voiture, des chaussures en résine, et peut-être des « maisons » (à base de panneaux en fibre de nylon, voire en ciment); mais pas un piano ni un téléphone portable.

On peut imprimer des pièces aéronautiques complexes, mais pas un piano ni un téléphone portable.

Ajoutons que dans les imprimantes « à encre métallique », le métal est porté à température de fusion par laser ou faisceau d'électrons, une technologie coûteuse et énergivore, inimaginable chez les particuliers. Les imprimantes 3D « grand public » à la résine ne fabriqueront ni clou, ni vis. Enfin, seules les matières premières qui supportent la fusion peuvent être utilisées : les étoffes continueront à être tissées et cousues ; le métal ne convient que s'il n'a pas à subir de traitement thermique ou de trempé, le verre s'il n'est pas filmé, etc.

Comment Rifkin fabriquera-t-il gratuitement les bobinages en cuivre des moteurs électriques de ses *Google cars*, le silicium de ses panneaux solaires, le ciment et le ferrailage des ponts, ses chaussures en cuir, ou la peinture et le carrelage de sa salle de bains ?

La belle unanimité des politiques, du patronat, des syndicats et des associations, béats et enthousiastes devant la formidable opportunité de ces technologies numériques, fait peine à voir. Les uns y voient des gains de productivité supplémentaires, comme si l'on manquait de bras dans nos pays à chômage chronique. D'autres y espèrent une relocalisation de l'économie, des créations d'emplois et des effets écologiques vertueux, et devront bientôt déchanter.

Quant aux imprimantes 3D « grand public » que quelques gogos auront achetée, elles ont pour l'essentiel vocation à rejoindre, après quelques après-midis ennuyeux, les yaourtières, les machines à pain et les appareils à raclette.



## La berceuse est douce, mais...

Voilà qui rend la prospective de Rifkin bien peu crédible. Dommage, car elle inclut aussi de bonnes idées, comme le partage et la possibilité de réduire la production industrielle en révisant notre rapport à la propriété, avec l'exemple des voitures trop nombreuses ou des jouets qui s'entassent dans les greniers. Mais le message de sobriété est noyé dans un déploiement fanatique d'objets connectés et de *big data*, dont on commence pourtant à saisir l'effet mortifère sur les besoins en électricité et en ressources.

En se berçant de doux rêves, nous perdons un temps précieux ! Nous n'allons pas, à terme, vers la gratuité et l'abondance, mais vers l'appauvrissement et la pénurie, puisque notre système industriel puise dans un stock limité de ressources, métalliques notamment.

Nous sommes fascinés par les innovations *high tech*, alors que celles-ci nous éloignent de la possibilité d'un recyclage efficace, et qu'il faudrait au contraire, pour réussir le pari d'une économie vraiment circulaire, se baser essentiellement sur des « basses technologies » : des objets conçus pour durer, sobres en ressources, à base de matériaux plus simples et moins mélangés, moins « fonctionnels » mais plus faciles à réparer et à recycler, avec le moins d'électronique possible... Dans tous les domaines (transports, agriculture, énergies, bâtiment, communications, consommation courante), il existe une foultitude d'idées, d'exemples, de recherches et d'innovations possibles[14].

Il faudra bien en passer par la sobriété.

Et, surtout, il faudra bien en passer par la sobriété, puisqu'il n'y a pas de solution technologique miracle à l'impasse environnementale actuelle pour maintenir notre consommation dispendieuse d'énergie et de matières. Alors de grâce, Monsieur Rifkin, sortez des salles de conférence et visitez l'envers du décor, par exemple une usine ou une exploitation minière.

---

[1] Et si la situation environnementale semble peut-être s'améliorer ici et là dans quelques pays occidentaux, ils le doivent pour l'essentiel à l'externalisation massive de leur pollution vers les « usines du monde » que sont la Chine et bientôt l'Inde.

[2] Expression entendue à un colloque du CNRS : preuve des velléités de nos scientifiques à gérer (le mieux possible) l'ensemble de la planète à l'aube de cette nouvelle ère de l'*Anthropocène*, où l'humanité est devenue force géologique.

[3] Jeremy Rifkin, *L'économie hydrogène : Après la fin du pétrole, la nouvelle révolution économique*, La Découverte, 2002.

[4] Jeremy Rifkin, *La troisième révolution industrielle : Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Les liens qui libèrent, 2012, 380 p.

[5] Jeremy Rifkin, *La nouvelle société du coût marginal zéro. L'internet des objets, l'émergence des communaux collaboratifs et l'éclipse du capitalisme*, Les Liens qui libèrent, 2014, 510 p.

[6] La consommation de papier en France n'a baissé que de 1,3 % entre 2000 et 2010, on fait mieux pour une « révolution » de la dématérialisation...

[7] Groupe de 17 métaux aussi appelés « terres rares ». Il ne faut pas confondre terres rares et métaux rares : il y a des métaux bien plus rares que les terres rares, dont l'abondance moyenne dans la croûte terrestre n'est pas particulièrement faible.

[8] Soit de l'ordre de 2 000 TWh (milliards de kWh) sur 20 000 TWh. Sans doute plus de 10 % dans les pays de l'OCDE (en 2008, l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes – Arcep – l'estimait déjà à 7,3 % en France). L'Agence internationale de l'énergie estime le poids du fonctionnement des seuls centres de données et réseaux à 600 TWh en 2012 (*International Energy Agency : More Data, Less Energy*, 2014).

[9] Cf. la tendance sur les *green IT*, qui inclut un vaste champ de réflexions, de l'optimisation des logiciels à la mutualisation intelligente des serveurs grâce au *cloud*.

[10] *Massive open online courses* (formations en ligne ouverte à tous).

[11] Lois empiriques, énoncées par Gordon E. Moore, un des trois fondateurs d'Intel, en 1965 et 1975, postulant le doublement de la densité des transistors tous les deux ans environ, permettant de construire des machines électroniques de plus en plus puissantes et de moins en moins coûteuses. Ces lois se sont révélées jusqu'à présent exactes.

[12] Entrepreneur devenu multimillionnaire après la revente à eBay de Paypal, qu'il avait cofondé, il est aujourd'hui propriétaire de Tesla Motors, qui fabrique des véhicules électriques, et se lance, à

grand coups de *storytelling*, dans les batteries pour stockage du photovoltaïque solaire.

[13] Pour plus de détails sur ces sujets, cf. Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon, *Quel futur pour les métaux*, EDP Sciences, 2010, 300 p.

[14] Philippe Bihouix, *L'âge des low tech, Vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, 2014, 336 p.