m'empêchera sans doute pas de m'écraser. Comme dit le fou qui insère une nouvelle pièce dans le distributeur de boissons : « Tant que je gagne, je joue ! »

Bien sûr, vous allez me dire que l'on nous a déjà fait le coup, que « cela commence à bien faire » : de Malthus à Dennis Meadows et son rapport au Club de Rome en 1972, des alarmistes du XIXe siècle criant au loup sur les réserves de charbon ou de minerais, à cette récente histoire de *peak oil* dont on nous rebat les oreilles, mais sans voir venir grand-chose. Certes, les prix de l'essence et du diesel augmentent, mais, franchement, pas tellement plus que tout le reste : les loyers, l'immobilier, la baguette de pain ou le café au comptoir – surtout depuis le passage à l'euro, non ? Et si l'on compare l'évolution depuis les années 1970 du salaire horaire minimal et du prix au litre de l'essence, clairement le carburant est de nos jours nettement moins cher : il faut travailler moins longtemps pour faire le plein de sa voiture, et en plus celle-ci consomme moins – par contre, l'évolution urbaine et les habitudes nous font faire plus de kilomètres.

Pour les thuriféraires de la technique, tout paraît plutôt bien ficelé : pour l'énergie, on finira bien par avoir la fusion nucléaire ou au moins les surgénérateurs qui régleront le problème des réserves limitées d'uranium 235. Ou, pour les plus « verts », des renouvelables bien propres et de l'hydrogène à gogo pour le stockage et les voitures. Et, en attendant, le nucléaire de génération 3 (type EPR), les gaz et les pétroles de schiste nous permettront largement de voir venir ! Contre

le changement climatique, on fera de la capture et du stockage de CO_2. Quant au problème des métaux, c'est simple, puisqu'ils sont recyclables à l'infini : vive « l'économie circulaire » ! Et pour la production alimentaire mondiale, les plantes génétiquement modifiées, avec en complément l'aquaculture pour faire face à l'effondrement avéré des stocks de poissons sauvages.

Malheureusement, cette vision idyllique repose sur une grave méconnaissance de plusieurs phénomènes physiques et du caractère « systémique » de notre société industrielle, et sur un certain optimisme – certes confortable ! – face aux grandes difficultés à surmonter. Regardons cela d'un peu plus près.

Qualité et accessibilité des ressources : rendement énergétique et « *peak everything* »

Encore un lieu commun : notre société industrielle est désormais largement fondée sur l'exploitation de ressources non renouvelables. Pour faire simple, disons qu'il s'agit essentiellement des énergies fossiles et des métaux.

Les énergies fossiles nous fournissent plus de 87 % de notre énergie primaire (hors biomasse non commerciale) *(figure 2)*, tandis que les renouvelables ne représentent que 8 % (dont 4/5 en hydroélectricité), et le nucléaire les derniers 5 %. Les métaux sont disponibles en quantité limitée et géographiquement mal répartie, à l'exception notable du fer et de l'aluminium, dont les quantités dans la croûte terrestre sont très

importantes, respectivement 5 % et 8 %, et dont l'exploitation est une problématique avant tout énergétique.

Oui ou non, nos capacités technologiques, actuelles et à venir, permettront-elles de faire face, à court, moyen et long termes aux risques de pénuries sur ces deux catégories de ressources ? C'est-à-dire de transformer des *ressources* (potentiellement exploitables) en *réserves* (effectivement exploitables, au niveau de technologie pratiqué et au prix du marché) ? Par définition, on peut augmenter les réserves en trouvant de nouvelles ressources par exploration, en améliorant les techniques d'exploitation et de production, ou en faisant monter le prix. Dans les deux premiers cas, les connaissances techniques et scientifiques sont effectivement fort utiles.

Que ce soit pour les énergies fossiles ou pour la plupart des métaux, les ressources potentielles encore sous terre (ou sous mer) sont gigantesques : les désormais fameux pétroles et gaz de schiste, les nodules polymétalliques sous-marins, voire les hydrates de méthane et autres encroûtements cobaltifères. On peut théoriquement aller très loin dans l'exploitation et tenir, en fonction des hypothèses, des décennies voire des siècles (personne ne se pose la question au-delà, même si cela a d'étranges implications morales sur la consommation d'un stock fini, mais bon). Toutefois, il y a un problème de qualité, d'accessibilité de ces ressources, car nous avons, c'est compréhensible, commencé par taper dans le stock qui était le plus facilement exploitable, le plus riche, le plus concentré.

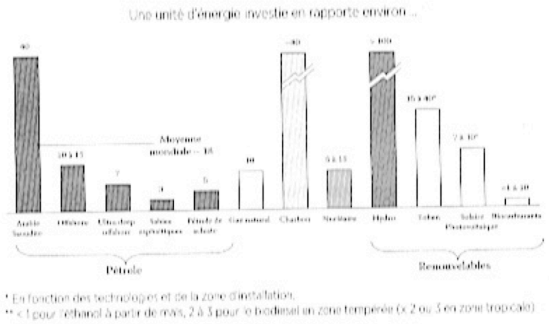
Si vous interrogez des spécialistes des métaux, la plupart vous diront qu'il n'y a pas de problème fondamental. Certes la qualité des minerais – leur concentration en métal – est en forte baisse (cuivre, zinc, plomb…), avec l'épuisement des grandes mines à forte teneur en métal. Mais il suffira de creuser plus profond, d'extraire plus de minerai de moindre qualité. « Toute chose égale par ailleurs », donc, il n'y a pas de risque de pénurie. Cependant, il faudra dépenser plus d'énergie par tonne de métal produite : et c'est là que les ennuis commencent.

Qualité des ressources énergétiques

Chez les spécialistes de l'énergie, la réponse est plus ambiguë, car il faut tenir compte d'un facteur supplémentaire. Vous pouvez vous permettre d'exploiter un minerai contenant seulement 3 ou 5 g d'or par tonne, ce n'est qu'une question d'énergie à y mettre pour extraire, charrier, broyer la tonne en question, donc de prix à payer à l'arrivée pour votre métal précieux. Il en va autrement pour l'énergie. Ici, il faut s'assurer de récupérer nettement plus d'énergie que ce qui a été investi, puisque votre but est justement de « produire » de l'énergie. C'est le rendement, ou « retour sur investissement » énergétique (en anglais EROI, *Energy Return On Energy Invested*). Et justement, celui-ci varie fortement en fonction de la ressource *(figure 3)*.

C'est particulièrement vrai pour le pétrole. Ainsi, alors qu'il ne faut, depuis les années 1930, « investir » que 2 ou 3 barils de

pétrole pour en produire 100 dans les champs géants *onshore* d'Arabie Saoudite (soit un rendement autour de 40), il faut en investir 10 à 15 pour produire ce même pétrole *offshore*. On atteint le ratio époustouflant de 1 baril pour en produire 3 dans le cas des sables asphaltiques de l'Athabasca (Canada). En l'espèce, ce baril d'énergie est investi sous forme de gaz naturel, qui sert à chauffer le sable pour extraire et liquéfier le pétrole (le « bitume ») qui y est mêlé. En clair, on brûle du gaz pour produire deux à trois fois plus de pétrole.



* En fonction des technologies et de la zone d'installation.
** < 1 pour l'éthanol à partir de maïs, 2 à 3 pour le biodiesel en zone tempérée (x 2 ou 3 en zone tropicale)

Figure 3 - Le « retour sur investissement » énergétique (EROI)
(Sources : David J. Murphy et Charles A. S. Hall, 2010-2011)

Il reste donc encore beaucoup d'énergie fossile sous nos pieds, mais il faut mettre toujours plus d'énergie pour l'extraire,

et la mise en production est de plus en plus compliquée. Le pétrole est emblématique, car c'est le premier à subir cette forte dégradation de l'accessibilité et de la qualité des ressources, au point que le pétrole dit « conventionnel » (c'est-à-dire, *grosso modo*, avec un rendement énergétique acceptable...) a ainsi passé son pic de production – le *peak oil* – dès 2006.

Les ressources de charbon et de gaz naturel sont plus importantes, malheureusement pour le climat de la planète, mais là aussi les pics de production finiront par être atteints, peut-être dans les décennies 2020-2030. Cela pourrait même s'accélérer, car la raréfaction du pétrole, source unique et difficilement substituable d'énergie dans les transports *(figure 4)*, pousse à produire des carburants liquides à partir de charbon ou de gaz – le *Coal-to-Liquids* (CTL) ou *Gas-to-Liquids* (GTL). Il s'agit du procédé Fischer-Tropsch, mis au point dans les années 1920 et développé par l'Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale, afin de produire le kérosène de la Luftwaffe à partir de ses mines de charbon. Plus tard, l'Afrique du Sud sous embargo pétrolier en est devenue la spécialiste mondiale.

Du peak oil au peak everything

Mais pour en revenir à la question métallique, des énergies fossiles moins accessibles entraînent également un besoin accru en métaux : il suffit de comparer un simple puits texan avec son homologue *deep offshore*, gigantesque plateforme métallique entourée d'une nuée de bateaux de ravitaillement, d'hélicoptères,

des forages directionnels de haute technologie, etc. Mauvaise nouvelle, c'est également le cas pour les énergies renouvelables, qui font massivement appel aux ressources métalliques, et des plus rares, comme le néodyme et le dysprosium dans les aimants permanents pour les génératrices d'éoliennes, le gallium, l'indium, le sélénium, le cadmium ou le tellure pour les panneaux photovoltaïques à haut rendement (technologies CIGS ou Cd-Te), le cuivre qui est utilisé en quantité plus importante par unité d'énergie produite…

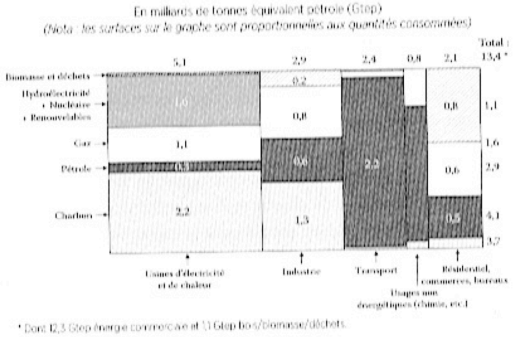


Figure 4 - Utilisation de l'énergie primaire par secteur
Source : Agence internationale de l'énergie (analyse de l'auteur)

Nous pourrions nous permettre des tensions sur l'une ou l'autre des ressources, énergie ou métaux. Mais le défi est que

nous devons maintenant y faire face à peu près en même temps : plus d'énergie nécessaire pour les métaux moins concentrés, plus de métaux nécessaires pour une énergie moins accessible. Le pic de pétrole sera donc vraisemblablement accompagné ou suivi d'un pic de tout, un « *peak everything* »[19]. Et, pour décevoir les plus optimistes, on n'ira pas chercher nos ressources métalliques futures sur la Lune ou sur des astéroïdes car la dépense énergétique est tout simplement inacceptable, tandis que les milliers d'années d'énergie nucléaire ne tiennent pas la route puisqu'il faut reconstruire des centrales une ou deux fois par siècle, sans pouvoir recycler les matériaux qui ont été irradiés. Ainsi, même avec des surgénérateurs, il faut résister à la température, la pression, la chaleur, la corrosion, l'irradiation. Dans quelques siècles ou millénaires, comment fera-t-on sans nickel, titane, cobalt ou tantale nécessaires aux alliages à haute performance employés dans la robinetterie nucléaire ? Sans zirconium pour emballer les « crayons » de combustible ? Sans plomb pour absorber les radiations et sans tungstène pour les conteneurs de combustible nucléaire ? Sans hafnium, cadmium, indium, argent, sélénium ou bore pour absorber les neutrons dans les barres de commande et de contrôle ?

Ce pic géologique et énergétique sera vraisemblablement renforcé par un pic « systémique », car d'autres facteurs viendront aggraver les causes purement physiques et techniques : problèmes d'accès sécurisé aux ressources dans des zones instables, de disponibilité du personnel, par exemple de géologues confirmés (car la profession a peu embauché depuis

vingt ans), pour gérer la croissance de la demande ; soubresauts de la crise économique et financière, qui peut refroidir les investisseurs, les nouveaux projets miniers se chiffrant en milliards de dollars.

Limites de l'économie circulaire

Bien sûr, il y a une autre différence entre l'énergie et les métaux : ceux-ci, une fois extraits, ne sont pas perdus comme les énergies fossiles parties en fumée. Il suffirait donc de les recycler indéfiniment, une fois extraite la quantité adéquate (mais laquelle ?) de métaux nécessaires à notre société. Même si, en réalité, en vertu du second principe de la thermodynamique, on en dissipe toujours un peu, que ce soit au moment du recyclage lui-même (la perte au feu) ou pendant l'usage (la pièce de monnaie qui s'use imperceptiblement au fil du temps, car « le fer et le cuivre se vont usant et consumant par le seul attouchement des mains de l'homme[20] »).

Malheureusement, il existe des limites physiques, techniques et sociétales au recyclage dans un monde aussi technicisé que le nôtre. D'abord, certains matériaux, comme les polymères thermodurcissables (polyuréthanes par exemple), ne peuvent tout simplement pas être refondus. D'autres, comme les emballages alimentaires ou médicaux, sont souillés et inexploitables.

Ensuite, la complexité des produits, des composants (dizaines de métaux différents dans un téléphone portable ou

un ordinateur) et des matières (milliers d'alliages métalliques différents, mélanges de plastiques et d'additifs, matériaux composites) nous empêche d'identifier, de séparer et de récupérer facilement les matières premières. Ainsi du nickel, pourtant facilement repérable (aciers inoxydables) et assez coûteux, qui n'est recyclé correctement qu'à 55 %. 15 % sont bien captés et recyclés, mais perdus « fonctionnellement » ou avec « dégradation de l'usage » car ils ont été noyés dans de l'acier carbone de bas de gamme, tandis que 35 % sont égarés entre mise en décharge et incinération. En trois cycles d'utilisation, on perd donc de l'ordre de 80 % de la ressource. Et il s'agit d'un métal plutôt bien recyclé, le pourcentage de récupération ne dépassant pas 25 % pour la plupart des « petits » métaux.

Enfin, pour une part non négligeable, les métaux font également l'objet d'usages dispersifs, donc non recyclables. Ils sont utilisés comme pigments dans les encres et les peintures, comme fertilisants, additifs dans les verres et les plastiques, pesticides *(figure 5)*… On touche parfois dans ce domaine à l'absurde, jusqu'à utiliser de l'argent – aux propriétés antibactériennes – sous forme nanométrique dans des chaussettes, comme *technologie anti-odeurs* !

Perte par dispersion (à la source), perte mécanique (la boîte de conserve, l'agrafe et le stylo partis en décharge), perte fonctionnelle (par recyclage inefficace), perte entropique (marginale) : tel est notre destin, le cercle vertueux du recyclage est percé de partout, et à chaque « cycle » de consommation on perd de manière définitive une partie des ressources. On

n'ira pas gratter la peinture anticorrosion à l'étain et au cuivre sur les vieux bateaux. On n'ira pas ramasser, sur le bitume des autoroutes, les particules de zinc, de cobalt (usure des pneus) ou de platine (faibles rejets des pots catalytiques). Et on ne sait pas récupérer tous les métaux présents, en quantités infimes, sur une carte électronique.

Métal	% usage dispersif (chimie hors catalyse)	Exemples d'applications
Cadmium	20 %	Pigments (plastique, verre, céramique), stabilisant (plastique)...
Chrome	~ 10 %	Pigments, tannage des cuirs...
Cobalt	12 %	Pigments, pneus, colles, savons, siccatifs...
Étain	14 %	Stabilisant (PVC), peintures anti-algues, préservation (bois)...
Manganèse	10 %	Piles, additif (céramique), pharmacie, purification (eau)...
Molybdène	~ 30 %	Pigments, lubrifiants...
Plomb	12 %	Additif (verre/cristal, céramique), stabilisant (PVC), pigments...
Titane	95 %	Pigments, cosmétiques, dentifrices...
Zinc	6 %	Pigments, pneus, cosmétiques, pharmacie...

Figure 5 - Usages dispersifs pour quelques métaux
(Sources : Société française de chimie, BRGM (Mineralinfo), fédérations industrielles.)

Monter les taux de recyclage est donc une affaire très compliquée, qui ne se limite pas à la faculté de collecter les produits en fin de vie et de les intégrer dans une chaîne de traitement. Dans de nombreux cas, il serait nécessaire de revoir en profondeur la conception même des objets, tant pour les composants utilisés – la carte électronique avec des dizaines de métaux différents présents – que pour les matières premières même : mélanges de composés organiques et minéraux, comme

dans la plupart des plastiques, objets imprimés comme les boîtes de conserve...

Emballement de la croissance « verte »

Or, les technologies que nous espérons salvatrices ne font qu'ajouter à ces difficultés. En misant sur le tout-technologique pour notre lutte contre le changement climatique, nous risquons fort de créer de nouvelles pénuries (elles-mêmes nécessitant un recours accru à l'énergie) et d'accélérer ainsi le système de manière involontaire. Car les « technologies vertes » sont généralement basées sur des nouvelles technologies, des métaux moins répandus et contribuent à la complexité des produits, donc à la difficulté du recyclage. Prenons quelques exemples.

Pour réduire de quelques grammes les émissions de CO_2 par kilomètre, sans renoncer ni à la taille ni aux performances (principalement la vitesse et la résistance au choc) des véhicules, la seule solution, en dehors du rendement du moteur lui-même, est de les alléger. Pour cela, on utilise des aciers de haute performance, toujours plus complexes, alliés avec de petites quantités de métaux non ferreux (manganèse, vanadium, niobium, titane...) : non seulement ceux-ci ne sont plus récupérables en fin de vie (et sont recyclés en acier carbone pour armatures à béton du bâtiment), mais le niveau attendu de « pureté » des alliages est tel qu'il est nécessaire d'y employer des aciers de première fonte.

Les bâtiments basse consommation ou à énergie positive sont eux aussi consommateurs de nombreuses ressources rares : équipements bourrés d'électronique (capteurs, gestion technique du bâtiment, micromoteurs des stores électriques automatiques…), additifs dans les verres faiblement émissifs, etc.

Pour développer les énergies renouvelables de manière significative, sans remise en cause de nos exigences en termes de continuité de service, il serait (sera ?) nécessaire de relier les milliers d'éoliennes, de « fermes » photovoltaïques et de dispositifs de stockage (dans les batteries de véhicules, sous forme de méthane, d'hydrogène, etc.) par des *smart grids* (réseaux intelligents) afin de permettre à tout instant l'équilibre entre une offre erratique et intermittente et une demande variable, avec des consommateurs qui seront connectés par des compteurs eux aussi « intelligents » et communicants (Linky d'ERDF, en phase pilote) permettant d'effacer la demande. Un tel *macro-système technique* sera basé sur de très nombreux équipements *high tech*, bourrés d'électronique et de métaux rares.

Effet parc et effet rebond

Problème d'échelle : l'effet parc

Bien sûr des innovations techniques intéressantes peuvent apparaître et se développer : il peut s'agir de nouveaux produits (comme des isolants plus performants pour les habitations)

ou de procédés industriels plus efficaces (plus économes en énergie ou en intrants, ou moins polluants). Mais on se heurte à un problème d'échelle, à un « effet parc » : comment assurer, assez rapidement, le remplacement de l'existant et le déploiement généralisé des nouvelles technologies ?

De dix à vingt ans sont nécessaires pour que l'ensemble du parc automobile se renouvelle, et donc atteigne le niveau de la dernière norme en vigueur. Dans le bâtiment, il faudra des décennies, voire un siècle, même à un rythme accéléré de rénovation urbaine et d'isolation thermique, pour arriver à un niveau de consommation énergétique acceptable sur l'ensemble du parc existant. Sans compter que de très nombreux bâtiments (qui font souvent partie de notre patrimoine historique) ne pourront jamais atteindre ces niveaux acceptables, car ils n'ont pas été conçus pour (pas d'isolation par l'extérieur notamment)… à moins de renoncer tout simplement à les chauffer correctement !

Quant aux procédés industriels plus efficaces, on se heurte à la question de la valeur comptable des installations existantes, qui doivent être amorties avant d'être modifiées. Deux exemples sont particulièrement parlants.

Les centrales électriques à charbon « classiques » ont un rendement de l'ordre de 35 à 40 % (conversion de l'énergie du charbon en électricité). Il existe depuis plusieurs années des centrales dites supercritiques ou ultra-supercritiques, dont le rendement monte jusqu'à 45 voire 50 % (un gain littéralement énorme). Cependant, elles sont plus coûteuses, donc

pas forcément intéressantes à installer. La plupart des centrales chinoises récentes (dans les années fastes comme 2007-2008, la Chine en installait une par semaine, soit la capacité électrique de la France, nucléaire compris, chaque année) sont de type classique. Vu la durée de vie de ces centrales, il ne faut donc pas espérer de gain de rendement et d'économies d'émission de CO_2 avant des décennies.

Certains techniciens et experts pétroliers poussent au développement de la technologie de captage et séquestration du CO_2 : il s'agit de récupérer les émissions des centrales électriques et grosses usines (cimenteries, hauts-fourneaux) pour les stocker dans des aquifères salins ou d'anciens champs pétroliers et gaziers. C'est ce que l'on appelle le charbon propre (délicieux oxymore). Il y a des pertes de rendement (pour capter, transporter, compresser le gaz) et potentiellement des risques, mais cette technologie est vue par les plus hautes instances internationales comme un levier contre le changement climatique, puisque les besoins en électricité vont croissant et que le charbon est incontournable. Mais, entre le temps de mise au point de la technologie et la durée de vie de chaque centrale, il est probable que le siècle sera sérieusement entamé avant qu'il y ait le moindre effet significatif.

Il en va de même pour de nombreuses innovations. La prochaine fois que vous tombez sur un article proposant une belle infographie sur le transport de fret à la voile ou par dirigeable… pensez aux milliers de porte-conteneurs, de minéraliers, de pétroliers, qui sillonnent les océans.

Exemple des énergies renouvelables

Indéniablement nous pouvons, et devons, développer les énergies renouvelables. Mais ne nous imaginons pas qu'elles pourront remplacer les énergies fossiles et nous permettront de maintenir la débauche énergétique actuelle. Les promoteurs de projets titanesques qui font régulièrement la une des grands journaux et magazines, selon plusieurs variantes comme Desertec ou le plan B « Wind Water Sun » de Mark Z. Jacobson de l'université Stanford, font pourtant semblant d'y croire.

Desertec propose l'installation, d'ici 2050, de vingt centrales solaires à concentration (CSP) dans le Sahara, afin de produire 700 TWh (milliards de kWh) par an (13 % de la consommation électrique européenne *actuelle*). Et ce pour 400 milliards d'euros, inclus les lignes à haute tension. Ce qui en fait une électricité à peu près aussi chère que celle de l'EPR de Flamanville (avec 8,5 milliards d'euros pour 13 TWh/an, selon les dernières annonces), ce qui n'est pas peu dire. D'ailleurs, preuve de la viabilité économique bien incertaine du projet, la plupart des industriels partenaires s'en sont récemment retirés, mais les beaux effets d'annonce n'en sont pas moins restés dans notre inconscient collectif.

Certes, un quadrilatère de quelques dizaines ou centaines de kilomètres de côté dans le Sahara pourrait fournir toute l'électricité mondiale, mais ces calculs de coin de table ne veulent rien dire. Pour produire les 22 000 TWh de la consommation

électrique mondiale (en 2011), il faudrait installer l'équivalent de cinq cents années de production actuelle de panneaux solaires (ou, plus modestement, cent vingt années pour la consommation électrique européenne) ! Sans oublier qu'au bout de quarante ans au plus, il faudrait tout recommencer, étant donné la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Et qui passerait le balai à chaque tempête de sable sur les dizaines de milliers de kilomètres carrés de panneaux ?

Encore faut-il ne pas confondre électricité mondiale et énergie mondiale : je vous passe les assommants calculs (ne pas confondre énergie primaire et énergie finale, comparer les rendements des moteurs thermiques et électriques…), mais il faudrait alors au bas mot deux mille années de production de panneaux solaires. Bien sûr, je suis un peu de mauvaise foi, car on peut faire de la croissance (verte) des capacités de production, par exemple les décupler (on l'a déjà largement fait par le passé) ou les centupler. Mais quel défi industriel, tellement improbable ! Il faudrait commencer par construire des *usines d'usines* de panneaux, des bases logistiques monstrueuses… sans parler, surtout, de la disponibilité en métaux, en matériaux synthétiques, issus du pétrole et difficilement recyclables.

« Wind Water Sun » propose de couvrir les besoins en énergie de l'ensemble du monde, uniquement avec des renouvelables, d'ici 2030. Pour cela, il faudrait installer 3,8 millions d'éoliennes de 5 MW et 89 000 centrales solaires de 300 MW chacune (on admirera la précision toute mathématique des

chiffres). En s'y mettant en 2015, il faudrait donc installer en quinze ans 19 000 GW d'éoliennes : sachant que l'on en a installé 40 GW au plus par an ces cinq dernières années, il s'agirait tout bonnement de multiplier par trente la capacité de production et d'installation actuelle. M. Jacobson n'a manifestement jamais mis les pieds dans une usine, et ne sait pas qu'il faut aussi de l'acier, du ciment, des résines polyuréthanes, des terres rares et du cuivre, des bateaux et des grues, entre autres, pour fabriquer et installer une belle éolienne « propre ».

Et comment ne pas mentionner des technologies enthousiastes comme l'énergie des vagues et de la houle, tel le système Pelamis (un boudin de 150 m de long pour 750 kW de puissance, soit une production annuelle d'environ 2,7 GWh, millions de kWh). Pour produire l'équivalent d'un seul réacteur nucléaire (8 TWh), il faudrait installer la bagatelle de 3 000 boudins, dans 75 fermes océaniques de 130 hectares chacune. Nos derniers marins pêcheurs vont devoir apprendre à slalomer, et prière de ne pas rire, car certaines de ces solutions « innovantes », comme les hydroliennes, sont en test, avec de l'argent public.

Il existe des scénarios plus sérieux, bien sûr, comme négaWatt pour la France, dont l'immense mérite est de commencer par questionner le besoin, et de projeter une baisse significative de la consommation énergétique à l'horizon 2050. La production de 200 TWh en éolien et 90 TWh en solaire photovoltaïque, en complément d'une exploitation forte et systématique de la biomasse, reste cependant un objectif très

ambitieux (à comparer à la production mondiale actuelle, de l'ordre de 450 TWh et 60 TWh respectivement).

Bref, que l'on se le dise : éolien, solaire, biogaz, biomasse, biocarburants, algues ou bactéries modifiées (*cf. infra*), hydrogène, méthanation, quels que soient les technologies, les générations ou les vecteurs, nous serons rattrapés par un des facteurs physiques : impossible recyclage des matériaux (on installe d'ailleurs aujourd'hui des éoliennes et des panneaux solaires à base de matériaux que l'on ne sait *pas* recycler), disponibilité des métaux, consommation de surfaces, ou intermittence et rendements trop faibles.

Les différentes énergies renouvelables ne posent pas forcément de problème en tant que telles – mieux vaut probablement une éolienne qu'un générateur de même puissance au diesel – mais c'est l'échelle à laquelle certains imaginent pouvoir en disposer qui est irréaliste. Le déploiement généralisé du bon *mix* d'énergies renouvelables reste à penser et ne pourra répondre que difficilement à certains usages. En particulier, la question des transports et celle du stockage (et donc de la capacité à adapter la production à la demande très variable) n'ont pas de réponse satisfaisante, avec un besoin en métaux irréaliste (batteries) ou des pertes de rendement trop grandes (gazéification et méthanation). Il n'y a pas assez de lithium sur terre pour équiper un parc de plusieurs centaines de millions de véhicules électriques, et pas assez de platine pour un parc équivalent de véhicules à hydrogène. Et rappelons, une bonne fois pour toutes, que l'hydrogène n'est pas une source d'énergie,

mais seulement un vecteur. Nul doute que le pétrole, et surtout le charbon, sont encore là pour longtemps. Même si ce n'est pas une bonne nouvelle…

Effet rebond et emballement des besoins

Les contraintes techniques ne sont pas seules en cause pour limiter le déploiement ou l'impact des « bonnes » innovations. L'effet rebond est bien connu. Les économies de consommation ne sont pas toutes récupérées car le coût d'utilisation en baisse fait augmenter la demande : ainsi, ma voiture qui consomme moins de carburant me permet de rouler plus de kilomètres, et éventuellement de dépenser autant de carburant pour un budget de départ donné. L'effet rebond est alors égal à 100 %, et il peut même être supérieur, comme dans le paradoxe de Jevons, où l'abaissement du coût fait fortement augmenter la demande, avec l'exemple de l'introduction de la machine à vapeur de Watt.

La « perte en ligne » d'une partie des économies théoriquement atteignables par l'innovation ne vient d'ailleurs pas toujours du consommateur final, mais aussi des constructeurs. C'est flagrant dans le secteur automobile, où les moteurs sont toujours plus efficaces… mais pour mouvoir des objets toujours plus pondéreux. À quoi bon avoir un véhicule hybride, s'il pèse à vide 1,6 ou 1,8 tonne ?

Enfin, il faut garder en tête que les besoins s'emballent, notamment sous l'effet du « rattrapage » des pays « émergents »

et de l'effet démographique. C'est bien de gagner quelques points ou dizaines de points de pourcentage sur le rendement d'un procédé industriel. Mais, en parallèle, la consommation de charbon ou d'aluminium a augmenté de 60% en dix ans. D'une manière ou d'une autre, il va falloir changer de braquet.

Les contraintes engendrées par l'innovation elle-même

Reste à savoir si notre système économique actuel et son besoin de croissance, le fonctionnement et le financement de la recherche avec les partenariats public-privé, les modes de protection de la propriété intellectuelle et de rémunération des brevets, permettent aujourd'hui de faire émerger les « bonnes » innovations, celles qui permettront les économies de ressources.

La réponse est probablement en partie dans la question. On connaît le besoin d'obsolescence physique ou culturel, poussé par les oligopoles industriels[21] ou la publicité, et l'on ne voit pas bien comment les choses pourraient changer sans une poussée réglementaire extraordinaire et compliquée à mettre en œuvre.

Une partie des innovations, et il est à craindre la plus grande – car c'est celle qui rapporte –, permet donc de remplir les besoins absurdes générés par le système : des particules nanométriques qui permettent à une crème solaire d'offrir protection *et* sensation de fraîcheur ; des puces RFID qui permettent de payer son chariot de supermarché sans passer en caisse ; des vitrages pour bureaux paysagers qui deviennent opaques par

impulsion électrique ; des réfrigérateurs qui préparent la liste des courses… On est loin de la « révolution » de la machine à vapeur ou de l'assolement triennal !

Ces exemples sont caricaturaux, mais emblématiques d'un bon nombre d'« innovations » d'aujourd'hui. Franchement, développerait-on de telles applications *high tech* si l'on connaissait le réel prix à payer, en termes de rejets d'usine, de disparition des espaces naturels et des ressources, de destruction de tout ce qui a sustenté, physiquement et intellectuellement, l'humanité depuis des millénaires ? Rien n'est moins sûr. Mais comme ces nouvelles innovations sont souvent des « applications civiles », des retombées de la recherche militaire, on ne nous pose pas la question avant de nous les imposer. L'innovation a toujours été intimement liée aux techniques militaires – depuis la hache de cuivre ou de bronze, plus pratique que la hache de pierre pour défricher, mais aussi pour fracasser le crâne d'un voisin antipathique –, en particulier les *high tech* (aéronautique, Internet, électronique, télécommunications). La convergence en cours des « NBIC », nanotechnologies/biotechnologies/intelligence artificielle/sciences cognitives, du fantassin du futur aux drones miniaturisés[22], en est l'exemple le plus récent.

Effet système et rendements décroissants

Tout est lié. Depuis notre entrée dans l'« Anthropocène », la grande accélération de la révolution industrielle, quand on

croit trouver une solution technique à une pénurie on en crée d'autres ailleurs, ou des dégâts, car notre Terre est bien de dimension finie. Les différents problèmes interagissent entre eux, se renforcent par des boucles de « rétroaction positive », c'est-à-dire agissent comme des facteurs aggravants : moins de métaux implique moins d'énergie, et donc à terme moins d'accès aux métaux ; la saturation urbaine augmente la consommation d'énergie et de ressources métalliques ; les pratiques agricoles épuisent les sols qui requièrent plus d'intrants, donc plus d'énergie. Une partie des innovations ne sert qu'à gérer, ou tenter de gérer, la complexité ou les effets négatifs induits par les innovations précédentes.

Quelle est la capacité de résilience d'un système toujours plus complexe et interdépendant fonctionnant en flux tendus, sa capacité à résister aux perturbations économiques et sociales à venir, qui seront, à n'en pas douter, nombreuses à l'échelle mondiale ? Elle est sans doute très faible aujourd'hui, tant le système industriel et financier est devenu imbriqué et ingérable. Les grandes entreprises assemblent des sous-systèmes fabriqués sur l'ensemble de la planète, avec des matières premières en provenance de dizaines de pays différents.

Plus nous rendrons le système complexe – et ne doutons pas que plus de technologie signifie plus de complexité –, plus il sera dur de le maintenir économiquement et plus il sera potentiellement sensible à des perturbations venues de l'extérieur : changement climatique, pénurie de ressources, géopolitique, ou catastrophes industrielles de type Fukushima…

Certains voient dans les énergies renouvelables une possibilité de relocalisation, de maîtrise par les territoires de la production énergétique. C'est sans conteste vrai pour des technologies simples (solaire thermique domestique ou petites éoliennes), sûrement pas pour les développements *high tech* que l'on nous promet : la fabrication, l'installation et la maintenance des monstres techniques que sont les éoliennes de 3 ou 5 MW ne sont à la portée que d'une poignée d'entreprises transnationales, s'appuyant sur une organisation de production mondialisée et une expertise fortement centralisée, mettant en œuvre des moyens industriels coûteux (ingénierie, conception et matériaux perfectionnés, simulations informatiques, logistique hors norme – barges, bateaux, grues, remorques spéciales…). Les futurs clients dépendront d'un réseau de fabrication et de distribution de pièces détachées ultratechniques, bourrées d'électronique de puissance complexe à tous les étages… à mille lieues d'une production autonome, résiliente, ancrée dans les territoires, et maîtrisable par des entreprises et des populations locales.

En finir avec les dernières tartes à la crème *high tech*

Quelles sont aujourd'hui les dernières promesses de nos savants et ingénieurs thaumaturges, puisque les incantations à augmenter le taux de recyclage ne suffiront pas ? Pour répondre aux pénuries de matière, le tiercé gagnant serait : la

« bioéconomie », supposée remplacer les ressources fossiles (utilisation non énergétique du pétrole, du gaz ou du charbon) par des matières premières renouvelables, les « bioressources » ; les nanotechnologies, censées économiser ou substituer des matières premières rares, grâce à la miniaturisation et à la propriété particulière des matériaux à l'échelle atomique ; enfin, la dématérialisation de l'économie, qui autoriserait une future « économie 2.0 » à croître sans augmenter ou en réduisant le prélèvement sur les ressources.

La « bioéconomie »

D'abord, de quoi parle-t-on exactement ? Suivons le code couleur « marketing » en vogue dans les présentations institutionnelles ou pour public averti sur les biotechnologies *(figure 6)*. Celui-ci a été inventé pour distinguer, à des fins de meilleure *acceptabilité sociétale*, les différentes applications industrielles des biotechnologies, en distinguant les applications médicales par exemple, difficiles à refuser, des « OGM » à la réputation déjà un peu soufrée.

Les biotechnologies « vertes », qui concernent l'agroalimentaire, sont les plus connues. Il s'agit principalement des plantes génétiquement modifiées (PGM) (*cf.* acte III) mais aussi des animaux, comme le tout nouveau saumon transgénique AquAdvantage à croissance rapide, et bientôt, qui sait, des cochons urinant moins de nitrates et des vaches aux flatulences sans méthane, dopées à la bactérie de kangourou, pour

Biotechnologies de « couleur »…	Principe de base	Principaux produits de sortie attendus	Maturité industrielle
… verte Agroalimentaire	Bricolage génétique de plantes et animaux existants pour modifier leurs propriétés	Plantes génétiquement modifiées (PGM) : – résistance aux ravageurs (gène Bt) – résistance aux herbicides – propriétés ou composition des aliments modifiées Animaux génétiquement modifiés : – saumon à croissance rapide	Déjà forte
… blanche Applications industrielles	Utilisation contrôlée de microorganismes ou d'enzymes résistants, modifiés ou synthétiquement pour produire des intermédiaires chimiques à partir de produits de cultures, de résidus ou de bois	Produits intermédiaires pour chimie de base (tensioactifs, lipides…) Biocarburants Biomatériaux (polymères…)	En démarrage Forte développement
… jaune Traitement et dépollution des pollutions	Utilisation d'organismes vivants (plantes, algues, microorganismes) pour dépolluer des déchets toxiques en produits non dangereux	Dépollution des eaux et des sols Biolixiviation (industrie minière)	Faible
… rouge Industrie pharmaceutique	Utilisation de technologies très diverses	Nouveaux traitements, vaccins, diagnostics… Nouvelles molécules thérapeutiques Thérapie génique, thérapie cellulaire	Déjà forte Forte développement
… bleue	*Concernant pratiquement tout pour les produits liés à la biodiversité marine (algues, etc.)* *Cf. verte ou blanche*		

Figure 6 - Les biotechnologies « pour les nuls »

sauver le climat. Elles consistent, en gros, à bricoler, un peu en tâtonnant, le code génétique de plantes et animaux existants pour obtenir des caractéristiques commerciales intéressantes : résistance aux ravageurs, aux herbicides… Pour ce faire, on transgresse les frontières entre les différents ordres – insectes, mammifères, bactéries… – comme des plantes Bt, contenant le gène de la bactérie *Bacillus thuringiensis* ou des chèvres produisant, grâce au gène idoine, du lait à la protéine de soie d'araignée.

Les biotechnologies blanches regroupent les applications industrielles et visent à fabriquer, à partir de ressources renouvelables et par des procédés biologiques, une grande diversité

de molécules, des « intermédiaires » chimiques, qui sont ensuite transformés en produits chimiques (tensioactifs, lipides, lubrifiants, solvants, acides…) et biomatériaux (« biopolymères » ou « bioplastiques ») utilisables dans de nombreux secteurs : cosmétiques, cuir, papier, agroalimentaire (édulcorants, conservateurs, épaississants : bon appétit !), construction, textile… et production de carburants. Décidément, la roue tourne, puisque nos ingénieurs envisageaient à l'inverse, dans les années 1960-1970, de se nourrir de pétrole, de quoi prendre avec prudence les promesses actuelles de nos scientifiques et industriels.

La technique emploie, *a priori* en milieu confiné (dans des réacteurs chimiques sur sites industriels pour éviter toute dispersion), des bactéries ou des enzymes génétiquement modifiées, obtenues par « mutagenèse dirigée », voire, à terme, par biologie synthétique (construction de toutes pièces avec l'aide de la puissance informatique). Il s'agit donc, *grosso modo*, d'une basique fermentation, mais avec des organismes dont on a travaillé le matériel génétique pour optimiser le produit de sortie. On parle ainsi d'usine cellulaire, ou de biocatalyse enzymatique.

Les matières premières sont typiquement issues de cultures riches en un produit facilement exploitable comme l'amidon, le sucre (contenus dans le maïs, la pomme de terre, les betteraves…) ou l'huile (issue des cultures oléagineuses). Je vous vois venir et hurler au loup sur la compétition avec les usages alimentaires : mais non, les biotechnologues ont

pensé à tout et l'on pourrait utiliser *également* des résidus de culture comme la paille ou du bois. On imagine même de faire « digérer » des plantes entières, dans des sortes de « bioraffineries » qui produiraient de nombreuses molécules différentes en sortie.

Quant aux biotechnologies « jaunes » et « bleues », elles ont un peu forcé sur le marketing, car elles pourraient fort bien être classées respectivement « blanches » et « vertes » : les premières sont dédiées aux utilisations visant à traiter ou éliminer les pollutions diverses, eaux, sols… – d'où l'espoir de fonder une partie de la croissance économique future sur les services environnementaux ; car, vous l'avez appris comme moi, « un peu de croissance pollue, beaucoup de croissance dépollue » (*sic*) ; les secondes aux produits en rapport avec la mer : santé, cosmétique, aquaculture. Ainsi, notre saumon peut être inscrit à la rubrique verte ou bleue selon l'humeur.

Résumons : donc, à quoi sert ou servira la bioéconomie ? Principalement à fournir trois types de « produits ». Premièrement, des plantes et des animaux génétiquement modifiés, avec la promesse de « nourrir le monde », éviter la pénurie alimentaire pour les milliards – supplémentaires – d'habitants du futur (*cf.* acte III). Deuxièmement, des biomatériaux à partir de bioressources (plantations, résidus de plantes ou bois) qui alimenteront un secteur de « chimie du végétal » en lieu et place du pétrole et du gaz naturel qui viendront à manquer ou à augmenter de prix. Troisièmement, des biocarburants de diverses générations : 1re (biodiesel/bioéthanol, filière déjà en