

## L'utopie de la « croissance verte »

Philippe Charlez\*

@ 25312

***La croissance verte consiste à remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables (EnR) et de l'hydrogène vert. Mais, un modèle 100 % ENR est-il crédible? Contrairement aux fossiles, les EnR ne sont pas pilotables et sont peu concentrées. Leur mise en œuvre n'est pas un défi technologique, mais un effet de taille qui se traduit par une quantité parfois démesurée d'équipements. Aussi, la proportion d'EnR pourra difficilement excéder 40 % du mix électrique. Envisagées comme sources locales, elles ne pourront se suffire à elles-mêmes et auront besoin d'un soutien thermique du gaz ou du nucléaire. C'est dans l'hybridation du mix que se trouve la solution de la transition énergétique.***

### Introduction

Des galaxies les plus primitives au cerveau humain, les structures inertes et vivantes fonctionnent toutes sans exception de façon similaire. Toutes nécessitent un flux d'énergie entrant d'autant plus élevé que le système est complexe. Une partie de ce flux produit de l'énergie dite « libre » utilisée par le système pour fonctionner. Enfin, en sortie, le système rejette dans le milieu extérieur des déchets fortement entropiques.

Notre société de croissance n'échappe pas à cette règle. Pour produire en 2018 les 84 T\$ de PIB mondial (il correspond à l'énergie libre), le système a consommé 161 PWh d'énergie primaire<sup>1</sup>. Composés de 85 % d'énergies fossiles<sup>2</sup>, ces 161 PWh ont émis vers le milieu extérieur (c'est-à-dire l'environnement) un flux de déchets fortement entropiques dont 34 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> responsables en grande partie du réchauffement climatique.

Comment sortir partiellement ou totalement de cette « croissance brune<sup>3</sup> » ? Au-delà de

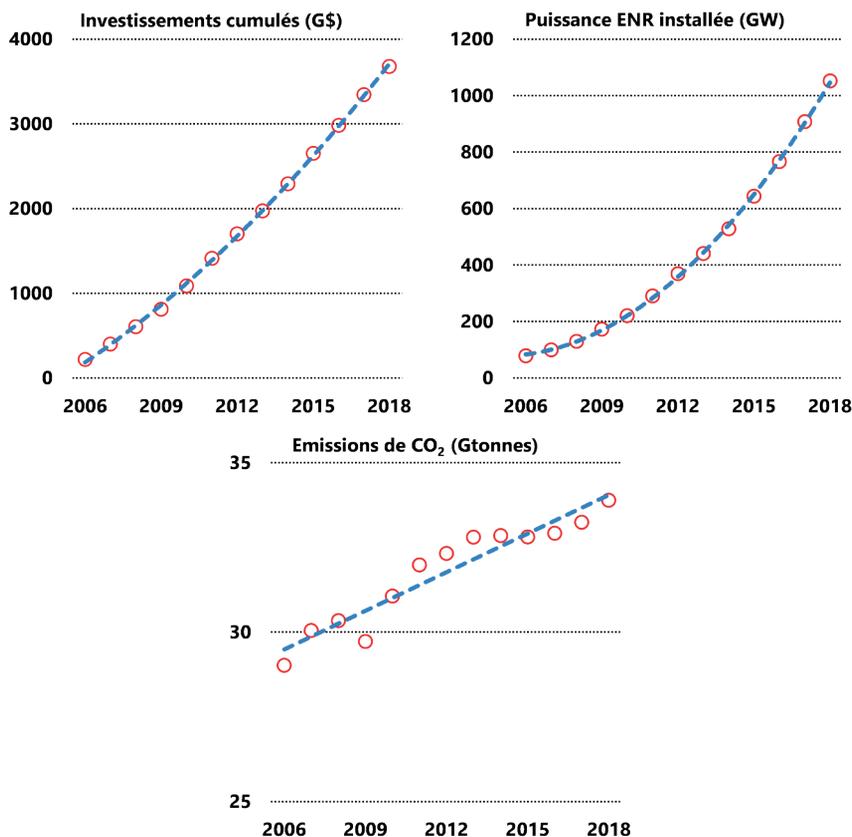
la problématique climatique, c'est aussi une question de disponibilité de ressources. Les réserves de combustibles fossiles sont finies et non renouvelables. Au rythme de la consommation actuelle, leur durée de vie est estimée à moins d'un siècle.

La solution la plus simple est celle de la décroissance économique. Pour réduire voire supprimer le flux sortant de CO<sub>2</sub>, il suffit de réduire le flux d'énergie rentrant aux dépens de la production d'énergie libre (c'est-à-dire de la croissance économique). Une vieille idée malthusienne dont les conséquences sociétales pourraient s'avérer désastreuses.

L'alternative s'appelle « croissance verte ». Elle consiste à remplacer les énergies fossiles par des énergies décarbonées de préférence renouvelables (c'est-à-dire non nucléaires) : un peu d'hydroélectricité et de biomasse mais surtout du solaire et de l'éolien pour la production électrique plus de l'hydrogène vert (produit par électrolyse de l'eau) pour les transports. Une solution qui selon ses adeptes maintiendrait la croissance économique tout en supprimant le flux sortant de CO<sub>2</sub>. Elle résoudrait conjointement la problématique des ressources

\* Institut Sapiens (cf. biographies p.87-88).

## RENOUVELABLES



**Figure 1. Investissements cumulés dans les EnR**

Source : Bloomberg, <https://www.connaissancedesenergies.org/energies-renouvelables-une-baisse-des-investissements-mondiaux-en-2018-mais-190117>

### **Puissance EnR installée et émissions de GES**

Source : BP Statistical Review 2019

dans la mesure où le solaire, l'éolien et la biomasse sont à l'échelle de la vie humaine inépuisables. Mais, ce modèle dit «100 % renouvelables» est-il pour autant crédible?

### **Analyse des données récentes**

Depuis 2006, le monde a investi près de 4000 milliards de dollars dans les énergies renouvelables (Figure 1). Ils ont notamment permis d'installer 1 TW d'éolien et de solaire, soit une puissance égale à 17,5 fois le parc nucléaire français.

Et pourtant, ces investissements massifs n'ont en rien enrayé l'augmentation des émissions de GES qui entre 2006 et 2018 se sont accrues de 14 %. La seule réduction notable observée en 2009 est liée à la récession économique faisant suite à la crise des *subprimes*.

Les résultats incrémentaux entre 2017 et 2018 apparaissent particulièrement éclairants. Dans un contexte économique favorable (+ 3,1 % de croissance mondiale) surtout tiré par les pays émergents (+ 4,6 % en moyenne), la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté de 2,9 % (Figure 2). Excepté le charbon dans les pays de l'OCDE, toutes les sources d'énergie ont progressé : la production

## L'utopie de la « croissance verte »

d'EnR a augmenté de 15,5 % contre 5,3 % pour le gaz, 3,1 % pour l'hydroélectricité, 2,4 % pour le nucléaire, 1,4 % pour le charbon et 1,2 % pour le pétrole.

Mais, plus important que les croissances relatives, est de regarder comment cette augmentation absolue de consommation (+ 4,5 PWh<sup>4</sup> entre 2017 et 2018) s'est répartie entre les différentes sources.

Malgré la mise en œuvre de 145 GW de puissance renouvelable supplémentaire pour un coût de 332 G\$<sup>5</sup>, les EnR n'ont couvert que 18 % de cet accroissement alors que les énergies fossiles y ont contribué à hauteur de 71 %. En conséquence, les émissions de GES se sont accrues en 2018 de 2 % (+ 700 millions de tonnes), le rythme le plus élevé depuis 7 ans.

Malgré des investissements massifs, les EnR ont donc beaucoup de mal à décarboner une société dont la croissance économique continue de reposer essentiellement sur les combustibles fossiles. En 2018, ils représentaient toujours 85 % du mix primaire mondial (contre 91 % en 1970).

La croissance verte supposée conduire à un monde sans carbone éloignerait-elle un peu plus chaque année notre société du chemin vertueux envisagé lors de la COP21?

## Croissance économique, pilotabilité et concentration

Les historiens<sup>6</sup> s'accordent généralement sur le fait que le niveau de vie de l'humanité n'a que très peu évolué entre l'Antiquité et le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. C'est la révolution industrielle d'abord en Grande-Bretagne (aux alentours de 1780), en France et en Allemagne (1810-1820), puis plus tardivement au Japon (1860) qui marqua le début de la croissance économique.

Il est intéressant de noter que la société préindustrielle reposait (en dehors de la force musculaire de l'homme) exclusivement sur les énergies renouvelables<sup>7</sup> : le bois pour le chauffage et la cuisson des aliments, l'avoine (biocarburant) pour les chevaux<sup>8</sup>, le vent pour les bateaux et les moulins, la force de l'eau pour activer les pompes. Les renouvelables de nos ancêtres furent incapables de leur donner accès à la croissance économique.

La découverte de la machine à vapeur par l'écossais Watt puis du générateur électrique par l'anglais Faraday furent certes des catalyseurs technologiques déterminants. Mais leurs ingénieuses découvertes ne purent se développer à grande échelle que grâce à l'utilisation massive des énergies fossiles : le charbon au XIX<sup>e</sup> siècle puis le pétrole et le gaz naturel au XX<sup>e</sup> siècle.

	Croissance PIB 2018	
	%	T\$
US	2,10%	19,9
Europe	2,00%	17,7
Chine	6,50%	12,8
Monde	3,10%	82,6
OCDE	2,00%	49,3
Non-OCDE	4,60%	33,3

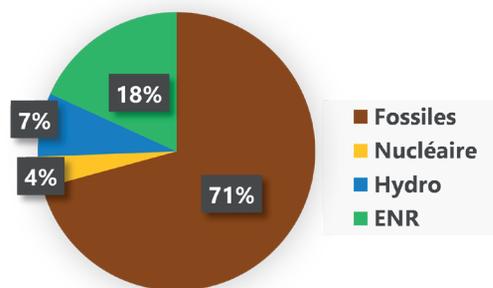


Figure 2. Croissance économique 2018

Source : Banque mondiale

Répartition de l'augmentation de consommation d'énergie 2018

Source : BP Statistical Review 2019

L'histoire nous enseigne donc que le départ de la croissance économique correspond au basculement d'une « économie verte » vers une « économie brune ». Deux caractéristiques fondamentales expliquent ce succès : la pilotabilité et la concentration.

La pilotabilité d'une source d'énergie repose sur un triple concept : l'espace, le temps et la quantité. Une énergie sera pilotable si on peut l'utiliser sans contrainte d'espace « là où on veut », sans contrainte de temps « quand on veut » et sans contrainte de quantité « autant que l'on veut ». Le charbon, le pétrole, le gaz, la biomasse et le nucléaire répondent clairement à ces trois conditions.

La pilotabilité d'une énergie est en grande partie conditionnée par sa capacité à pouvoir se stocker. Le stockage (sous forme solide, liquide ou gazeuse) permet le transport puis l'approvisionnement sur le lieu de consommation en temps voulu et en quantité requise. Ainsi le pétrole dont le stockage est aisé se transporte très facilement d'un point à l'autre de la planète par terre ou par mer. Par contre, le gaz qui est volatil est déjà beaucoup plus complexe à stocker et donc à transporter d'où son utilisation davantage locale et régionale.

Notons au passage que parler de stockage d'énergie est un abus de langage. Ce n'est pas l'énergie que l'on stocke mais bien la matière (charbon, pétrole, gaz naturel, bois, uranium, eau pour l'hydroélectricité) capable de fournir de l'énergie à travers une réaction chimique (combustion, fission nucléaire) ou physique (chute d'eau). Une fois la réaction terminée, si l'énergie dégagée (généralement sous forme de chaleur mais aussi sous forme d'énergie potentielle dans le cas de l'hydroélectricité) n'est pas utilisée instantanément, elle se dissipera dans l'atmosphère et sera irrémédiablement perdue.

Mais, en dehors de leur facilité de stockage (et donc de transport), les combustibles fossiles sont aussi de fantastiques concentrés énergétiques. Ainsi un petit litre de pétrole qui contient 10 kWh d'énergie permet de rouler en moyenne 17 km avec sa voiture.

En dehors des énergies fossiles, le nucléaire répond également en grande partie aux critères de pilotabilité et de concentration : on peut produire de l'énergie nucléaire quand on veut et presque partout où on veut (la seule contrainte spatiale est de disposer d'une rivière à proximité pour refroidir le réacteur). Stockable et aisément transportable sous forme de pastilles d'uranium, c'est une forme d'énergie hyper concentrée : une pastille de 10 grammes est ainsi capable de fournir annuellement l'électricité à deux ménages français !

Si la biomasse coche la plupart des cases de la pilotabilité (notamment le stockage et le transport), sa concentration énergétique (massique mais surtout surfacique) est par contre médiocre : une tonne de bois contient trois fois moins d'énergie qu'une tonne de pétrole et deux fois moins qu'une tonne de charbon. Ainsi, un puits moyen de pétrole (4 millions de barils sur 20 ans) occupant moins d'un hectare en surface produira l'équivalent énergétique de... dix mille hectares de forêt. On comprend mieux à partir de cet exemple pourquoi la révolution industrielle a rapidement abandonné le bois au profit du charbon. Son utilisation massive dans les machines à vapeur aurait conduit à une rapide déforestation de la planète. Au contraire, le déclin de son usage à partir de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle a permis la reforestation de la France. L'hexagone compte aujourd'hui 16 millions d'hectares de forêt contre seulement 5 millions durant la période napoléonienne. Quelque part, l'utilisation massive des énergies fossiles a permis de recréer en France... un gigantesque puits à carbone.

L'hydroélectricité coche également la plupart des cases excepté celle de la contrainte spatiale dans la mesure où elle requiert des sites particuliers (montagnes) permettant de stocker massivement de l'énergie potentielle sous forme hydraulique. Elle est aussi dépendante de la nature (pluie et fonte des neiges) mais cette dépendance reste pilotable.

La croissance économique est indissociable d'énergies à la fois pilotables et concentrées. Il n'est donc pas surprenant que les combustibles

fossiles et dans une moindre mesure le nucléaire et l'hydroélectricité (ils représentent 95 % du mix primaire actuel) aient été les principaux aliments de la croissance économique depuis le début de la révolution industrielle.

### Conséquences de la non pilotabilité des renouvelables

Contrairement aux combustibles fossiles, au nucléaire et dans une moindre mesure à l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire photovoltaïque ne sont pas pilotables. Il s'agit de sources intermittentes et localisées qui ne fournissent de l'énergie que « quand dame nature le veut » et « où dame nature le veut ». Le stock de matière à l'origine des renouvelables se situant à 150 millions de km (il s'agit de l'hydrogène du soleil), les EnR sont donc totalement dématérialisées et de ce fait non stockables ni transportables excepté sous forme d'électricité. Enfin et surtout, elles sont dispersées dans l'atmosphère et donc très faiblement concentrées. Ne cochant aucune des cases pilotabilité et concentration, on comprend aisément pourquoi elles ont les plus grandes difficultés à participer à la croissance économique.

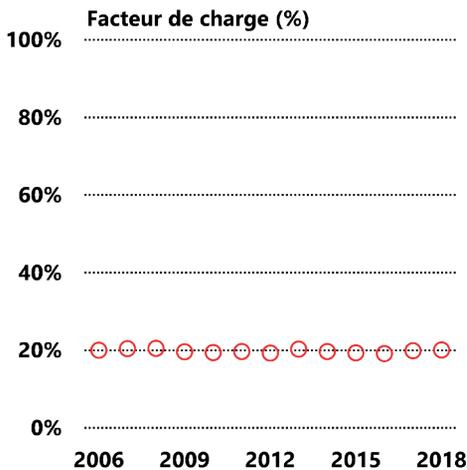


Figure 3. Facteur de charge EnR mondial (éolien + solaire photovoltaïque)

Source des données : BP Statistical Review 2019

La pilotabilité d'une énergie se lit notamment à travers le facteur de charge. Il représente la fraction annuelle de temps durant laquelle un équipement donné produit de l'électricité valorisable (c'est-à-dire correspondant à une demande des consommateurs). De l'ordre de 90 % pour les énergies pilotables<sup>9</sup>, il vaut en moyenne 20 % pour les énergies renouvelables (Figure 3). Dépendant essentiellement de la nature (vent, ensoleillement) aucune rupture technologique ne peut significativement contribuer à accroître le facteur de charge.

Le facteur de charge peut aussi s'exprimer en termes de rapport production puissance. Alors qu'un GW de centrale nucléaire ou de centrale à gaz peut produire annuellement entre 7 TWh et 8 TWh d'électricité, un GW d'éolien en produira moins de deux et un GW de solaire (en Europe) à peine plus d'un. Autrement dit pour produire annuellement la même quantité d'électricité, un GW nucléaire supprimé devra être remplacé au choix par 4 GW d'éolien ou 7 GW de solaire photovoltaïque.

Aussi, malgré la mise en œuvre de puissances de plus en plus importantes, la production d'électricité renouvelable à grande échelle s'avère décevante. Ainsi, en Allemagne les 95 GW d'EnR 2018 (1,5 fois le parc nucléaire français) n'ont produit que 158 TWh soit un facteur de charge de seulement 19 %. De surcroît, les principaux gisements de vent se situent le long de la mer Baltique alors que les principaux besoins énergétiques se trouvent en Bavière et dans la Ruhr. Aux nombreuses éoliennes, il a fallu rajouter 10 000 km de câble enterré pour un coût additionnel de 40 milliards d'euros. Ces choix sont financés par les citoyens allemands : le prix du kWh y est deux fois plus élevé qu'en France.

### Un effet de taille

Dans la mesure où la plupart des technologies renouvelables (moulin à vent, électrolyse de l'eau, pile à combustible, voiture électrique, biocarburants) sont antérieures à l'émergence des fossiles, déplacer massivement les énergies

fossiles vers les renouvelables n'est pas fondamentalement un challenge technologique. C'est un problème de taille.

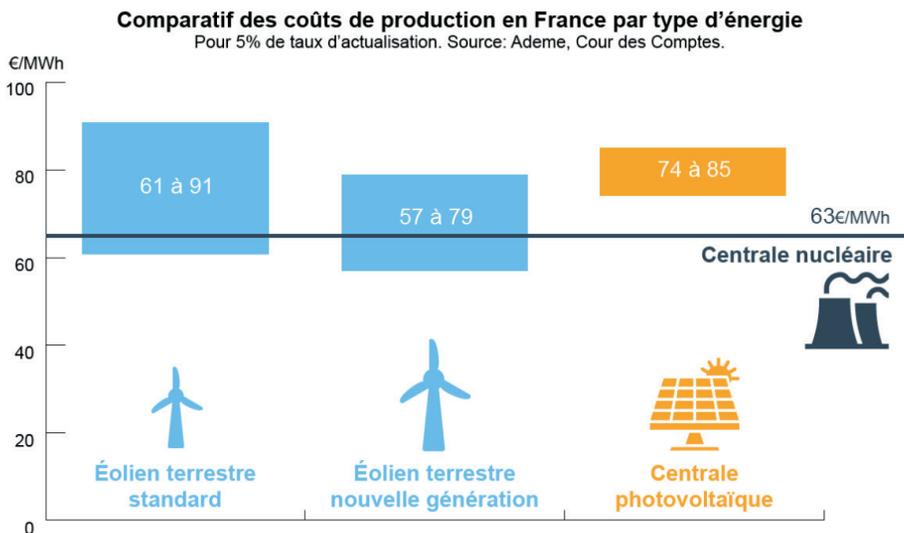
Compte tenu de la faible concentration énergétique du solaire et de l'éolien, pour récupérer une quantité suffisante d'énergie et continuer d'alimenter la croissance économique, il est nécessaire de mettre en œuvre une capacité souvent démesurée d'équipements. Cet effet de taille se lit en filigrane des quelques exemples ci-dessous dont certains sont amusants. Ainsi, pour voler à l'énergie solaire, un Airbus A380 (50 MW de puissance) devrait posséder des ailes dont la surface occuperait... près de 100 terrains de football.

Plus sérieusement, à production électrique annuelle équivalente, le remplacement du parc nucléaire français (58 GW) par des EnR nécessiterait au choix 120000 éoliennes de 2 MW ou une surface de 5000 km<sup>2</sup> (l'équivalent du département de la Haute-Loire!) de panneaux photovoltaïques. Au rythme actuel de 600 éoliennes par an, leur mise en œuvre prendrait... 200 ans. Cet effet de taille se traduit évidemment par des surconsommations de matériaux comme l'acier ou le béton. Ainsi, une éolienne

*offshore* flottante de seulement 10 MW nécessite en moyenne 2500 tonnes d'acier alors que le réacteur EPR de Flamanville (1700 MW) en contient 42000 tonnes. En supposant un facteur charge de 50 % pour l'éolien *offshore*, un MWh éolien demandera 18 fois plus d'acier qu'un MWh EPR.

L'effet d'échelle ne s'arrête pas à la production électrique et se retrouve également dans la mise en œuvre de la mobilité verte. Ainsi, remplacer le diesel et l'essence consommés en France en 2017 (environ 50 milliards de litres) par de l'hydrogène produit à partir de l'électrolyse de l'eau demanderait environ 500 TWh d'électricité soient 125000 éoliennes de 2 MW ou une soixantaine de réacteurs nucléaires de 1 GW. Si la mise en œuvre de 60 réacteurs nucléaires supplémentaires n'a rien d'impossible (au moins sur le plan technique en dehors de toute considération sociétale), produire massivement de l'hydrogène à l'aide de renouvelables ne paraît pas raisonnable.

Séduisante sur le papier, une société 100 % renouvelables débouche donc sur une incohérence de taille. Les renouvelables pourront



**Figure 4. Comparatif des coûts de production en France par type**  
 Source : ADEME, Cour des comptes

au mieux à moyenne échéance compter pour 40 % de la production électrique mondiale.

### L'argument coût

L'argument principal plaçant aujourd'hui en faveur des renouvelables est la baisse spectaculaire de ses coûts. Selon l'ADEME (Figure 4), les MWh éoliens et solaires sont presque devenus aussi compétitifs que ceux produits par le nucléaire existant<sup>10</sup> et bien moins chers que l'EPR dont le coût<sup>11</sup> du MWh descendra difficilement en dessous de 90 €. Sur le plan économique, les EnR seraient donc en train de supplanter l'atome.

Si ces estimations prennent en compte les facteurs de charge réel (2000 heures en pleine puissance pour l'éolien terrestre et un peu plus de 1000 heures pour le solaire photovoltaïque), elles n'incluent pas le coût des installations de support (gaz notamment) qu'il faudra construire pour pallier aux intermittences en cas de sortie partielle ou totale du nucléaire. Mais, surtout ne prendre en compte que le coût du MWh sans en scruter la valeur conduit à des conclusions erronées<sup>12</sup>.

Dans un marché ouvert de l'électricité, la valeur du MWh est fonction de la demande qui évolue de façon quotidienne et saisonnière. Ainsi, dans les pays européens, les fortes demandes quotidiennes se situent surtout le matin et le soir alors que la demande saisonnière est toujours beaucoup plus élevée en hiver qu'en été. Au contraire, entre 11 h et 16 h et surtout l'été, la demande baisse (Figure 5).

En conséquence, la valeur du MWh peut ainsi varier d'un facteur 10 au cours d'une même journée. Or, dans nos contrées, la production d'EnR dépendant des conditions météorologiques est rarement en phase avec les pics de demande<sup>13</sup>. Ainsi par exemple, le solaire photovoltaïque ne fournit que peu d'électricité le matin et le soir quand la demande est forte et que la valeur est élevée. Au contraire, entre 12 h et 16 h, lorsque la demande (et donc la valeur) sont faibles, la production est maximale.

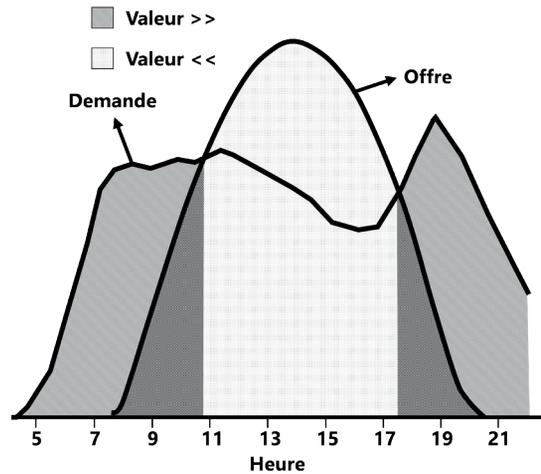


Figure 5. Comparaison offre demande (solaire photovoltaïque)

Autrement dit, dû à leur non pilotabilité, les renouvelables produisent dans bien des cas des MWh de faible valeur souvent inférieurs à leur coût. Au contraire, les énergies pilotables comme le gaz ou le nucléaire peuvent adapter leur offre au marché. Elles produiront des MWh à haute valeur ajoutée en période de forte demande et réduiront leur offre lorsque la demande baissera.

Quel que soit leur coût, les EnR parviendront difficilement dans un marché ouvert à évincer les sources pilotables car la valeur économique du MWh qu'elles produisent sera dans bien des cas inférieure à celle des sources pilotables. En l'absence de stockage massif, seul un marché régulé et subventionné peut pour l'instant « sauver le soldat EnR de la noyade économique ».

Cette situation pourrait toutefois fortement s'atténuer à moyen terme en cas de stockage journalier à l'aide de batteries. Mais, comme pour les renouvelables, la mise en œuvre massive de stockage se confrontera à un problème de taille.

## La dépendance envers les métaux rares

L'Europe reste aujourd'hui profondément dépendante des énergies fossiles. En 2017, elles représentaient 76 % du mix énergétique primaire. Cette dépendance représente un point de faiblesse majeur qui, à tout moment, peut fragiliser son économie et remettre en cause sa sécurité énergétique.

Mais, la dépendance énergétique de l'Europe ne s'arrête pas aux hydrocarbures. Si les défenseurs du nucléaire ont toujours clamé que l'atome avait donné aux Européens l'indépendance énergétique et sécurisé leur approvisionnement en électricité, ses détracteurs soutiennent au contraire que le nucléaire représente une autre forme de dépendance puisqu'à l'instar des sources d'énergie fossiles, le combustible uranifère doit lui aussi être importé. La dépendance nucléaire n'est néanmoins pas comparable à la dépendance fossile dans la mesure où l'uranium ne représente que 2 % du coût global du MWh. Une flambée des

cours n'augmenterait donc que marginalement le prix de l'électricité.

Quant aux énergies renouvelables, dans la mesure où le vent et le soleil n'appartiennent à personne, elles donneraient à un pays une totale indépendance énergétique. Mais, la dépendance ne se situe plus au niveau des ressources mais bien au niveau des matériaux (lithium, cobalt, terres rares) nécessaires aux équipements de transformation (éoliennes, panneaux solaires, batteries, piles à combustible). Et, sur ce plan, leur distribution géographique est encore plus critique que celle des hydrocarbures et de l'uranium.

Ainsi (Figure 6) la moitié des réserves mondiales de cobalt (électrodes des batteries) sont situées en RDC et près de 60 % des réserves de lithium (électrolyte des batteries) au Chili et en Argentine. Quant aux terres rares, la Chine recèle plus du tiers des réserves mondiales. Cette dernière s'est d'ailleurs positionnée sur toute la chaîne de valeur puisqu'elle est aujourd'hui le leader mondial de production de batteries, de piles à combustibles et de panneaux solaires.

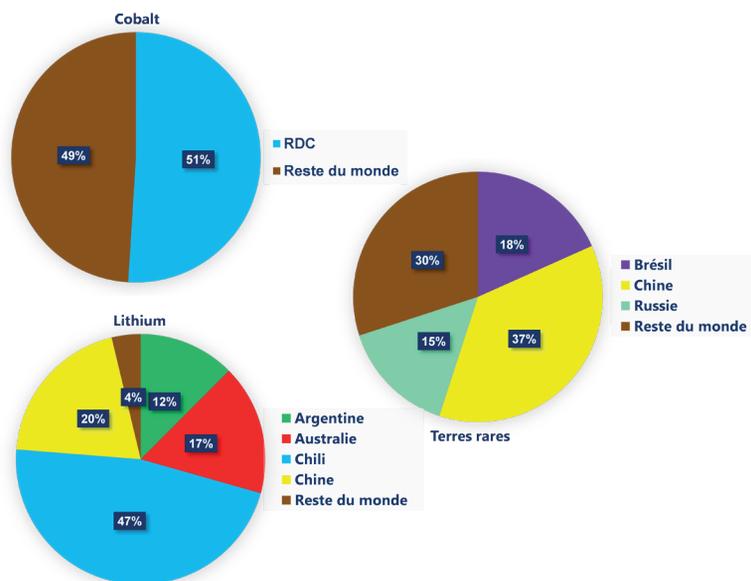


Figure 6. Distribution des réserves mondiales de cobalt, lithium et terres rares

Source des données : BP statistical review 2018

## L'utopie de la « croissance verte »

Comme pour les hydrocarbures ou l'atome, l'Europe des renouvelables sera dans l'avenir fortement dépendante de ses fournisseurs et notamment de l'empire du Milieu. Contrairement à une idée reçue, les renouvelables ne résolvent donc en rien le problème d'indépendance énergétique de l'Union européenne.

### Conclusions

Les deux options proposées (décroissance et croissance verte) correspondant à des impasses sociétales et techniques, c'est dans une troisième voie davantage équilibrée que se trouve la solution.

S'il est indispensable d'introduire dans le mix énergétique une proportion significative de renouvelables, à moyenne échéance, ils pourront difficilement contribuer pour plus de 40 % de la production électrique mondiale. Non pilotables et peu concentrées, les EnR doivent être envisagées comme des sources d'énergies purement locales. Elles ne pourront se suffire à elles-mêmes et assurer seules la croissance verte promise. Pour fonctionner, elles auront besoin d'un « ami thermique » qui, si l'on veut rapidement sortir du charbon, ne pourra être que le gaz ou le nucléaire. C'est donc dans l'hybridation du mix énergétique que se trouve la vraie solution de la transition énergétique.

Tous les scénarios énergétiques sérieux prédisent d'ailleurs que le mix énergétique 2050 renfermera encore de l'ordre de 50 % de combustibles fossiles. Mais son contenu sera très différent de celui d'aujourd'hui : presque plus de charbon, beaucoup moins de pétrole et davantage de gaz naturel.

Par contre, la décarbonation massive et complète de la société de croissance nécessitera de la renucléariser. Renucléarisation du mix électrique pour soutenir les renouvelables et la mobilité électrique mais aussi renucléarisation pour produire massivement de l'hydrogène vert et remplacer le pétrole dans les transports non électrifiables : voitures sur longues distances, camions, bateaux et peut-être avions.

Pourtant, alors qu'il pourrait impacter significativement la décarbonation du mix mondial, le nucléaire est de plus en plus marginalisé. Il n'a contribué qu'à hauteur de 4 % à la croissance de la consommation mondiale 2018 et ses investissements ne représentaient que 3 % des investissements énergétiques globaux. Dans un rapport publié le 28 mai 2019, l'IEA a sonné l'alarme en affirmant<sup>14</sup> que « sans le nucléaire, les objectifs d'électricité verte étaient hors de portée ». Un message que les Chinois et les Indiens ont très bien compris mais qui s'avère aujourd'hui inaudible en Europe.

### NOTES

1. Un PetaWatheure est égal à un milliard de mégawatheures.
2. *BP Statistical Review 2019*.
3. La croissance brune fait référence aux énergies fossiles.
4. Un PetaWatheure est égal à 1000 TWh.
5. <https://www.connaissancedesenergies.org/energies-renouvelables-une-baisse-des-investissements-mondiaux-en-2018-mais-190117>
6. A. Maddison (2001), *L'économie mondiale : une perspective millénaire*, OCDE report.
7. <https://www.linkedin.com/pulse/lenergie-au-moyen-age-de-robert-philippe-1923-1998-%C3%A0-michel-lepetit/?published=t>
8. Les surfaces cultivées d'avoine représentaient dans la société préindustrielle la moitié des surfaces cultivées.
9. Les 10 % correspondent soit à des arrêts programmés (maintenance) soit à des arrêts non programmés (pannes).
10. Le coût actuel du MWh nucléaire est de 42 €/MWh et n'inclut pas les frais d'investissement.
11. Le MWh de l'EPR de Flamanville est estimé à 120 €/MWh. Il s'agit d'une « tête de série ».
12. <https://theconversation.com/debat-pour-une-juste-estimation-du-cout-du-tout-renouvelable-114723>
13. Ce décalage offre demande ne peut toutefois être généralisé. Ainsi, dans les pays à fort ensoleillement, y a-t-il concordance entre ensoleillement et forte demande en climatisation sur l'heure de midi.
14. <http://www.lefigaro.fr/conjoncture/sans-le-nucleaire-les-objectifs-d-electricite-verte-sont-hors-de-portee-20190528>