

LA "NOUVELLE ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE" : UN EXERCICE DE PENSÉE MAGIQUE

Traduit de <https://media4.manhattan-institute.org/sites/default/files/R-0319-MM.pdf>

Mark P. Mills Senior Fellow

Mars 2019 Manhattan Institute



À propos de l'auteur :

Mark P. Mills est Senior Fellow au Manhattan Institute et membre de la faculté de la McCormick School of Engineering and Applied Science de l'université Northwestern, où il codirige un Institute on Manufacturing Science and Innovation.

Il est également un partenaire stratégique de Cottonwood Venture Partners (un fonds de capital-risque spécialisé dans les technologies de l'énergie). Auparavant, Mills a cofondé Digital Power Capital, un fonds de capital-risque de type boutique, et a été président et directeur technique d'ICx Technologies, contribuant à son entrée en bourse en 2007.

Mills est un contributeur régulier de Forbes.com et est l'auteur de *Work in the Age of Robots* (2018).

Il est également coauteur de *The Bottomless Well : The Twilight of Fuel, the Virtue of Waste, and Why We Will Never Run Out of Energy* (2005).

Ses articles ont été publiés dans le Wall Street Journal, USA Today, et Real Clear. Mills est apparu en tant qu'invité sur CNN, Fox, NBC, PBS, et The Daily Show with Jon Stewart.

En 2016, Mills a été nommé "Écrivain de l'année pour l'énergie" par l'American Energy Society.

Auparavant, Mills était conseiller en technologie pour Bank of America Securities et coauteur du Huber-Mills Digital Power Report, un bulletin d'investissement technologique.

Il a témoigné devant le Congrès et a informé de nombreuses commissions de service public et législateurs d'État.

Mills a travaillé au Bureau scientifique de la Maison Blanche sous le président Reagan et a ensuite fourni des conseils en matière de politique scientifique et technologique à de nombreuses entreprises du secteur privé, au ministère de l'Énergie et aux laboratoires de recherche américains.

Au début de sa carrière, Mills a été physicien expérimental et ingénieur de développement chez Bell Northern Research (les Bell Labs du Canada) et au RCA David Sarnoff Research Center sur les microprocesseurs, la fibre optique, le guidage de missiles, obtenant plusieurs brevets pour ses travaux. Il est titulaire d'un diplôme en physique de l'Université Queen's, dans l'Ontario, au Canada.

Sommaire

Résumé.....	3
Introduction.....	4
Des politiques qui visent la Lune et le défi du passage à l'échelle	4
Les coûts réels de l'énergie éolienne et solaire sont déterminés par la physique ...	7
Le coût élevé à payer pour assurer la disponibilité de l'énergie	9
Le mythe de la « <i>parité réseau</i> ».....	10
Les coûts cachés d'un réseau électrique « vert » ...	11
Les batteries ne peuvent pas sauver ni le réseau ni la planète	13
Combien de batteries faudrait-il pour éclairer les USA ? ...	13
La production de quantités massives de batteries aurait des implications épiques pour l'exploitation minière	14
La loi de Moore appliquée en dépit du bon sens	15
Quel est le coût asymptotique des énergies renouvelables ?	16
La numérisation ne va pas " Ubériser " le secteur de l'énergie...	19
Le problème de la demande de pointe que des logiciels ne peuvent pas résoudre	20
L'Ubérisation améliore l'efficacité énergétique mais augmente la demande ...	21
Des révolutions énergétiques sont encore loin au-delà de l'horizon.....	23
Notes et références.....	24
Notes du traducteur sur les évolutions récentes des prix du charbon et du gaz	27
Résumé de « Mines, minéraux et l'énergie « verte » : un rappel à la réalité »	28

Les chiffres 1 à 99 sans crochets ni parenthèses renvoient aux références

Le lecteur intéressé pourra regarder

<https://media4.manhattan-institute.org/sites/default/files/mines-minerals-green-energy-reality-checkMM.pdf>
dont le résumé est en annexe page 28.

Résumé

Depuis des décennies, un mouvement se développe pour remplacer les hydrocarbures, qui fournissent collectivement 84 % de l'énergie mondiale. Il a commencé par la crainte que nous soyons à court de pétrole. Cette crainte a depuis évolué vers la conviction que, en raison du changement climatique et d'autres préoccupations environnementales, la société ne peut plus tolérer de brûler du pétrole, du gaz naturel et du charbon, qui se sont avérés abondants.

Jusqu'à présent, l'éolien, le solaire et les batteries - les alternatives privilégiées aux hydrocarbures - fournissent environ 2 % de l'énergie mondiale et 3 % de l'énergie américaine. Néanmoins, une nouvelle affirmation audacieuse a gagné en popularité : nous sommes à l'aube d'une révolution énergétique basée sur la technologie qui non seulement peut remplacer rapidement tous les hydrocarbures, mais le fera inévitablement.

Cette "*nouvelle économie de l'énergie*" repose sur la conviction - pièce maîtresse du Green New Deal et d'autres propositions similaires, ici et en Europe - que les technologies de l'énergie éolienne et solaire et du stockage sur batterie vont avoir la même évolution que l'informatique et les communications, réduisant considérablement les coûts et augmentant l'efficacité.

Mais cette analogie de base veut ignorer les différences profondes, ancrées dans la physique, entre les systèmes qui produisent de l'énergie et ceux qui produisent de l'information.

Dans le monde des personnes, des voitures, des avions et des usines, l'augmentation de la consommation, de la vitesse ou de la capacité de charge entraîne l'expansion du matériel, et non sa réduction. L'énergie nécessaire pour déplacer une tonne de personnes, chauffer une tonne d'acier ou de silicium, ou faire pousser une tonne de nourriture est déterminée par des propriétés de la nature dont les limites sont fixées par les lois de la gravité, de l'inertie, de la friction, de la masse et de la thermodynamique - et non par un logiciel intelligent.

Cet article met en évidence la physique de l'énergie pour illustrer pourquoi il n'y a aucune possibilité que le monde subisse - ou puisse subir - une transition à court terme vers une "*nouvelle économie de l'énergie*".

Parmi les raisons :

- Les scientifiques n'ont pas encore découvert, et les entrepreneurs n'ont pas encore inventé, quelque chose d'aussi remarquable que les hydrocarbures en termes de combinaison de faible coût, de haute densité énergétique, de stabilité, de sécurité et de portabilité.
- En termes pratiques, cela signifie que dépenser un million de dollars pour des éoliennes à l'échelle d'un service public ou des panneaux solaires produiront chacun, sur 30 ans de fonctionnement, environ 50 millions de kilowattheures (kWh) - tandis qu'un million de dollars équivalent dépensé sur une plateforme de schiste produit suffisamment de gaz naturel sur 30 ans pour générer plus de 300 millions de kWh.
- Les technologies solaires se sont grandement améliorées et continueront à devenir moins chères et plus efficaces. Mais l'ère des gains dix est révolue. La limite physique des cellules photovoltaïques (PV) en silicium, la limite de Shockley-Queisser, est une conversion maximale de 34 % des photons en électrons ; la meilleure technologie PV commerciale actuelle dépasse 26 %.
- La technologie de l'énergie éolienne s'est également beaucoup améliorée, mais là aussi, il ne reste plus de gain par 10. La limite physique d'une éolienne, la limite de Betz, est une capture maximale de 60% de l'énergie cinétique de l'air en mouvement ; les turbines commerciales dépassent aujourd'hui 40%.
- La production annuelle de la Gigafactory de Tesla, la plus grande usine de batteries au monde, pourrait stocker l'équivalent de trois minutes de la demande annuelle en électricité des États-Unis. Il faudrait 1000 ans de production pour fabriquer suffisamment de batteries pour deux jours de demande d'électricité aux États-Unis. Pendant ce temps, 25 kg à 100 kg de matériaux sont extraits, déplacés et traités pour chaque kilogramme de batterie produit.

LA "NOUVELLE ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE" : UN EXERCICE DE PENSÉE MAGIQUE

Introduction

De plus en plus de voix font chœur et exhortent le public, ainsi que les décideurs gouvernementaux, à accepter la nécessité - voire l'inévitabilité - de la transition de la société vers une "*nouvelle économie de l'énergie*". (Voir l'encadré : *Le pic des hydrocarbures n'est pas bien loin.*) Les défenseurs de cette idée affirment que les changements technologiques rapides sont si perturbateurs et que l'énergie renouvelable devient si bon marché et si rapidement qu'il n'y a aucun risque économique à accélérer le passage à - ou même à rendre obligatoire - un monde post-hydrocarbures qui n'a plus besoin d'utiliser beaucoup, voire plus du tout, de pétrole, de gaz naturel ou de charbon.

Au cœur de cette vision du monde se trouve la proposition selon laquelle le secteur de l'énergie subit le même type de bouleversements technologiques que ceux que la Silicon Valley a apportés à tant d'autres marchés. En effet, les sociétés spécialistes de l'énergie de la "*vieille économie*" sont un mauvais choix pour les investisseurs, selon les partisans de cette nouvelle économie de l'énergie, car les actifs des sociétés d'hydrocarbures seront bientôt sans valeur, ou "échoués".¹ Parier sur les sociétés d'hydrocarbures aujourd'hui, c'est comme parier sur Sears au lieu d'Amazon il y a dix ans.

"*Mission possible*", un rapport de 2018 d'une commission internationale sur les transitions énergétiques, a cristallisé cet ensemble croissant d'opinions des deux côtés de l'Atlantique.² Pour "*décarboner*" l'utilisation de l'énergie, le rapport appelle le monde à s'engager dans trois actions "*complémentaires*" : déployer agressivement les énergies renouvelables ou les technologies prétendues propres, améliorer l'efficacité énergétique et limiter la demande d'énergie.

Cette prescription devrait vous sembler familière, car elle est identique à un consensus quasi-universel sur la politique énergétique qui s'est formé à la suite de l'embargo pétrolier arabe de 1973-74 qui a secoué le monde. Mais alors que les politiques énergétiques du dernier demi-siècle étaient animées par la crainte de l'épuisement des ressources, la crainte aujourd'hui est que la combustion des abondants hydrocarbures de la planète libère des quantités dangereuses de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Certes, l'histoire montre que les grandes transitions énergétiques sont possibles. La question clé aujourd'hui est de savoir si le monde est à l'aube d'une nouvelle transition.

La réponse courte est non. La thèse selon laquelle le monde peut bientôt abandonner les hydrocarbures présente deux failles fondamentales. La première : les réalités de la physique ne permettent pas aux domaines énergétiques de subir le type de changement révolutionnaire vécu aux frontières du numérique. La seconde : aucune technologie énergétique fondamentalement nouvelle n'a été découverte ou inventée depuis près d'un siècle - en tout cas, rien d'analogue à l'invention du transistor ou d'Internet.

Avant d'expliquer ces failles, il est préférable de comprendre les contours de l'économie énergétique actuelle basée sur les hydrocarbures et pourquoi la remplacer serait une entreprise monumentale, voire impossible.

Des politiques qui visent la Lune et le défi du passage à l'échelle

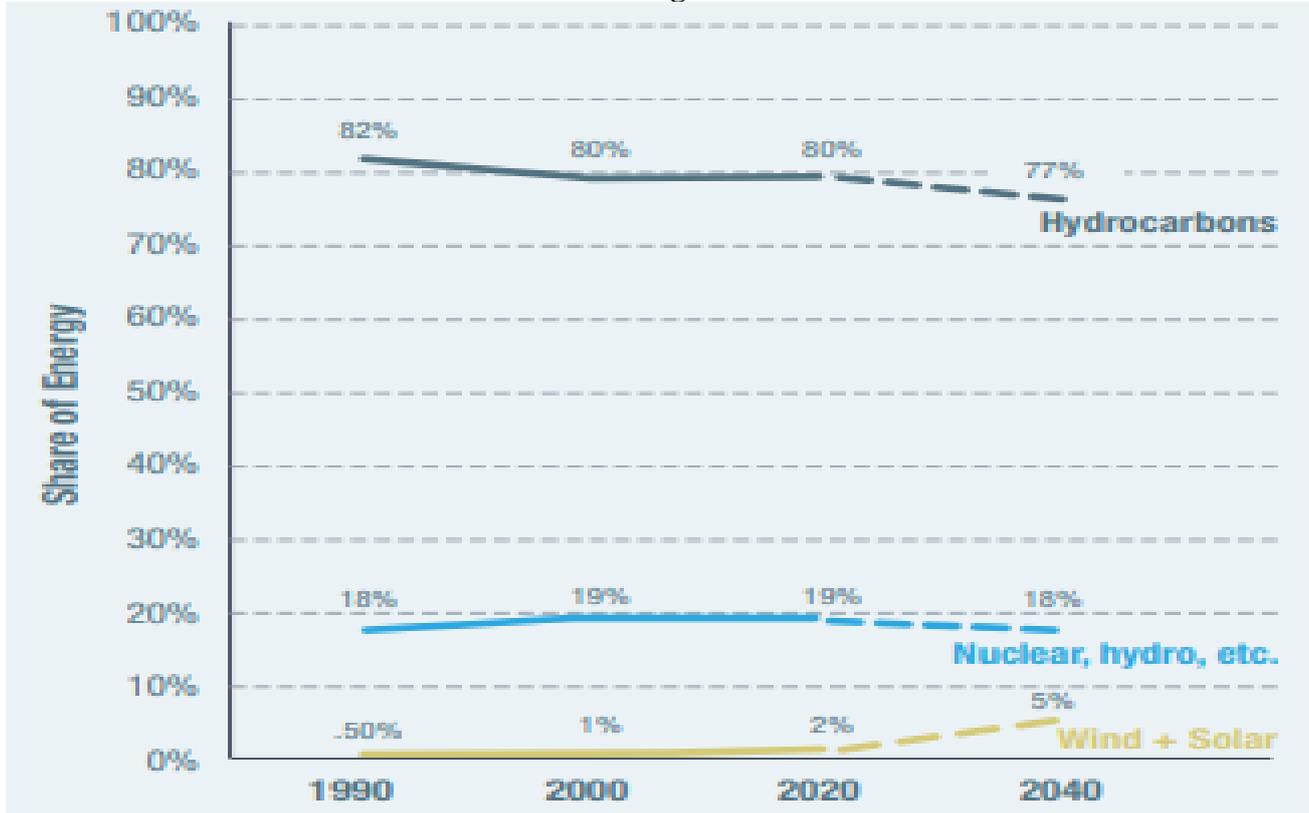
L'univers est inondé d'énergie. Pour l'humanité, le défi a toujours été de fournir de l'énergie d'une manière utile qui soit à la fois tolérable et disponible quand on en a besoin, et non quand la nature ou la chance nous l'offre. Qu'il s'agisse du vent ou de l'eau à la surface du globe, de la lumière du soleil en altitude ou des hydrocarbures enfouis profondément dans la terre, la conversion d'une source d'énergie en une puissance utile nécessite toujours du matériel à forte intensité de capital.

Compte tenu de la population mondiale et de la taille des économies modernes, l'échelle compte. En physique, lorsqu'on tente de modifier un système quelconque, on doit faire face à l'inertie et à diverses forces de résistance ; il est bien plus difficile de faire tourner ou d'arrêter un Boeing qu'un bourdon. Dans un système social, il est bien plus difficile de changer la direction d'un pays que celle d'une communauté locale.

La réalité d'aujourd'hui : les hydrocarbures - pétrole, gaz naturel et charbon - fournissent 84 % de l'énergie mondiale, une part qui n'a que modestement diminué par rapport aux 87 % d'il y a vingt ans (figure 1). 3

Au cours de ces deux décennies, la consommation mondiale totale d'énergie a augmenté de 50 %, soit l'équivalent de l'ajout de la demande de deux États-Unis entiers. 4

FIGURE 1 Comment le monde est alimenté en énergie



Source: ExxonMobil, "2018 Outlook for Energy: A View to 2040"; Energy Information Agency (EIA), "International Energy Statistics"

La baisse de la part des hydrocarbures dans la consommation mondiale d'énergie de quelques pourcents a nécessité plus de 2 000 milliards de dollars de dépenses mondiales cumulées pour des solutions de remplacement au cours de cette période. 5 Les images populaires de champs festonnés d'éoliennes et de toits chargés de cellules solaires ne changent rien au fait que ces deux sources d'énergie fournissent aujourd'hui moins de 2 % de l'approvisionnement énergétique mondial et 3 % de l'approvisionnement énergétique des États-Unis.

Le défi du passage à l'échelle pour toute transformation des ressources énergétiques commence par une description. Aujourd'hui, les économies mondiales nécessitent une production annuelle de 35 milliards de barils de pétrole, plus l'équivalent énergétique de 30 autres milliards de barils de pétrole provenant du gaz naturel, plus l'équivalent énergétique de 28 autres milliards de barils de pétrole provenant du charbon. En termes visuels : si tout ce carburant était sous forme de pétrole, les barils formeraient une ligne de Washington, D.C., à Los Angeles, et cette ligne entière augmenterait en hauteur d'un Washington Monument chaque semaine.

Pour remplacer complètement les hydrocarbures au cours des 20 prochaines années, la production mondiale d'énergie renouvelable devrait être multipliée par au moins 90. 6 Pour situer le contexte, il a fallu un demi-siècle pour que la production mondiale de pétrole et de gaz soit multipliée par 10. 7 Il est illusoire de

penser, en dehors des coûts, qu'une nouvelle forme d'infrastructure énergétique pourrait maintenant se développer neuf fois plus que cela en moins de la moitié du temps.

Le pic des hydrocarbures n'est pas loin (exemples de rêveries)

"*[Les technologies propres sont] un parfait exemple d'un processus exponentiel 10x qui effacera les combustibles fossiles du marché dans une dizaine d'années.*" - TONY SEBA, ÉCONOMISTE À STANFORD "

Jusqu'à présent, les observateurs ont surtout prêté attention à l'efficacité probable des politiques climatiques, mais pas à la transition technologique [énergétique] en cours et effectivement irréversible." - JEAN-FRANÇOIS MERCURE, UNIVERSITÉ DE CAMBRIDGE "

[D'ici] 2030, le coût [du solaire] pourrait être si proche de zéro qu'il sera effectivement gratuit." - SAM ARIE, ANALYSTE DE RECHERCHE UBS "

Le monde connaît une transformation énergétique globale stimulée par les changements technologiques et les nouvelles priorités politiques." - UNION EUROPÉENNE, RAPPORT "MISSION POSSIBLE" POUR LE G20

" *Le passage mondial aux énergies propres est en cours, mais il reste encore beaucoup à faire.*" - LETTRE ADRESSÉE AU SOMMET DU G7 PAR 288 DES PLUS GRANDS INVESTISSEURS MONDIAUX

" *Une taxe sur le carbone devrait augmenter chaque année jusqu'à ce que les objectifs de réduction des émissions soient atteints [ce qui]... encouragera l'innovation technologique [sans carbone] et le développement d'infrastructures à grande échelle.*" - PLAN BAKER-SHULTZ, SIGNÉ PAR DES ÉCONOMISTES, DES NOBÉLISÉS, DES PRÉSIDENTS DE LA FED RESERVE, ETC.

" *Les technologies vertes, comme les batteries et les énergies solaire et éolienne, s'améliorent beaucoup plus vite que beaucoup ne le réalisent [C'est] le plus grand remaniement de l'économie depuis la révolution industrielle.*" - JEREMY GRANTHAM, INVESTISSEUR, MILLIARDAIRE

" *La substitution des smartphones ne semblait pas plus imminente au début des années 2000 que la substitution énergétique à grande échelle ne semble l'être aujourd'hui.*" - FONDS MONÉTAIRE INTERNATIONAL

Source :

Tony Seba, " Clean Disruption " (vidéo), Université de Stanford, 2017 ;

Jean-François Mercure cité dans Steve Hanley, " Carbon Bubble About to Burst, Leaving Trillions in Stranded Assets Behind, Claims New Research ", Clean Technica, 5 juin 2018 ;

Sam Arie, " Renewables Are Primed to Enter the Global Energy Race ", Financial Times, 13 août 2018 ;

OCDE, " Mission possible ", Commission des transitions énergétiques, novembre 2018 ;

Steve Hanley, " En amont de la réunion du G7, les investisseurs demandent instamment la fin de l'énergie au charbon et des subventions aux combustibles fossiles ", Clean Technica, 5 juin 2018 ;

" Déclaration des économistes sur les dividendes carbone " ;

" Le prophète de l'investissement Jeremy Grantham s'attaque au changement climatique ", Bloomberg, 17 janvier 2019 ;

Wall Street Journal, 16 janvier 2019 (plan Baker-Shultz) ;

Fonds monétaire international, " Riding the Energy Transition : Oil Beyond 2040 ", mai 2017

Si l'objectif initial était plus modeste - par exemple, remplacer les hydrocarbures uniquement aux États-Unis et uniquement ceux utilisés pour la production d'électricité - le projet nécessiterait un effort industriel supérieur à une mobilisation de niveau Seconde Guerre mondiale.8 Une transition vers une électricité

100 % sans hydrocarbures ou charbon d'ici 2050 nécessiterait un programme de construction du réseau américain 14 fois plus important que l'effort de construction du réseau électrique qui a eu lieu au cours du dernier demi-siècle. 9

Puis, pour achever la transformation, il faudrait plus que doubler cet effort prométhéen pour s'attaquer aux secteurs non électriques, où sont consommés 70 % des hydrocarbures américains. Et tout cela ne concernerait que 16 % de la consommation mondiale d'énergie, soit la part de l'Amérique.

Ce défi de taille suscite une réponse commune : "*Si nous pouvons envoyer un homme sur la lune, nous pouvons sûrement [remplir le blanc avec n'importe quel objectif ambitieux]*". Mais transformer l'économie de l'énergie n'est pas comme envoyer quelques personnes sur la Lune à quelques reprises. Il s'agit de mettre toute l'humanité sur la Lune – et ça de façon permanente.

Les coûts réels de l'énergie éolienne et solaire sont déterminés par la physique

Les technologies qui délimitent la vision de la nouvelle économie de l'énergie se résument à trois choses : les éoliennes, les panneaux solaires et les batteries.¹⁰ Bien que les batteries ne produisent pas d'énergie, elles sont essentielles pour garantir la disponibilité pour les foyers, les entreprises et les transports de ces énergie éolienne et solaire intermittentes.

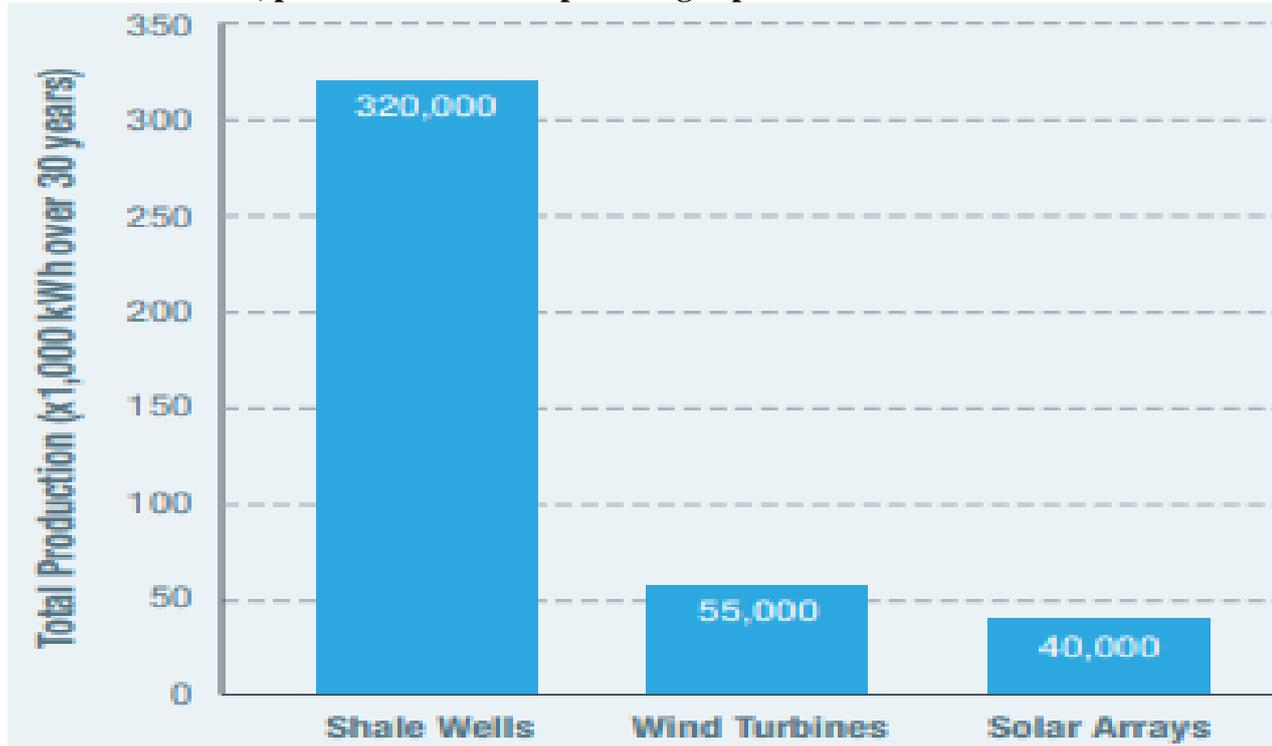
Pourtant, les éoliennes et l'énergie solaire ne sont pas elles-mêmes de "*nouvelles*" sources d'énergie. L'éolienne moderne est apparue il y a 50 ans et a été rendue possible par de nouveaux matériaux, notamment la fibre de verre faite avec des hydrocarbures. La première technologie solaire commercialement viable date également d'un demi-siècle, tout comme l'invention de la batterie au lithium (par un chercheur d'Exxon).¹¹

Au fil des décennies, ces trois technologies se sont grandement améliorées et sont devenues environ 10 fois moins chères.¹² Subventions mises à part, ce fait explique pourquoi, au cours des dernières décennies, l'utilisation de l'éolien et du solaire s'est tellement développée à partir d'une base nulle. Néanmoins, la technologie éolienne, solaire et des batteries continuera à s'améliorer, dans certaines limites. Ces limites ont une grande importance - sur lesquelles nous reviendrons plus tard - en raison de la demande écrasante d'énergie dans le monde moderne et des réalités des sources d'énergie offertes par Mère Nature.

Avec la technologie actuelle, des panneaux solaires d'une valeur d'un million de dollars produiront environ 40 millions de kilowattheures (kWh) sur une période de fonctionnement de 30 ans (figure 2). Une mesure similaire s'applique à l'énergie éolienne : une éolienne moderne d'une valeur d'un million de dollars produit 55 millions de kWh sur la même période de 30 ans.¹³

Pendant ce temps, 1 million de dollars de matériel pour une plate-forme de forage de gaz de schiste produira suffisamment de gaz naturel sur 30 ans pour générer plus de 300 millions de kWh.¹⁴ Cela représente environ 600 % d'électricité en plus pour le même capital dépensé en matériel de production d'énergie primaire.¹⁵

FIGURE 2. Production totale d'électricité sur 30 ans à partir d'un matériel à un million de dollars : Turbines éoliennes, panneaux solaires et puits de gaz/pétrole schiste.



Source : Lazard, " Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis ", 2018 ; Gulfport Energy, Credit Suisse Energy Summit, 2019 ; Cabot Oil & Gas, Heikkinen Energy Conference, 15 août 2018.

Les différences fondamentales entre ces ressources énergétiques peuvent également être illustrées en termes d'équipements individuels. Pour le coût du forage d'un seul puits de gaz de schiste, on peut construire deux éoliennes de 500 pieds de haut et de 2 mégawatts (MW). Ces deux éoliennes produisent un rendement combiné qui, au fil des ans, équivaut en moyenne à l'énergie de 0,7 baril de pétrole par heure. Le même argent dépensé pour une seule plate-forme de forage de schiste produit 10 barils de pétrole par heure, ou son équivalent énergétique en gaz naturel, en moyenne au fil des décennies.¹⁶

Cette énorme disparité de production découle des différences inhérentes aux densités énergétiques qui sont des caractéristiques de la Nature insensibles aux aspirations du public et aux subventions gouvernementales. La haute densité énergétique de la chimie physique des hydrocarbures est unique et bien comprise, tout comme la science qui sous-tend la faible densité énergétique inhérente à la lumière du soleil en surface, aux volumes et à la vitesse du vent. ¹⁷

Indépendamment de ce que les gouvernements imposent aux services publics de payer pour cette production, la quantité d'énergie produite est déterminée par la quantité de lumière solaire ou de vent disponible sur une période donnée et par la physique des efficacités de conversion des cellules photovoltaïques ou des éoliennes.

Ce genre de comparaisons entre l'éolien, le solaire et le gaz naturel illustre le point de départ pour rendre utile une ressource énergétique brute. Mais pour que toute forme d'énergie devienne une source primaire d'énergie, il faut une technologie supplémentaire. Pour le gaz, on dépense nécessairement de l'argent dans un turbogénérateur pour convertir le combustible en électricité de réseau. Pour l'énergie éolienne/solaire, il faut dépenser pour une certaine forme de stockage afin de convertir l'électricité intermittente en électricité de qualité industrielle, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Le coût élevé à payer pour assurer la disponibilité de l'énergie

La disponibilité est la caractéristique la plus critique de toute infrastructure énergétique, suivie par le prix, puis par l'éternelle recherche de la diminution des coûts sans affecter la disponibilité. Jusqu'à l'ère de l'énergie moderne, le progrès économique et social a été entravé par la nature épisodique de la disponibilité de l'énergie. C'est pourquoi, jusqu'à présent, plus de 90 % de l'électricité américaine, et 99 % de l'énergie utilisée dans les transports, proviennent de sources qui peuvent facilement fournir de l'énergie à tout moment sur demande.¹⁸

Dans notre société centrée sur les données et de plus en plus électriée, une énergie toujours disponible est vitale. Pour les systèmes à base d'hydrocarbures, la disponibilité est dominée par le coût de l'équipement qui peut convertir le carburant en énergie de manière continue pendant au moins 8 000 heures par an, pendant des décennies. Pendant ce temps, il est intrinsèquement facile de stocker le carburant associé pour répondre aux hausses prévues ou inattendues de la demande, ou aux défaillances de livraison dans la chaîne d'approvisionnement causées par les conditions météorologiques ou les accidents.

Il en coûte moins d'un dollar par baril pour stocker du pétrole ou du gaz naturel (en termes d'équivalent pétrole-énergie) pendant quelques mois. ²⁰ Le stockage du charbon est encore moins cher. Ainsi, sans surprise, les États-Unis ont, en moyenne, environ un à deux mois de demande nationale en stockage pour chaque type d'hydrocarbure à tout moment. ²¹

Mais avec les batteries, il en coûte environ 200 \$ pour stocker l'énergie équivalente à un baril de pétrole. ²² Ainsi, au lieu de mois d'énergie stockés, ce sont à peine deux heures de demande nationale d'électricité qui pourraient être stockées en combinant toutes les batteries de taille industrielle dans le réseau et toutes les batteries du million de voitures électriques qui existent aujourd'hui en Amérique. ²³

Pour l'éolien/solaire, les caractéristiques qui dominent le coût de la disponibilité sont inversées, par rapport aux hydrocarbures. Bien que les panneaux solaires et les éoliennes s'usent et nécessitent également une maintenance, la physique et donc les coûts supplémentaires de cette usure sont moins difficiles que pour les turbines à combustion. Mais l'électrochimie complexe et comparativement instable des batteries constitue un moyen intrinsèquement plus coûteux et moins efficace de stocker l'énergie et d'assurer sa disponibilité.

Puisque les hydrocarbures sont si facilement stockés, les centrales électriques conventionnelles inactives peuvent être gérées et relancées – leur production augmentée et diminuée – pour suivre la demande cyclique d'électricité. Les éoliennes et les panneaux solaires ne peuvent pas être utilisés en l'absence de vent ou de soleil. D'un point de vue géophysique, les machines alimentées par le vent et le soleil produisent de l'énergie, en moyenne sur une année, environ 25 à 30 % du temps, souvent bien moins. ²⁴ Les centrales électriques conventionnelles, au contraire, ont une "disponibilité" très élevée, de l'ordre de 80 à 95 % du temps, et souvent plus. ²⁵

Un réseau éolien/solaire devrait être dimensionné pour répondre à la fois à la demande de pointe et pour disposer d'une capacité supplémentaire suffisante au-delà des besoins de pointe afin de produire et de stocker de l'électricité supplémentaire lorsque le soleil et le vent sont disponibles. Cela signifie, en moyenne, qu'un système purement éolien/solaire devrait nécessairement avoir une capacité environ trois fois supérieure à celle d'un réseau alimenté par des centrales à charbon ou à hydrocarbures : c'est-à-dire qu'il faut construire 3 kW d'équipement éolien/solaire pour chaque 1 kW d'équipement de combustion éliminé. Cela se traduit directement par un coût multiplié par trois, même si les coûts par kW étaient tous identiques.²⁶

Et même cette capacité supplémentaire nécessaire ne suffirait pas. Les données météorologiques et d'exploitation montrent que la production mensuelle moyenne d'électricité éolienne et solaire peut être divisée par deux pendant la saison " basse " de chacune de ces ressources. ²⁷

Le mythe de la « *parité réseau* »

Comment ces désavantages en termes de capacité et de coûts peuvent-ils être compatibles avec les affirmations selon lesquelles l'éolien et le solaire sont déjà à la "*parité réseau*" ou presque avec les sources d'électricité conventionnelles ?

L'Agence d'information sur l'énergie (EIA) des États-Unis et d'autres analyses similaires font état d'un "*coût lissé de l'énergie*" (LCOE, "*levelized cost of energy*") pour tous les types de technologies d'énergie électrique. Dans les calculs du LCOE de l'EIA, l'électricité provenant d'une éolienne ou d'un panneau solaire est calculée comme étant 36 % et 46 %, respectivement, plus chère que celle provenant d'une turbine au gaz naturel - c'est-à-dire, proche de la parité. 28

Mais dans une mise en garde critique et pourtant rarement rappelée, l'EIA déclare :

"Les valeurs de LCOE pour les technologies disponibles à la demande (dispatchable) et celles qui ne le sont pas sont indiquées séparément dans les tableaux car leur comparaison doit être effectuée avec soin" 29 (c'est nous qui soulignons).

En d'autres termes, les calculs du LCOE ne tiennent pas compte de l'ensemble des coûts réels, voire cachés, nécessaires au fonctionnement d'une infrastructure énergétique fiable 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an - ou, en particulier, d'un réseau qui utiliserait uniquement l'énergie éolienne/solaire.

Le LCOE considère le matériel de manière isolée tout en ignorant les coûts réels du système, essentiels pour fournir de l'énergie 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Tout aussi trompeur, le calcul du LCOE, malgré sa précision illusoire, repose sur une multitude d'hypothèses et de suppositions sujettes à contestations, voire franchement tendancieuses et biaisées.

Par exemple, un LCOE suppose que le coût futur des combustibles concurrents - notamment le gaz naturel - augmentera considérablement. Mais ça signifie que le LCOE est plus une prévision qu'un calcul. Ceci est important car un "*coût lissé*" utilise cette prévision pour calculer un prétendu *coût moyen sur longue période*. L'hypothèse selon laquelle les prix du gaz vont augmenter est en contradiction avec le fait qu'ils ont diminué au cours de la dernière décennie et avec les preuves que les prix bas sont la nouvelle normalité dans un avenir prévisible. [NdT : article écrit en 2019 ; le Henry hub spot gas price a été de 2 \$/MBtu en moyenne en 2020, de 3.3\$/MBtu le 29 déc. 2021 mais est monté à 7,35\$/MBtu le 19 juillet 2022 suite au boycott du gaz russe ; <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>] 30. L'ajustement du calcul du LCOE pour refléter un avenir où les prix du gaz n'augmentent pas augmente radicalement l'avantage du coût LCOE du gaz naturel par rapport à l'éolien/solaire.

Un LCOE incorpore une caractéristique encore plus subjective, appelée "taux d'actualisation", qui est une façon de comparer la valeur de l'argent aujourd'hui par rapport au futur. Un taux d'actualisation faible a pour effet de faire pencher la balance pour rendre plus attrayant le fait de dépenser aujourd'hui un capital précieux pour résoudre un problème futur (et très théorique). Les partisans de l'utilisation de faibles taux d'actualisation supposent essentiellement une croissance économique lente. 31 [NdT : écrit en 2019 (inflation 2,3% aux USA) avant l'inflation de 7% en 2021 et 9,1% en 2022.]

Un taux d'actualisation élevé suppose effectivement que la société future sera beaucoup plus riche que celle d'aujourd'hui (sans parler d'une meilleure technologie). 32 Les travaux de l'économiste William Nordhaus dans ce domaine, où il préconise l'utilisation d'un taux d'actualisation élevé, lui ont valu le prix Nobel 2018.

Un LCOE nécessite également de faire une hypothèse sur les facteurs de capacité moyens sur plusieurs décennies, c'est-à-dire la part de temps pendant laquelle les équipements fonctionnent réellement (c'est-à-dire la durée réelle, et non théorique, pendant laquelle le soleil brille et le vent souffle). L'EIA suppose, par exemple, des facteurs de capacité de 41 % et 29 %, respectivement, pour l'éolien et le solaire. Mais les données recueillies auprès de parcs éoliens et solaires en exploitation révèlent des facteurs de capacité médians réels de seulement 33 % et 22 % [aux USA]. 33 La différence entre l'hypothèse d'un facteur de capacité de 40 % et l'expérience d'un facteur de capacité de 30 % signifie que, sur la durée de vie de 20 ans d'une éolienne de 2 MW, 3 millions de dollars de production d'énergie supposée dans les modèles financiers n'existeront pas - et ce pour une éolienne dont le coût initial en capital est d'environ 3 millions de dollars.

Les facteurs de capacité des parcs éoliens américains se sont améliorés, mais à un rythme lent d'environ 0,7 % par an au cours des deux dernières décennies. 34 Notamment, ce gain a été obtenu principalement en réduisant le nombre par hectare de turbines qui tentent de capter l'air en mouvement - ce qui a entraîné une augmentation d'environ 50 % de la surface moyenne utilisée par unité d'énergie éolienne.

Les calculs du LCOE incluent raisonnablement des coûts tels que les taxes, le coût des emprunts et la maintenance. Mais ici aussi, les résultats mathématiques donnent l'apparence de la précision tout en cachant des hypothèses. Par exemple, les hypothèses concernant les coûts de maintenance et les performances des éoliennes sur le long terme peuvent être trop optimistes. Des données provenant du Royaume-Uni, qui est plus loin sur la voie de l'éolien que les États-Unis, indiquent une dégradation beaucoup plus rapide (moins d'électricité par éolienne) que ce qui avait été prévu à l'origine. 35

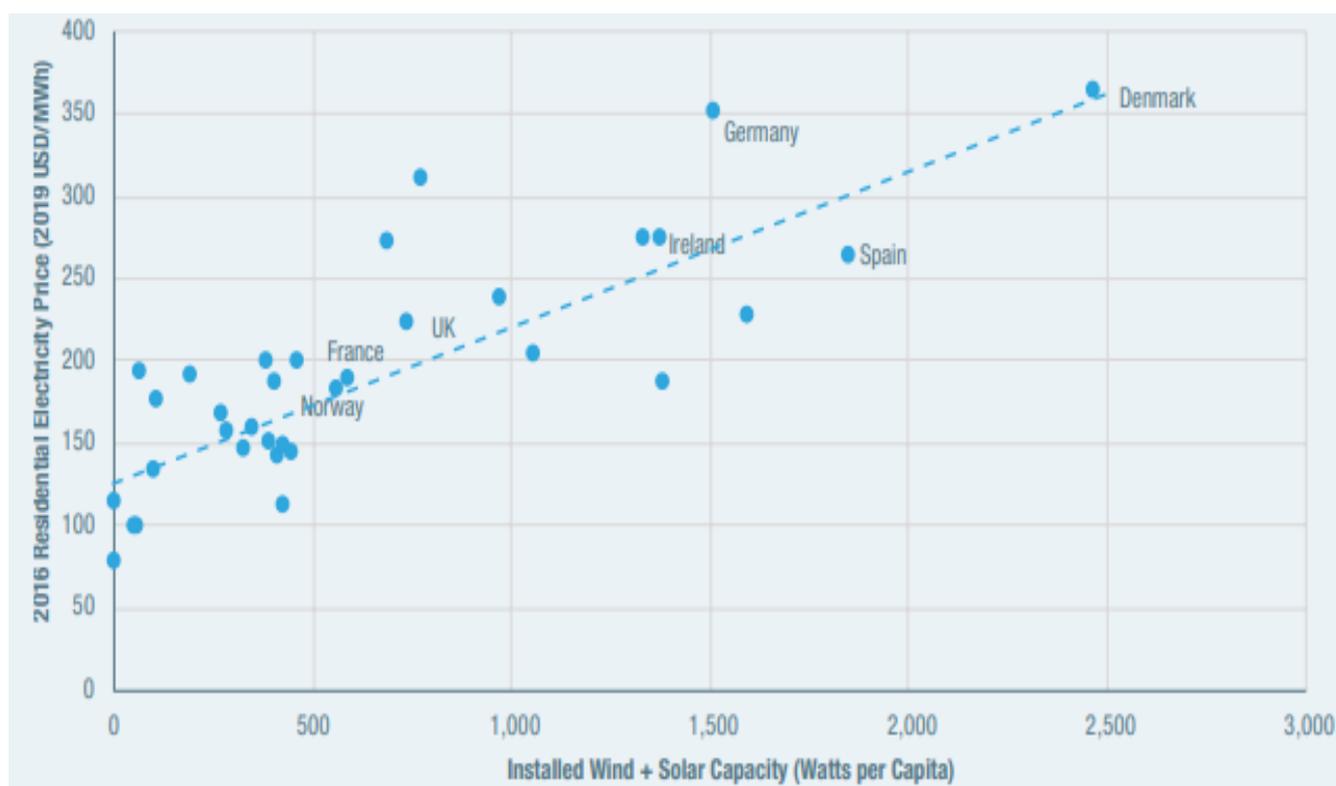
Pour résoudre au moins un des problèmes liés à l'utilisation du LCOE, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a récemment proposé l'idée d'un « *value adjusted* » LCOE " ou LCOE *ajusté en valeur* ", ou VALCOE, afin d'inclure les éléments de flexibilité et d'intégrer les implications économiques de la capacité à répondre à la demande. Les calculs de l'AIE utilisant une méthode VALCOE ont révélé que l'énergie du charbon, par exemple, est bien moins chère que l'énergie solaire, avec une pénalité de coût qui s'accroît à mesure qu'augmente la pourcentage de la production solaire dans un réseau. 36

On pourrait s'attendre à ce que, bien avant qu'un réseau soit 100 % éolien/solaire, les types de coûts réels décrits ci-dessus soient déjà visibles. Il se trouve que, indépendamment des LCOE putatifs, nous avons des preuves de l'impact économique qui découle de l'augmentation de l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire.

Les coûts cachés d'un réseau électrique « vert »

Les subventions, les préférences fiscales et les obligations réglementaires d'employer certaines sources de préférence à d'autres peuvent cacher les coûts réels, mais leur accumulation en rend l'effet visible dans les coûts globaux du système. Et c'est le cas. En Europe, les données montrent que plus la part d'énergie éolienne/solaire est élevée, plus le coût moyen de l'électricité du réseau est élevé (figure 3).

FIGURE 3. Capacité éolienne/solaire installée et prix de l'électricité en Europe pour les ménages (2019 USD/MWh)



Source : Eurostat, "Prix de l'électricité pour les consommateurs résidentiels - Données semestrielles (à partir de 2007)".

L'Allemagne et la Grande-Bretagne, bien engagées sur la voie des " nouvelles énergies ", ont vu les tarifs moyens de l'électricité augmenter de 60% à 110 % au cours des deux dernières décennies. 37 Le même schéma - plus d'éolien/de solaire et des factures d'électricité plus élevées - est visible en Australie et au Canada. 38

Étant donné que la part de l'énergie éolienne, sur une base par habitant, aux États-Unis ne représente encore qu'une petite fraction de celle de la plupart des pays européens, l'impact des coûts sur les contribuables américains est moins spectaculaire et moins visible. Néanmoins, les coûts moyens d'électricité résidentielle aux États-Unis ont augmenté d'environ 20 % au cours des 15 dernières années. 39 Cela n'aurait pas dû être le cas. Les tarifs électriques moyens auraient dû baisser, et non augmenter.

Voici pourquoi : le charbon et le gaz naturel ont fourni ensemble environ 70 % de l'électricité au cours de cette période de 15 ans. 40 Le prix du combustible représente environ 60 à 70 % du coût de production de l'électricité lorsqu'on utilise du charbon ou des hydrocarbures. 41 Ainsi, environ la moitié du coût moyen de l'électricité américaine dépend des prix du charbon et du gaz. Le prix de ces deux combustibles a baissé de plus de 50 % au cours de cette période de 15 ans. Les coûts des services publics, plus précisément l'achat de gaz et de charbon, ont baissé de quelque 25 % au cours de la seule dernière décennie. En d'autres termes, les économies réalisées grâce à la révolution du gaz de schiste ont considérablement protégé les consommateurs, jusqu'à présent, contre des augmentations de tarifs encore plus élevées.

L'utilisation accrue de l'énergie éolienne/solaire impose une variété de coûts cachés, basés sur la physique, mais rarement reconnus dans la comptabilité des services publics ou des gouvernements. Par exemple, lorsque de grandes quantités d'énergie doivent rapidement, répétitivement et de manière imprévisible croître et décroître, le défi et les coûts associés à "l'équilibrage" d'un réseau (c'est-à-dire l'empêcher de tomber en panne) sont considérablement accrus. Les analystes de l'OCDE estiment qu'au moins certains de ces coûts "invisibles" imposés au réseau ajoutent de 20% à 50 % au coût des kilowattheures du réseau.42

En outre, le fait de faire passer le rôle des centrales électriques existantes du réseau du statut de fournisseur primaire à secours pour l'éolien/le solaire entraîne d'autres coûts réels mais non affectés qui découlent des réalités physiques. L'augmentation du nombre de cycles montée/descente des centrales électriques conventionnelles en accroît l'usure et les coûts de maintenance. Cela réduit également le temps d'utilisation de ces actifs coûteux, ce qui signifie que les coûts d'investissement sont répartis sur moins de kWh produits - augmentant ainsi arithmétiquement le coût de chacun de ces kilowattheures. 43

Ensuite, si la part d'énergie intermittente devient importante, la probabilité de pannes complètes du système augmente. C'est ce qui s'est produit à deux reprises après que le vent se soit arrêté de façon inattendue (avec des clients privés d'électricité pendant plusieurs jours dans certaines régions) dans l'État d'Australie-du-Sud qui tire plus de 40 % de son électricité du vent.44

Après une panne totale du système en Australie-du-Sud en 2018, Tesla, a, avec beaucoup de fanfare médiatique, installé sur ce réseau la plus grande " ferme " de batteries au lithium du monde. 45 Pour donner un contexte, pour garder l'Australie-du-Sud allumée pendant une demi-journée sans vent, il faudrait 80 de ces « fermes de batteries Tesla » " les plus grandes du monde ", et ce sur un réseau qui ne dessert que 2,5 millions de personnes.

Les ingénieurs ont d'autres moyens pour parvenir à assurer le service ; ils utilisent les bons vieux générateurs géants à moteur diesel en guise de secours (des moteurs essentiellement identiques à ceux qui propulsent les navires de croisière ou qui sont utilisés pour la sauvegarde des centres de données). Sans fanfare, en raison de l'utilisation croissante du vent, les services publics américains ont installé de tels moteurs, de taille « réseau », à un rythme effréné. Le réseau compte désormais plus de 4 milliards de dollars de générateurs à moteur diesel ou à gaz, de taille « réseau » (assez pour une centaine de navires de croisière), et beaucoup d'autres sont à venir. La plupart brûlent du gaz naturel, bien que beaucoup d'entre eux soient alimentés au pétrole. Trois fois plus de ces gros moteurs à mouvement alternatif ont été ajoutés au réseau américain au cours des deux dernières décennies que pendant le demi-siècle qui les a précédé. 46

Tous ces coûts sont réels mais ne sont pas attribués aux générateurs éoliens ou solaires. Mais les consommateurs d'électricité les paient. Une façon de comprendre ce qui se passe : gérer les réseaux avec des coûts cachés imposés aux acteurs non favorisés reviendrait à imposer des frais aux automobilistes pour l'usure des routes causée par les poids lourds tout en subventionnant le coût du carburant de ces camions.

Le problème de l'énergie éolienne et solaire se résume à un point simple : il n'ont pas d'utilité pratique à l'échelle nationale en tant que source majeure ou primaire pour la production d'électricité. Comme pour toute technologie, il est possible de repousser les limites de l'utilisation pratique, mais cela n'est généralement ni raisonnable ni rentable. Les hélicoptères offrent une analogie instructive.

Le développement d'un hélicoptère pratique dans les années 1950 (quatre décennies après son invention) a suscité des commentaires hyperboliques et généralisés sur cette technologie qui allait révolutionner le transport personnel. Aujourd'hui, la fabrication et l'utilisation d'hélicoptères constituent une industrie de niche de plusieurs milliards de dollars qui fournit des services utiles et souvent vitaux. Mais on n'utiliserait pas plus les hélicoptères pour des voyages réguliers sur l'Atlantique - bien que cela soit possible avec une logistique élaborée - qu'on n'emploierait un réacteur nucléaire pour alimenter un train ou des systèmes photovoltaïques pour alimenter un pays.

Les batteries ne peuvent pas sauver ni le réseau ni la planète

Les batteries sont un élément central des aspirations de la nouvelle économie de l'énergie. La découverte d'une technologie capable de stocker l'électricité de manière aussi efficace et bon marché que, par exemple, le pétrole dans un baril ou le gaz naturel dans une caverne souterraine révolutionnerait le monde.⁴⁷ Un tel matériel de stockage de l'électricité rendrait même inutile la construction de centrales électriques nationales. On pourrait imaginer une OKEC (Organisation des pays exportateurs de kilowattheures) qui expédierait des barils d'électrons à travers le monde à partir des nations où le coût de remplissage de ces "barils" est le plus bas ; des panneaux solaires dans le Sahara, des mines de charbon en Mongolie (hors de portée des régulateurs occidentaux), ou les grandes rivières du Brésil.

Mais dans l'univers dans lequel nous vivons, le coût du stockage de l'énergie dans des batteries à l'échelle du réseau est, comme nous l'avons déjà indiqué, environ 200 fois plus élevé que le coût du stockage du gaz naturel pour produire de l'électricité au moment voulu.⁴⁸ C'est pourquoi nous stockons, à tout moment, des mois d'approvisionnement énergétique national sous forme de gaz naturel ou de pétrole.

Le stockage des batteries est une tout autre affaire. Prenons l'exemple de Tesla, le fabricant de batteries le plus connu au monde : 200 000 \$ de batteries Tesla, qui pèsent collectivement plus de 20 000 livres, sont nécessaires pour stocker l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole. ⁴⁹ Un baril de pétrole, lui, pèse 300 livres [136 kg] et peut être stocké dans un réservoir de 20 \$. Telles sont les réalités des batteries au lithium d'aujourd'hui. Même une amélioration de 200 % de l'économie et de la technologie sous-jacentes des batteries ne permettra pas de combler un tel écart.

Néanmoins, les décideurs politiques américains et européens adoptent avec enthousiasme les programmes et les subventions visant à étendre considérablement la production et l'utilisation des batteries pour le réseau. ⁵⁰ Des quantités étonnantes de batteries seront nécessaires pour maintenir les réseaux nationaux sous tension, et le niveau requis d'extraction des matières premières nécessaires sera épique. Pour les États-Unis, du moins, étant donné l'endroit où les matériaux sont extraits et où les batteries sont fabriquées, les importations augmenteraient radicalement. Voici des aperçus de ces réalités.

Combien de batteries faudrait-il pour éclairer les USA ?

Un réseau entièrement basé sur le vent et le soleil nécessite d'aller au-delà de la préparation à la variabilité quotidienne normale du vent et du soleil ; il faut également se préparer à la fréquence et à la durée des périodes où il y aurait non seulement beaucoup moins de vent et de soleil combinés, mais aussi des périodes où il n'y aurait ni l'un ni l'autre. Bien que peu fréquent, un tel événement combiné - couverture nuageuse continentale de jour sans vent significatif où que ce soit, ou nuit sans vent - s'est produit plus d'une douzaine

de fois au cours du siècle dernier - en fait, une fois par décennie. À ces occasions, un réseau combiné éolien/solaire ne serait pas en mesure de produire même une infime partie des besoins en électricité de la nation. Il y a également eu de fréquentes périodes d'une heure pendant lesquelles 90 % de l'approvisionnement électrique national disparaîtrait .51

Alors, combien de batteries seraient nécessaires pour stocker, disons, non pas deux mois mais deux jours d'électricité de la nation ? La "Gigafactory" de Tesla au Nevada, d'une valeur de 5 milliards de dollars, est actuellement la plus grande usine de fabrication de batteries au monde. 52 Sa production annuelle totale pourrait stocker l'équivalent de trois minutes de la demande annuelle en électricité des États-Unis. Ainsi, pour fabriquer une quantité de batteries permettant de stocker l'équivalent de deux jours de demande d'électricité aux États-Unis, il faudrait 1 000 ans de production de la Gigafactory.

Les défenseurs de l'énergie éolienne/solaire proposent de minimiser l'utilisation des batteries avec des lignes de transmission extrêmement longues en partant du principe qu'il y a toujours du vent ou du soleil quelque part. Bien que théoriquement réalisable (mais ce n'est pas toujours vrai, même à l'échelle d'un pays), la longueur des lignes de transmission nécessaires pour atteindre un endroit "encore" ensoleillé/ou venteux entraîne également des défis importants en matière de fiabilité et de sécurité. (Et le transport d'énergie sur de longues distances par fil est deux fois plus cher que par pipeline) 53.

La production de quantités massives de batteries aurait des implications épiques pour l'exploitation minière

L'une des principales raisons de la poursuite d'une *nouvelle économie de l'énergie* est de réduire les externalités environnementales liées à l'utilisation des hydrocarbures. Si, de nos jours, l'accent est principalement mis sur les effets putatifs à long terme du dioxyde de carbone, toutes les formes de production d'énergie entraînent diverses externalités non réglementées inhérentes à l'extraction, au déplacement et au traitement des minéraux et des matériaux.

Une augmentation radicale de la production de batteries aura un impact considérable sur l'exploitation minière, ainsi que sur l'énergie utilisée pour accéder aux minéraux, les traiter et les déplacer, et sur l'énergie nécessaire au processus de fabrication des batteries lui-même. Environ 60 kg de batteries sont nécessaires pour stocker l'énergie équivalente à celle contenue dans un kg d'hydrocarbures. Parallèlement, entre 50 et 100 kg de matériaux divers sont extraites, déplacées et traitées pour chaque kg de batterie produite. 54 Ces réalités sous-jacentes se traduisent par d'énormes quantités de minéraux - tels que le lithium, le cuivre, le nickel, le graphite, les terres rares et le cobalt - qu'il faudrait extraire de la terre pour fabriquer des batteries pour les réseaux et les voitures.55 Un avenir centré sur les batteries signifie que le monde devra extraire des gigatonnes de matériaux supplémentaires.56 Et cela ne tient pas compte des gigatonnes de matériaux nécessaires à la fabrication des éoliennes et des panneaux solaires.57

Même sans une *nouvelle économie de l'énergie*, l'exploitation minière nécessaire à la fabrication des batteries dominera bientôt la production de nombreux minéraux. Aujourd'hui, la production de batteries au lithium représente déjà environ 40 % et 25 %, respectivement, de l'ensemble de l'exploitation minière du lithium et du cobalt.58 Dans un avenir tout en batteries, l'exploitation minière mondiale devrait augmenter de plus de 200 % pour le cuivre, d'au moins 500 % pour les minéraux comme le lithium, le graphite et les terres rares, et de beaucoup plus pour le cobalt.59

Viennent ensuite les hydrocarbures et l'électricité nécessaires pour ces activités minières et pour la fabrication des batteries elles-mêmes. En gros, il faut l'équivalent énergétique d'environ 100 barils de pétrole pour fabriquer une quantité de batteries pouvant stocker l'énergie équivalente à un seul baril de pétrole. 60

Compte tenu de l'hostilité réglementaire à l'égard de l'exploitation minière sur le continent américain, un avenir énergétique centré sur les batteries garantit davantage d'exploitation minière ailleurs et une dépendance croissante de l'Amérique vis-à-vis des importations. La plupart des mines concernées dans le monde se trouvent au Chili, en Argentine, en Australie, en Russie, au Congo et en Chine. Notamment, la

République démocratique du Congo produit 70 % du cobalt mondial, et la Chine raffine 40 % de cette production pour le monde entier.⁶¹

La Chine domine déjà la fabrication mondiale de batteries et est en passe de fournir près des deux tiers de la production totale d'ici 2020. ⁶² Pour revenir à la vision de la *nouvelle économie de l'énergie* : 70 % du réseau électrique chinois est alimenté par le charbon aujourd'hui et le sera encore à 50 % en 2040. ⁶³ Cela signifie que, pendant la durée de vie des batteries, les émissions de dioxyde de carbone associées à leur fabrication seront supérieures à celles qui seraient compensées par l'utilisation de ces batteries pour, par exemple, remplacer les moteurs à combustion interne. ⁶⁴

La transformation du transport des personnes des véhicules à hydrocarbures en véhicules à batteries est un autre pilier central de la *nouvelle économie de l'énergie*. Les véhicules électriques (VE) devraient non seulement remplacer le pétrole sur les routes, mais aussi servir de stockage de secours pour le réseau électrique.⁶⁵

Les batteries au lithium ont enfin permis aux VE de devenir raisonnablement pratiques. Tesla, qui vend désormais en Amérique plus de voitures dans la catégorie de prix supérieure que Mercedes-Benz, a inspiré une ruée des fabricants du monde entier pour produire des véhicules à batterie attrayants. ⁶⁶ Cela a enhardi les aspirations des bureaucraties visant à interdire purement et simplement de la vente de moteurs à combustion interne, notamment en Allemagne, en France, en Grande-Bretagne et, sans surprise, en Californie.

Une telle interdiction n'est pas facile à imaginer. Les optimistes prévoient que le nombre de Véhicules Electriques (VE) dans le monde passera de près de 4 millions aujourd'hui à 400 millions en deux décennies. ⁶⁷ Un monde avec 400 millions de VE en 2040 diminuerait la demande mondiale de pétrole d'à peine 6 %. Cela semble contre-intuitif, mais les chiffres sont simples. Il y a environ 1 milliard d'automobiles aujourd'hui, et elles utilisent environ 30 % du pétrole mondial. ⁶⁸ (Les camions lourds, l'aviation, la pétrochimie, le chauffage, etc. utilisent le reste.) En 2040, il y aurait environ 2 milliards de voitures dans le monde. Quatre cents millions de VE représenteraient 20 % de toutes les voitures en circulation - ce qui remplacerait donc environ 6 % de la demande de pétrole.

Quoi qu'il en soit, les batteries ne représentent pas une révolution dans la mobilité personnelle équivalente, disons, au passage de la calèche à cheval (buggy) à la voiture - une analogie qui a été invoquée. ⁶⁹

Conduire un VE ressemble plus à changer l'alimentation des chevaux en important le nouveau fourrage.

La loi de Moore appliquée en dépit du bon sens

Malgré toutes les réalités exposées ci-dessus sur technologies vertes, les adeptes et enthousiastes de la nouvelle économie de l'énergie croient que de véritables percées sont à venir et sont même inévitables. En effet, on prétend que les technologies de l'énergies vont suivre la même trajectoire que celle observée ces dernières décennies dans le domaine de l'informatique et des communications. Le monde verra encore l'équivalent d'un Amazon ou d'un "Apple de l'énergie propre".⁷⁰

Cette idée est séduisante en raison des avancées stupéfiantes des technologies des circuits intégrés silicium que si peu de prévisionnistes ont anticipé il y a quelques décennies. C'est une idée qui rend caduque toute mise en garde contre le fait que l'éolien, le solaire et les batteries sont trop chers aujourd'hui - une telle mise en garde est considérée comme insensée et à courte vue, analogue à l'affirmation, vers 1980, que le citoyen moyen ne pourrait jamais s'offrir un ordinateur. Ou de dire, en 1984 (année de la sortie du premier téléphone cellulaire au monde), qu'un milliard de personnes posséderaient un téléphone cellulaire, alors qu'en 1984 ça coûtait 9 000 \$ (dollars d'aujourd'hui). Il s'agissait d'une "brique" de deux livres avec une durée de conversation de 30 minutes.

Les smartphones d'aujourd'hui sont non seulement beaucoup moins chers, mais ils sont aussi beaucoup plus puissants qu'un ordinateur central IBM qui, il y a 30 ans, occupait toute une pièce. Cette transformation est due au fait que les ingénieurs ont inexorablement réduit la taille et la consommation électrique des

transistors et, par conséquent, multiplié leur nombre par puce par deux environ tous les deux ans - la tendance de la "loi de Moore", nommée d'après Gordon Moore, cofondateur d'Intel.

L'effet cumulé de ce type de progrès a effectivement provoqué une révolution. Au cours des 60 dernières années, la loi de Moore a permis de multiplier par plus d'un milliard l'efficacité de l'utilisation de l'énergie par les calculateurs. 71 Mais une transformation similaire de la manière dont l'énergie est produite ou stockée n'est pas seulement improbable ; elle **ne peut pas se produire avec la physique** que nous connaissons actuellement.

Dans le monde réel des personnes, des voitures, des avions et des systèmes industriels à grande échelle, l'augmentation de la vitesse ou de la capacité de charge entraîne plus de matériel, et non pas moins. L'énergie nécessaire pour déplacer une tonne de personnes, chauffer une tonne d'acier ou de silicium, ou faire pousser une tonne de nourriture est déterminée par des propriétés de la nature dont les limites sont fixées par les lois de la gravité, de l'inertie, de la friction, de la masse et de la thermodynamique.

Si les moteurs à combustion, par exemple, pouvaient atteindre le type d'efficacité de mise à l'échelle que les ordinateurs ont depuis 1971 - l'année où le premier circuit intégré microprocesseur largement utilisé a été introduit par Intel - un moteur de voiture générerait mille fois plus de puissance et se réduirait à la taille d'une fourmi. 72 Avec un tel moteur, une voiture pourrait réellement voler, et très vite.

Si l'énergie photovoltaïque était mise à l'échelle de la loi de Moore, un seul panneau solaire de la taille d'un timbre-poste pourrait alimenter l'Empire State Building. Si les batteries étaient mises à l'échelle par la loi de Moore, une batterie de la taille d'un livre, coûtant trois cents, pourrait alimenter le vol d'un A380 vers l'Asie.

Mais ce n'est que dans le monde des bandes dessinées que la physique de la propulsion ou de la production d'énergie fonctionne ainsi. Dans notre univers, la puissance diminue très rapidement avec la taille du moteur.

Un moteur de la taille d'une fourmi - qui a été construit - produit environ 100 000 fois moins d'énergie qu'une Prius. Un panneau solaire photovoltaïque de la taille d'une fourmi (également réalisable) produit mille fois moins d'énergie que les muscles biologiques d'une fourmi. L'équivalent énergétique du carburant d'aviation réellement utilisé par un avion se rendant en Asie nécessiterait 60 millions de dollars de batteries de type Tesla pesant cinq fois plus que cet avion. 73

Le défi consistant à stocker et à traiter des informations en utilisant la plus petite quantité d'énergie possible est bien différent du défi consistant à produire de l'énergie, ou à déplacer ou remodeler des objets physiques. Les deux domaines impliquent des lois physiques différentes.

Le monde de la logique est ancré dans la simple connaissance et le stockage de l'état binaire d'un interrupteur, c'est-à-dire s'il est allumé ou éteint. Les moteurs logiques ne produisent pas d'action physique mais sont conçus pour manipuler l'idée des nombres zéro et un. Contrairement aux moteurs qui transportent des personnes, les moteurs logiques peuvent utiliser des logiciels pour faire des choses comme compresser des informations grâce à des mathématiques astucieuses et ainsi réduire la consommation d'énergie. Aucune option de compression comparable n'existe dans le monde des humains et du matériel.

Bien sûr, les éoliennes, les cellules solaires et les batteries continueront à s'améliorer considérablement en termes de coûts et de performances ; il en sera de même pour les appareils de forage et les turbines à combustion (un sujet abordé ci-après). Et, bien sûr, les technologies de l'information de la Silicon Valley apporteront des gains d'efficacité importants, voire spectaculaires, dans la production et la gestion de l'énergie et des biens matériels (une perspective également abordée ci-dessous). Mais les résultats ne seront pas aussi miraculeux que l'invention du circuit intégré, ou la découverte du pétrole ou de la fission nucléaire.

Quel est le coût asymptotique des renouvelables ?

Les prévisions d'une baisse rapide et continue des coûts de l'éolien, du solaire et des batteries sont inspirées par les gains que ces technologies ont déjà connus. Les deux premières décennies de commercialisation,

après les années 1980, ont vu une réduction des coûts de 10 fois. Mais la trajectoire des améliorations suit désormais ce que les mathématiciens appellent une asymptote ; ou, exprimé en termes économiques, les améliorations sont soumises à une loi de rendements décroissants où chaque gain supplémentaire donne lieu à moins de progrès que par le passé (figure 4).

FIGURE 4. Réductions des coûts de l'énergie éolienne et solaire, 1980-2030



Source : Données tirées de Massachusetts Institute of Technology, Energy Initiative, "The Future of Solar Energy : An Interdisciplinary MIT Study ", 2015 ; Johannes N. Mayer, " Current and Future Cost of Photovoltaics ", Agora Energiewende, février 2015 ; David Feldman et al, " NREL Photovoltaic Pricing Trends : Historical, Recent, and Near-Term Projections ", National Renewable Energy Laboratory (NREL), 25 août 2015 ; Ryan Wisser et al, " Forecasting Wind Energy Costs and Cost Drivers ", Lawrence Berkeley National Laboratory, juin 2016 ; Ran Fu, David Feldman et Robert Margolis, " Comparaison des coûts des systèmes solaires photovoltaïques aux États-Unis : Q1 2018 ", NREL, novembre 2018.

C'est un phénomène normal dans tous les systèmes physiques. Tout au long de l'histoire, les ingénieurs ont réalisé de gros gains dans les premières années de développement d'une technologie, qu'il s'agisse de turbines à vent ou à gaz, de navires à vapeur ou à voile, de la combustion interne ou des cellules photovoltaïques. Avec le temps, les ingénieurs parviennent à se rapprocher des limites de la nature. Le droit de se vanter des gains d'efficacité - ou de vitesse, ou d'autres mesures équivalentes telles la densité d'énergie (puissance par unité de poids ou de volume) passent de pourcentages à deux chiffres à une fraction de pourcent . Qu'il s'agisse d'énergie solaire, d'énergie éolienne ou de turbines d'avion, les gains de performance sont désormais tous mesurés en pourcentages à un seul chiffre. De tels progrès sont économiquement significatifs mais ne sont pas révolutionnaires.

Les limites des systèmes énergétiques, limitées par la physique, sont sans équivoque. Les panneaux solaires ne peuvent pas convertir plus de photons que ceux qui arrivent du soleil. Les éoliennes ne peuvent pas extraire plus d'énergie que celle qui existe dans les flux cinétiques de l'air en mouvement. Les batteries sont liées par la physico-chimie des molécules choisies. De même, quelle que soit l'amélioration des moteurs à réaction, un A380 ne volera jamais jusqu'à la Lune. Un moteur à combustion ne peut pas produire plus d'énergie que ce qui est contenu dans la physico-chimie des hydrocarbures.

Les moteurs à combustion ont ce qu'on appelle une limite de Carnot du rendement, qui est ancrée dans la température de la combustion et l'énergie disponible dans le carburant. Ces limites sont établies depuis longtemps et bien comprises. En théorie, à une température suffisamment élevée, 80 % de l'énergie chimique qui existe dans le carburant peut être transformée en puissance.⁷⁴ En utilisant les matériaux haute température actuels, les meilleurs moteurs à hydrocarbures convertissent environ 50 % à 60 % en puissance. Il y a encore de la place pour l'amélioration, mais rien de comparable aux avancées révolutionnaires de 10

fois à près de 100 fois réalisées dans les deux premières décennies qui ont suivi leur invention. Les technologies éolienne et solaire se trouvent maintenant au même endroit de cette courbe de l'asymptote technologique.

Pour le vent, la limite est appelée limite de Betz, qui dicte la quantité d'énergie cinétique de l'air qu'une pale peut capter ; cette limite est d'environ 60 %.⁷⁵ Capturer toute l'énergie cinétique signifierait, par définition, qu'il n'y a pas de mouvement d'air et donc rien à capter. Il faut qu'il y ait du vent pour que l'éolienne tourne. Les turbines modernes dépassent déjà 45 % de conversion.⁷⁶ Il reste donc des gains réels à réaliser mais, comme pour les moteurs à combustion, rien de révolutionnaire.⁷⁷ Une amélioration d'un facteur 10 n'est pas possible.

Pour les cellules photovoltaïques (PV) en silicium, la limite physique s'appelle la limite Shockley-Queisser : un maximum d'environ 33% des photons entrants sont convertis en électrons. Les cellules photovoltaïques commerciales de pointe atteignent un rendement de conversion d'un peu plus de 26 % - en d'autres termes, elles sont proches de la limite. Alors que les chercheurs ne cessent de découvrir de nouvelles options autres que le silicium qui offrent des améliorations de performance alléchantes, toutes ont des limites physiques similaires, et aucune n'est proche de la fabrication, encore moins à bas prix.⁷⁸ Il n'y aura plus de gains d'un facteur 10. ⁷⁹

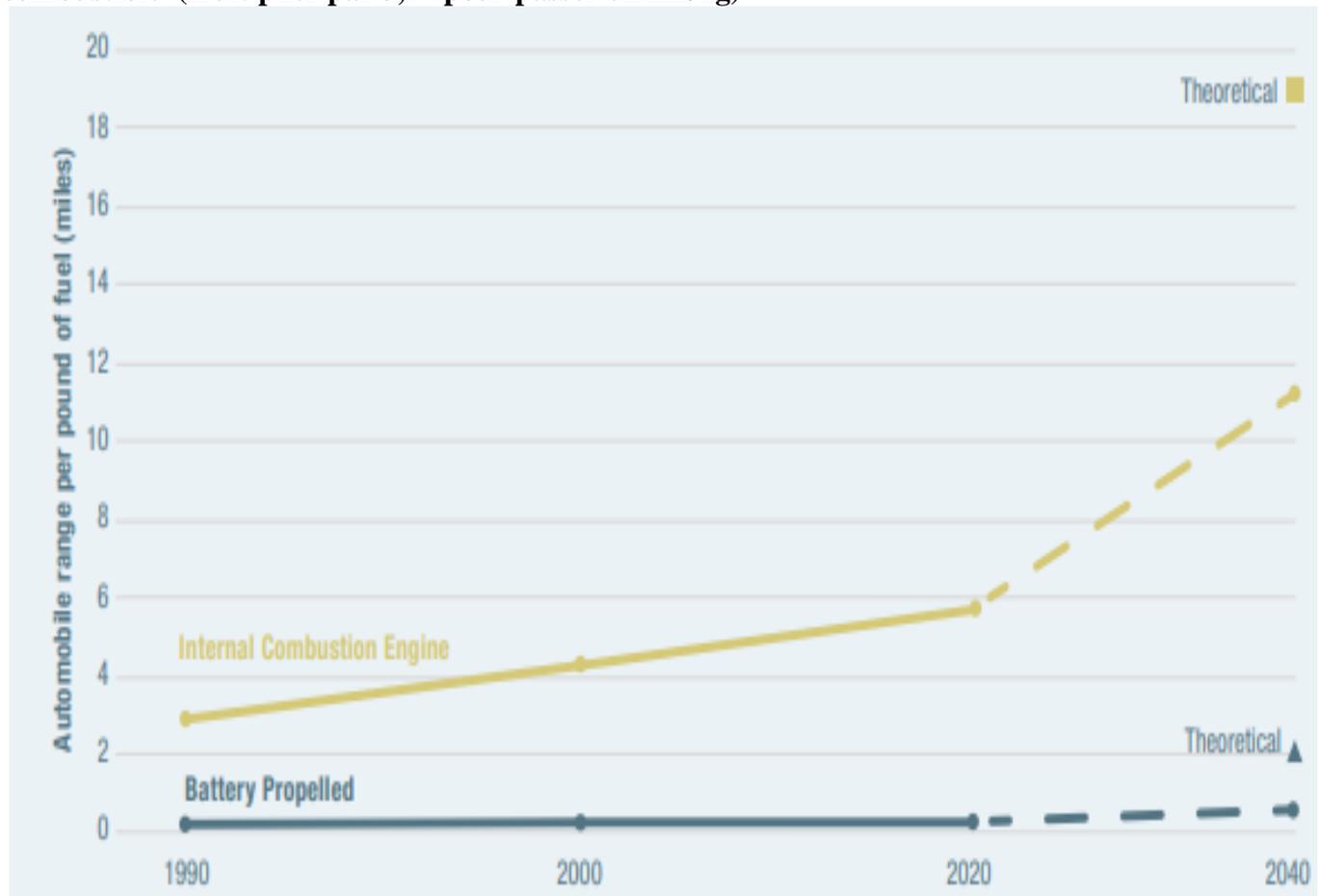
Les progrès futurs en matière d'économie éolienne et solaire sont désormais centrés sur des améliorations techniques incrémentielles : des économies d'échelle pour rendre les turbines énormes, plus hautes que le Washington Monument, et des panneaux solaires tout aussi massifs, à l'échelle d'un kilomètre carré. Pour les deux technologies, tous les composants clés sous-jacents - béton, acier et fibre de verre pour l'éolien et silicium, cuivre et verre pour le solaire - sont tous déjà en production de masse et bien proches des courbes de coûts asymptotiques dans leurs domaines.

Bien qu'il n'y ait pas de gains surprenants en matière d'économies d'échelle disponibles dans la chaîne d'approvisionnement, cela ne signifie pas que les coûts sont à l'abri des améliorations. En fait, tous les processus de fabrication connaissent des améliorations continues de l'efficacité de la production à mesure que les volumes augmentent. Cette courbe d'expérience est appelée la loi de Wright. (Cette "loi" a été documentée pour la première fois en 1936, car elle concernait alors le défi de fabriquer des avions à des coûts que les marchés pouvaient tolérer. De façon analogue, si l'aviation a décollé et a créé une grande industrie mondiale du transport, elle n'a pas éliminé les automobiles, ni le besoin de navires). Il faut s'attendre à ce que l'expérience cumulée conduise à une baisse lente des coûts ; mais, encore une fois, ce n'est pas le genre d'amélioration révolutionnaire qui pourrait rendre un tant soit peu plausible la « *nouvelle économie de l'énergie* ».

Quant aux batteries modernes, il existe encore des options prometteuses pour des améliorations significatives de leur chimie physique sous-jacente. Des matériaux nouveaux autres que le lithium dans les laboratoires de recherche offrent un gain de 200 %, voire de 300 %, en termes de performances inhérentes.⁸⁰ Ces gains ne constituent toutefois pas le genre d'avancées décuplées ou centuplées des premiers jours de la chimie de la combustion.⁸¹ Les améliorations potentielles laisseront toujours les batteries à des kilomètres de leur véritable concurrent : le pétrole.

Il n'existe aucune subvention ni aucune ingénierie à la Silicon Valley ou ailleurs qui puisse combler l'écart de densités d'énergie, centré sur la physique, entre les batteries et le pétrole (figure 5). L'énergie stockée par kilogramme est la métrique critique pour les véhicules et, surtout, les avions. L'énergie potentielle maximale contenue dans les molécules de pétrole est environ 1 500 % plus élevée, gramme par gramme, que celle de la chimie du lithium.⁸² C'est pourquoi les avions et les fusées sont alimentés par des hydrocarbures. Et c'est pourquoi une amélioration de 20 % de la propulsion pétrolière (éminemment réalisable) a plus de valeur qu'une amélioration de 200 % des batteries (encore bien difficile).

FIGURE 5. L'histoire de la bande : densité énergétique des batteries par rapport aux hydrocarbures pour la propulsion : trajet réalisable en miles [1,609 km] par livre [0,4545 kg] de combustible (multiplier par 3,54 pour passer en km/kg)



Source :

Calculs de l'auteur

Michael M. Thackeray, Christopher Wolverton et Eric D. Isaacs, "Electrical Energy Storage for Transportation-Approaching the Limits of, and Going Beyond, Lithium-Ion Batteries", *Energy & Environmental Science* 7, no. 5 (mai 2012) : 7854-63 ;
 Richard Van Noorden, "The Rechargeable Revolution : A Better Battery ", *Nature* 507, no 7490, (mars 2014) : 26-8 ;
 Anton Wahlman, " Le nouveau SUV Toyota à 39 MPG contre la Tesla Model 3 : même coût de carburant par kilomètre ", *Seeking Alpha*, 20 nov. 2018 ;
 Kevin Bullis, "70 mpg, Without a Hybrid", *MIT Technology Review*, 25 oct. 2010 ;
 Justin Hughes, " Toyota Develops World's Thermally Efficient 2.0-Liter Engine ", *The Drive*, 1er mars 2018.

Enfin, en ce qui concerne les limites, il est pertinent de noter que les technologies qui ont débloquent le pétrole et le gaz de schiste en sont encore aux débuts de leur développement, contrairement aux technologies plus anciennes de l'éolien, du solaire et des batteries. Des gains décuplés sont encore possibles en termes de quantité d'énergie pouvant être extraite de la roche de schiste par une plate-forme avant d'approcher les limites physiques. 83

Ce fait contribue à expliquer pourquoi le pétrole et le gaz de schiste ont, au cours de la dernière décennie, ajouté 2 000 % de plus à la production d'énergie américaine que l'éolien et le solaire combinés. 84

La numérisation ne va pas " Ubériser " le secteur de l'énergie

Les outils numériques améliorent déjà et peuvent encore améliorer toutes sortes d'efficacités dans des pans entiers de l'économie, et il est raisonnable de penser que les logiciels apporteront encore des améliorations significatives à la fois dans l'efficacité sous-jacente des machines éoliennes/solaires/batteries et dans l'efficacité de la façon dont ces machines sont intégrées dans les infrastructures. La logique avec des circuits silicium a amélioré, par exemple, le contrôle et donc le rendement énergétique des moteurs à combustion, et elle fait de même pour les éoliennes. De même, le logiciel incarné par Uber a montré que l'optimisation de

l'efficacité de l'utilisation de moyens de transport coûteux permet de réduire les coûts. L'Uberisation de toutes sortes de biens d'équipement est inévitable.

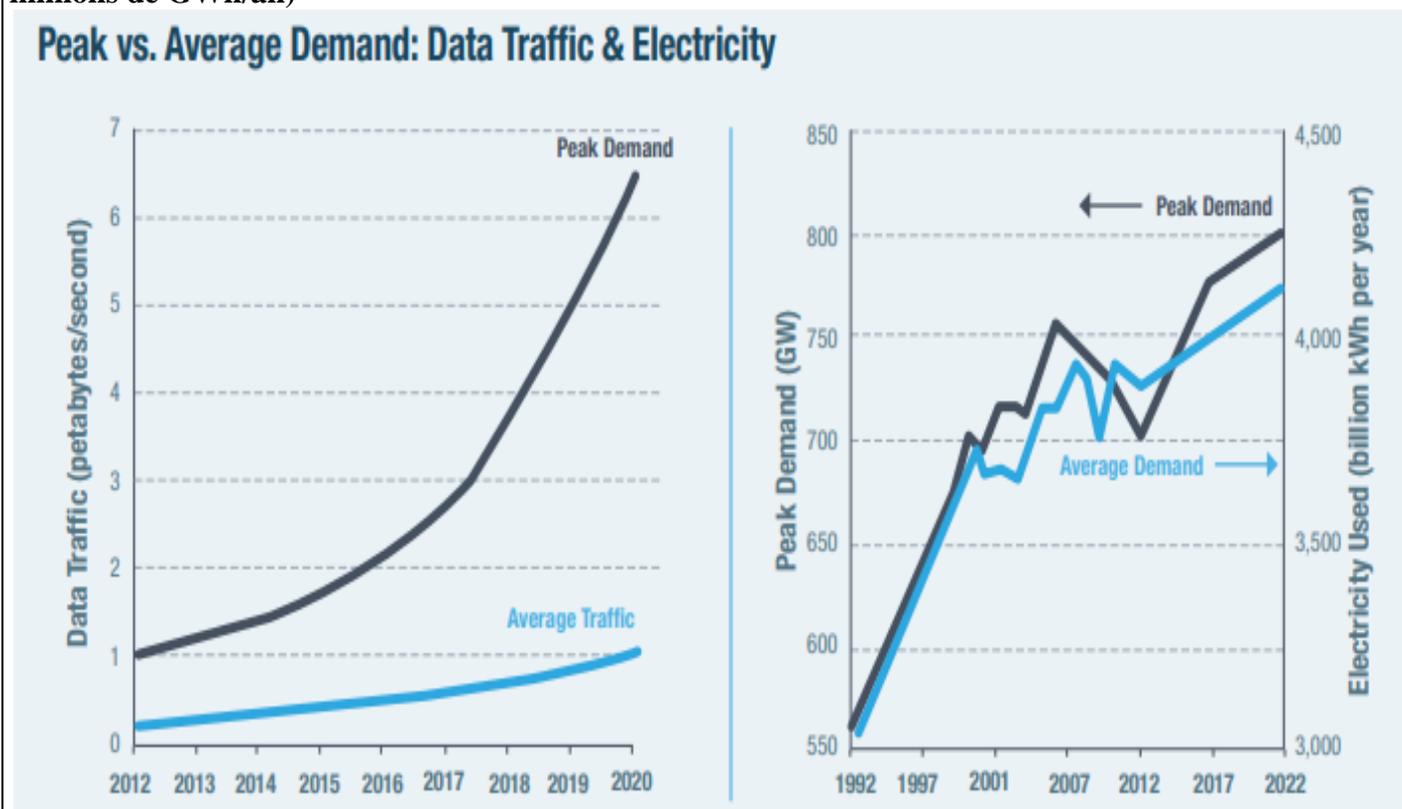
Uberiser le réseau électrique sans charbon ou hydrocarbures est une tout autre affaire.

Le problème de la demande de pointe que des logiciels ne peuvent pas résoudre

Dans le monde de l'énergie, l'un des problèmes les plus vexant et contrariant est de faire correspondre de manière optimale l'offre et la demande d'électricité (figure 6). Ici, les données montrent que la société et les services consommateurs d'électricité que les gens aiment génèrent un écart croissant entre les pics et les creux de la demande. L'effet net pour un réseau sans hydrocarbures ou charbon sera d'augmenter le besoin de batteries pour répondre à ces pics.

Tout ceci pourrait encourager les VE. En termes de gestion des variations périodiques de la demande, le transfert de l'utilisation des carburants de transport du pétrole vers le réseau électrique rendra la gestion des pics beaucoup plus difficile. Les gens ont tendance à faire le plein quand c'est pratique ; c'est facile à faire avec le pétrole, étant donné la facilité de stockage. Le ravitaillement des véhicules électriques exacerbera la nature déjà épisodique de la demande du réseau.

FIGURE 6. Demande de pointe par rapport à la demande moyenne : Trafic de données et électricité (vignette de gauche : échelle de gauche en noir la demande de pointe en GW, à droite utilisation en millions de GWh/an)



Source :

Cisco, "Visual Networking Index : Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper ", 27 février 2019 ;

EIA, " Annual Energy Outlook 2019 ", EIA ; " Electricity Data ; Noncoincident Peak Load ", 2016 ;

EIA, " Peak-to-Average Electricity Demand Ratio Rising in New England and Many Other U.S. Regions ", 18 février 2014 ;

EPRI (Electric Power Research Institute), " The Integrated Grid : Capacité et énergie dans le monde intégré ", 2015.

Une proposition, pour atténuer ce problème, est d'encourager voire même d'imposer que le ravitaillement en carburant des Véhicules Électriques se fasse en dehors des heures de pointe.⁸⁵ On ne sait pas encore à quel point cela sera populaire, ni même si ce sera toléré.

Bien que les kilowattheures et les voitures - les cibles clés des prescriptions de la nouvelle économie de l'énergie - ne représentent que 60 % de l'économie de l'énergie, la demande mondiale pour ces deux

produits est à des siècles de la saturation. Les enthousiastes verts font des déclarations extravagantes sur l'effet des options de type Uber et des voitures à conduite autonome. Cependant, les données montrent que les gains d'efficacité économique par l'Uberisation ont jusqu'à présent augmenté l'utilisation de voitures et les pics de congestion urbaine. 86 De même, de nombreux analystes voient maintenant que les véhicules autonomes vont amplifier, et non atténuer cet effet. 87

C'est parce que les gens, et donc les marchés, se concentrent sur l'efficacité économique et non sur l'efficacité énergétique. L'efficacité économique peut être associée à la réduction de la consommation d'énergie, mais le plus souvent est associée à une augmentation de la demande d'énergie. Les voitures utilisent plus d'énergie par kilomètre qu'un cheval, mais elles offrent d'énormes gains d'efficacité économique. De même, les ordinateurs utilisent beaucoup plus d'énergie que le papier et le crayon.

L'Ubérisation améliore l'efficacité énergétique mais augmente la demande

Chaque conversion d'énergie dans notre univers comporte des inefficacités intrinsèques : conversion de la chaleur en propulsion, conversion des hydrocarbures en mouvement, des photons en électrons, des électrons en données, etc. Toutes entraînent un certain coût énergétique, ou gaspillage, qui peut être réduit mais jamais éliminé. Mais, ironie du sort, l'histoire montre - comme les économistes l'ont souvent noté - que les améliorations de l'efficacité entraînent une augmentation, et non une diminution, de la consommation d'énergie.

Si, à l'aube de l'ère moderne, les machines à vapeur abordables étaient restées aussi inefficaces que les premières, elles n'auraient jamais proliféré, pas plus que les gains économiques qui en ont découlé et l'augmentation de la demande de charbon qui y est associée. Nous constatons la même chose avec les moteurs à combustion modernes. Les avions d'aujourd'hui, par exemple, sont trois fois plus économes en énergie que les premiers jets commerciaux de passagers dans les années 1950. 88 Cela n'a pas réduit la consommation de carburant, mais a fait exploser le trafic aérien et, avec lui, multiplié par quatre la quantité de kérosène brûlée. 89

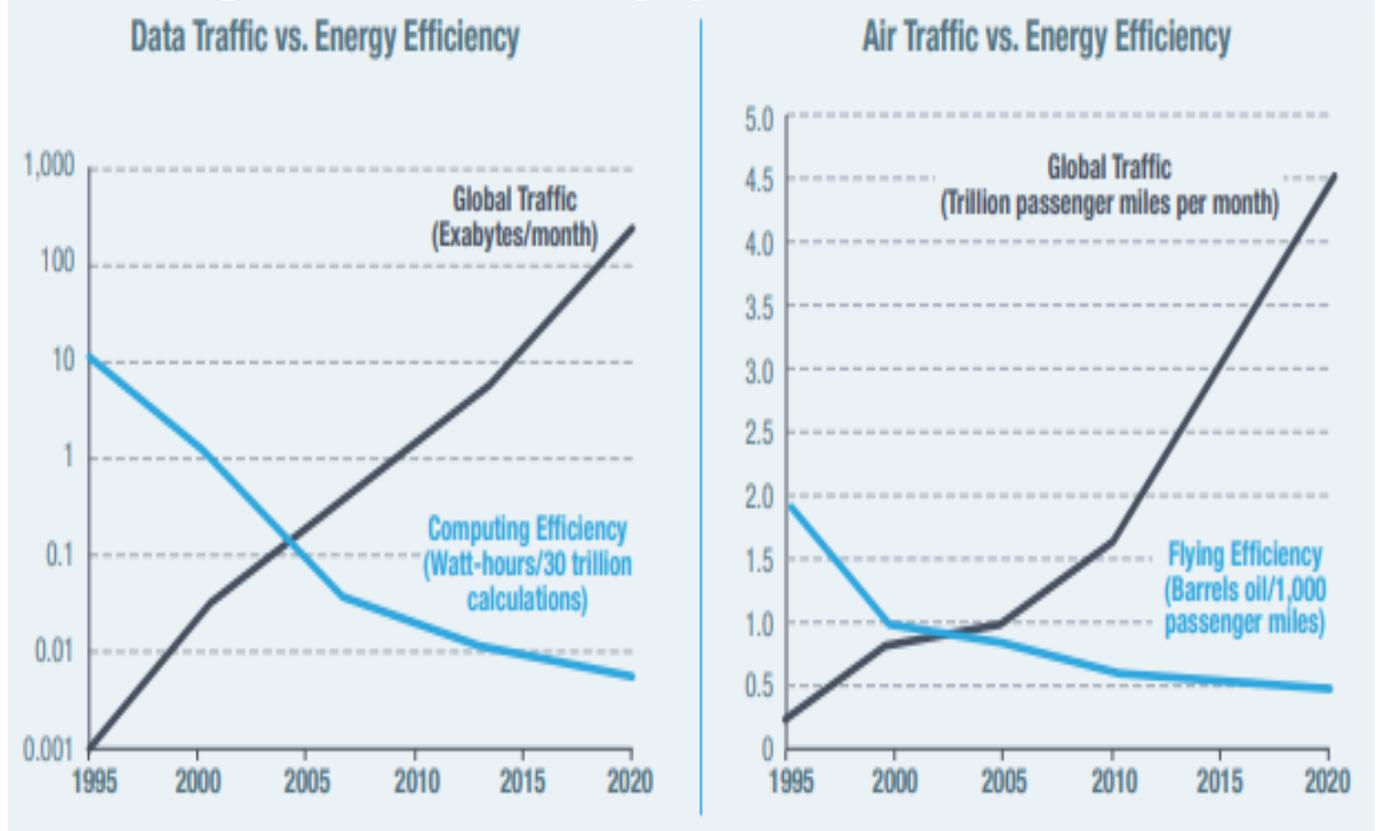
De même, ce sont les gains stupéfiants en matière d'efficacité énergétique de l'informatique qui ont entraîné l'augmentation fulgurante du trafic de données sur Internet - ce qui a entraîné une augmentation considérable de l'énergie utilisée par l'informatique. L'informatique et les communications mondiales, tout compte fait, consomment maintenant l'équivalent énergétique de 3 milliards de barils de pétrole par an, soit plus d'énergie que l'aviation mondiale. 90

L'objectif de l'amélioration de l'efficacité dans le monde réel, par opposition au monde politique, est de réduire le coût de la jouissance des avantages d'un moteur ou d'une machine consommant de l'énergie. Tant que les personnes et les entreprises veulent davantage de ces avantages, la baisse du coût entraîne une augmentation de la demande qui, en moyenne, dépasse les "économies" réalisées grâce aux gains d'efficacité.

La figure 7 montre comment cet effet d'efficacité a joué pour l'informatique et pour le transport aérien 91.

Bien sûr, la croissance de la demande d'un produit ou d'un service spécifique peut se tasser dans une société (riche) lorsque des limites sont atteintes : la quantité de nourriture qu'une personne peut manger, les kilomètres par jour qu'un individu est prêt à parcourir, le nombre de réfrigérateurs ou d'ampoules par foyer, etc. Mais un monde de 8 milliards de personnes est loin d'atteindre de telles limites. L'image macro de la relation entre l'efficacité et la demande énergétique mondiale est claire (figure 8).

La technologie a continuellement amélioré l'efficacité énergétique de la société. Mais loin de mettre fin à la croissance énergétique mondiale, l'efficacité l'a permise. Les améliorations du coût et de l'efficacité apportées par les technologies numériques vont accélérer cette tendance, et non y mettre fin.

FIGURE 7. L'augmentation de l'efficacité énergétique accroît la demande

Sources :

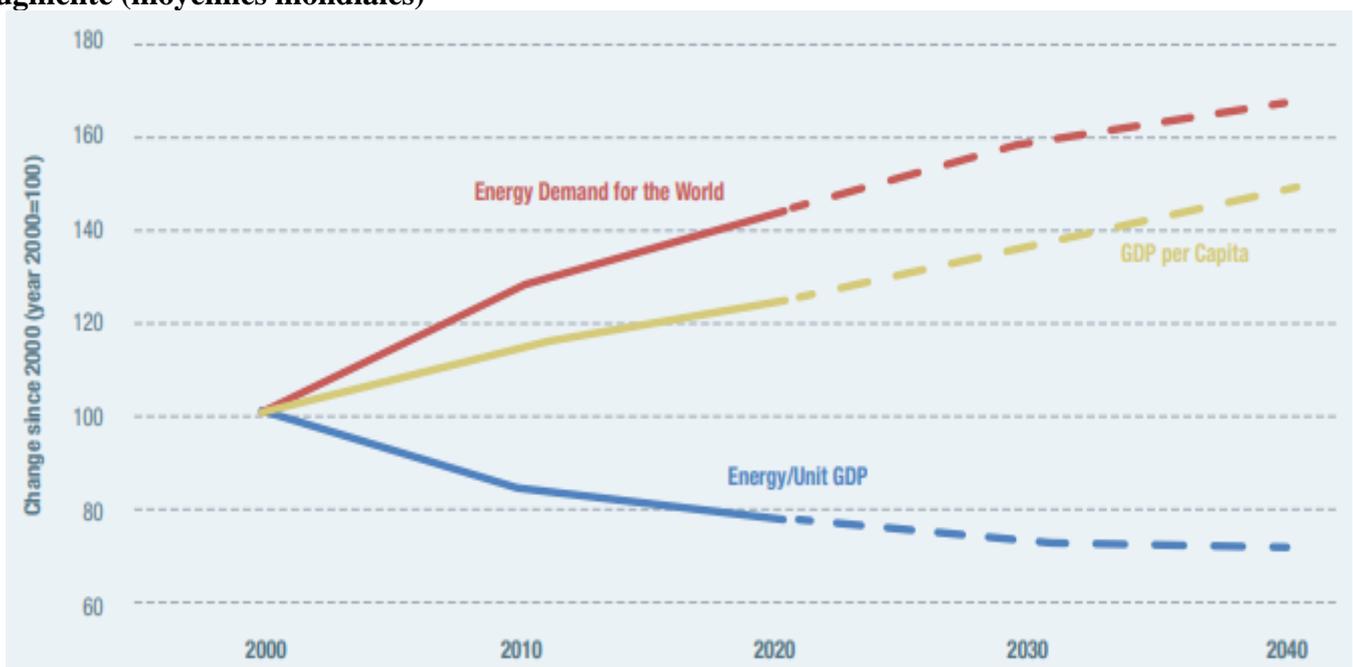
Cisco, "Visual Networking Index : Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper ", 27 février 2019 ;

Jonathan Koomey et al. " Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing ", IEEE Annals of the History of Computing 33, no. 3 (mars 2011) : 46-54 ;

Timothy Prickett Morgan, "Alchemy Can't Save Moore's Law", The Next Platform, 24 juin 2016 ;

Joosung Lee et Jeonhgoon Mo, "Analyse de l'innovation technologique et de l'amélioration de la performance environnementale dans le secteur de l'aviation", International Journal of Environmental Research and Public Health 8, no 9 (juillet-septembre 2011) : 3777-95 ;

IATA (Association internationale du transport aérien), " Analyse du marché des passagers aériens ", décembre 2018.

FIGURE 8. Quand l'efficacité de l'utilisation de l'énergie progresse s'améliore, la demande d'énergie augmente (moyennes mondiales)

Source : ExxonMobil, "2018 Outlook for Energy : A View to 2040" ; PWC Global, "The World in 2050", 2019

Des révolutions énergétiques sont encore bien loin au-delà de l'horizon

Lorsque les 4 milliards de personnes les plus pauvres du monde augmenteront leur consommation d'énergie pour arriver à seulement 15 % du niveau par habitant des économies développées, la consommation mondiale d'énergie augmentera de l'équivalent de l'ajout d'une demande équivalente à celle des États-Unis. 92 Face à de telles projections, il y a des propositions pour que les gouvernements limitent la demande, voire interdisent certains comportements consommateurs d'énergie. Un article universitaire a proposé que *"la vente de versions énergivores d'un appareil ou d'une application soit interdite sur le marché, avec des limitations progressivement plus strictes année après année, afin de stimuler les lignes de produits économes en énergie"*. 93 D'autres ont fait des propositions pour *"réduire la dépendance à l'énergie"* en limitant la taille des infrastructures ou en imposant l'utilisation des transports en commun ou du covoiturage. 94

Le problème ici n'est pas seulement qu' inévitablement les personnes plus pauvres voudront - et pourront - vivre plus comme les plus riches, mais que de nouvelles inventions créent continuellement de nouvelles demandes d'énergie. L'invention de l'avion signifie que chaque milliard de dollars de nouveaux jets produits entraîne sur deux décennies une consommation de quelque 5 milliards de dollars de carburant d'aviation pour les faire voler. De même, chaque milliard de dollars pour la construction de data centers amène la consommation de 7 milliards de dollars d'électricité sur la même période de vingt ans. 95 Le monde achète ces deux types de produits pour environ 100 milliards de dollars par an. 96

La marche inexorable du progrès technologique pour des choses qui utilisent de l'énergie crée l'idée séduisante que quelque chose de radicalement nouveau va inévitablement arriver dans les moyens de produire de l'énergie. Mais parfois, la technologie ancienne ou établie reste la solution optimale et est presque immunisée contre les ruptures technologiques. Nous utilisons encore la pierre, les briques et le béton, qui tous datent de l'Antiquité. Nous le faisons parce qu'ils sont optimaux, pas "anciens". Il en va de même pour la roue, les conduites d'eau, les fils électriques ... la liste est longue. Les hydrocarbures sont, jusqu'à présent, des moyens optimaux d'alimenter la plupart des besoins et des envies de la société.

Il y a plus de dix ans, Google a focalisé ses talents reconnus sur un projet appelé "RE<C", en cherchant à développer une énergie renouvelable moins chère que le charbon. Après l'annulation du projet en 2014, les principaux ingénieurs de Google ont écrit : *"Des améliorations incrémentielles des technologies [énergétiques renouvelables] existantes ne suffisent pas ; nous avons besoin de quelque chose qui apporte vraiment une rupture. ... Nous n'avons pas de réponses."* 97 Ces ingénieurs ont redécouvert les limitations physiques et les réalités du passage à l'échelle rappelées dans cet article.

Une révolution de l'énergie ne viendra que des sciences fondamentales. Ou, comme Bill Gates l'a formulé, ce défi exige des "miracles" scientifiques. 98 Ceux-ci émergeront de recherches fondamentales, et non de subventions accordées aux technologies d'hier. L'Internet n'est pas né de subventions au réseau téléphonique commuté, ni le transistor de subvention aux tubes à vide, ni l'automobile de subventions aux chemins de fer.

Cependant, 95 % des dépenses de R&D du secteur privé et la majorité de celles du gouvernement sont consacrées au "développement" et non à la recherche fondamentale. 99 Si les décideurs politiques veulent une révolution dans les technologies de l'énergie, la seule action importante serait de recentrer radicalement et d'étendre le soutien à la recherche scientifique fondamentale.

Les hydrocarbures - pétrole, gaz naturel et charbon - constituent la principale ressource énergétique mondiale aujourd'hui et continueront de l'être dans un avenir prévisible. Les éoliennes, les panneaux solaires et les batteries, quant à eux, constituent une petite source d'énergie, et la physique veut qu'ils le restent. En attendant, il n'y a tout simplement aucune possibilité que le monde subisse - ou puisse subir - une transition à court terme vers une "nouvelle économie de l'énergie".

Notes de fin de document

- ¹ Bill McKibben, "At Last, Divestment Is Hitting the Fossil Fuel Industry Where It Hurts," *Guardian*, Dec. 16, 2018.
- ² "Mission Possible," Energy Transitions Commission, November 2018.
- ³ BP, "Energy Outlook 2018."
- ⁴ *Ibid.*
- ⁵ IEA, "World Energy Investment 2018: Investing in Our Energy Future"; REN21, "Renewables 2018 Global Status Report."
- ⁶ John W. Day et al., "The Energy Pillars of Society: Perverse Interactions of Human Resource Use, the Economy, and Environmental Degradation," *BioPhysical Economics and Resource Quality* 3, no. 1 (March 2018): 1–16.
- ⁷ *Ibid.*
- ⁸ Jason Hickel, "The Nobel Prize for Climate Catastrophe," *Foreign Policy*, Dec. 6, 2018.
- ⁹ Michael Cembalest, "Pascal's Wager," J. P. Morgan Asset Manager, April 2018.
- ¹⁰ Biofuels and nuclear energy are also, obviously, non-hydrocarbons, but neither is a central feature for "new energy economy" visionaries. The former, in any case, has clear limits, since it is a regression to a farming to fuel society. Nearly 40% of U.S. corn production is used to produce ethanol that supplies less than 5% of America's transportation fuel. And after a half-century of government support, nuclear power supplies 5% of global energy.
- ¹¹ Batteries International, "Battery Pioneers: Stanley Whittingham," 2016.
- ¹² Historical trends from Massachusetts Institute of Technology, Energy Initiative, "The Future of Solar Energy, An Interdisciplinary MIT Study," 2015; Johannes N. Mayer, "Current and Future Cost of Photovoltaics," Agora EnergieWende, February 2015; David Feldman et al., "NREL Photovoltaic Pricing Trends: Historical, Recent, and Near Term Projections," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Aug. 25, 2015; Ryan Wiser et al., "Forecasting Wind Energy Costs and Cost Drivers," Lawrence Berkeley National Laboratory, June 2016.
- ¹³ Capital costs and capacity factors from Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis," 2018: Our calculations here a) overstate wind and solar output since both degrade in operational efficiency over time, and b) optimistically assume equal cost for the technologies needed to convert wind/solar and natural gas into grid-useful power, whereas battery \$/kW is actually >2x the cost of a natural-gas generator.
- ¹⁴ This calculation includes a production decline curve. Capital cost and total recovery/production data are from Gulfport Energy, Credit Suisse Energy Summit, 2019; and Cabot Oil & Gas, Heikkinen Energy Conference, 2018.
- ¹⁵ Additional data for the calculations drawn from Vello Kuuskraa, Advanced Resources International, "Perspectives on Domestic Natural Gas Supplies and Productive Capacity," workshop, Growing the North American Natural Gas Production Platform, EPRINC (Energy Policy Research Foundation), Apr. 19, 2018; gas turbine kWh/Btu from General Electric, "Breaking the Power Plant Efficiency Record"; Energy Information Agency (EIA), "Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants," Nov. 16, 2016; solar and wind capacity factors from EIA, "Electric Power Monthly," May 2018. Calculations do not include the ~\$1,000/kW capital cost of a turbine generator for natural gas or the cost of battery storage for wind/solar of ~\$1,500–\$4,000/kW (EIA, "U.S. Battery Storage Market Trends," May 2018); the latter cost is as critical as the former for utility-scale grid operation.
- ¹⁶ EIA, "Drilling Productivity Report," February 2019.
- ¹⁷ Ironically, it appears that we have more knowledge about the long-term nature of resources for hydrocarbons than for wind. Recent research reveals that, over the past several decades, over much of the Northern Hemisphere, there has been an unexpected roughly 30% decline in surface wind speeds. See Jason Deign, "Chinese Researchers Claim Wind Resources Are Dwindling," *Greentech Media*, Dec. 26, 2018.
- ¹⁸ EIA, "What Is U.S. Electricity Generation by Energy Source?"
- ¹⁹ Mark P. Mills, "The Clean Power Plan Will Collide with the Incredibly Weird Physics of the Electric Grid," *Forbes*, Aug. 7, 2015.
- ²⁰ "Why Too Much Oil in Storage Is Weighing on Prices," *The Economist*, Mar. 16, 2017; Nathalie Hinchey, "Estimating Natural Gas Salt Cavern Storage Costs," Center for Energy Studies, Rice University, 2018.
- ²¹ EIA, "Natural Gas Storage Dashboard"; "Crude Oil and Petroleum Products"; "Coal Stockpiles at U.S. Coal Power Plants Have Fallen Since Last Year," Nov. 9, 2017.
- ²² Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis"; utility-scale lithium battery LCOE (levelized cost of energy) @ \$108–\$140/MWh converts to \$180–\$230/BOE (barrel of oil energy equivalent).
- ²³ EIA, "U.S. Battery Storage Market Trends," May 2018; U.S. Department of Energy, "One Million Plug-in Vehicles Have Been Sold in the United States," Nov. 26, 2018.
- ²⁴ Landon Stevens, "The Footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production," *Strata*, June 2017.
- ²⁵ Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis."
- ²⁶ Stephen Brick and Samuel Thornstrom, "Renewables and Decarbonization: Studies of California, Wisconsin, and Germany," *Electricity Journal* 29, no. 3 (April 2016): 6–12.
- ²⁷ EIA, "Wind Generation Seasonal Patterns Vary Across the United States," Feb. 25, 2015; EnergySkeptic, "Wind and Solar Diurnal and Seasonal Variations Require Energy Storage," June 4, 2015.
- ²⁸ EIA, "Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2019": gas @ \$41/MWh, wind \$56, solar \$60.
- ²⁹ *Ibid.*, p. 2.
- ³⁰ EIA, "Annual Energy Outlook 2019," January 2019; Mark P. Mills, "The Real Fuel of the Future: Natural Gas," *Manhattan Institute*, Sept. 24, 2018.
- ³¹ Hickel, "The Nobel Prize for Climate Catastrophe."
- ³² Thomas Tanton, "Levelized Cost of Energy: Expanding the Menu to Include Direct Use of Natural Gas," T2 and Associates, August 2017.
- ³³ Landon Stevens, "The Footprint of Energy: Land Use of U.S. Electricity Production," *Strata*, June 2017.
- ³⁴ Lee M. Miller and David W. Keith, "Observation-Based Solar and Wind Power Capacity Factors and Power Densities," *Environmental Research Letters* 13, no. 10 (Oct. 4, 2018): 1–11.
- ³⁵ Gordon Hughes, "The Performance of Wind Farms in the United Kingdom and Denmark," Renewable Energy Future Foundation, 2012.

- ³⁶ Brent Wanner, "Commentary: Is Exponential Growth of Solar PV the Obvious Conclusion?" IEA, Feb. 6, 2019.
- ³⁷ Frédéric Simon, "Germany Pours Cold Water on EU's Clean Energy Ambitions," EURACTIV, June 12, 2018; StromReport, "Electricity Price in Germany," 2018.
- ³⁸ Joanne Nova, "Electricity Prices Fell for Forty Years in Australia, Then Renewables Came," JoNova (blog), February 2018.
- ³⁹ EIA, "Electric Power Monthly," February 2019.
- ⁴⁰ EIA: data show that the combined contribution from coal and natural gas slightly declined, from 70% in 2008 to 63% today: shifting 7% of U.S. supply from low-cost to high-cost generation also increases average rates.
- ⁴¹ IEA, "Projected Costs of Generating Electricity," Feb. 27, 2019.
- ⁴² OECD, "Nuclear Energy and Renewables: Systems Effects in Low-Carbon Electricity Systems," 2012; Barry Brook, "Renewable Energy's Hidden Costs?" Energy Central, Mar. 23, 2013.
- ⁴³ George Taylor and Thomas Tanton, "The Hidden Costs of Wind Electricity," American Tradition Institute, December 2012.
- ⁴⁴ AEMO, "South Australian Renewable Energy Report," November 2017; Daniel Wills and Sheradyn Holderhead, "AEMO Report on Heatwave Rolling Blackouts Reveals Low Wind Power, Inability to Turn on Gas-Fired Pelican Point Led to Power Cuts," *Advertiser* (Adelaide, Australia), Feb. 15, 2017; Charis Chang, "Why South Australia's Blackouts Are a Problem for Us All," *News.com.au*, Feb. 10, 2017.
- ⁴⁵ James Thornhill, "Musk's Outback Success Points to Bright Future for Battery Storage," Bloomberg, Dec. 4, 2018.
- ⁴⁶ EIA, "Natural Gas-Fired Reciprocating Engines Are Being Deployed More to Balance Renewables," Feb. 19, 2019; Kurt Koenig and Grant Ericson, "Reciprocating Engine or Combustion Turbine?" Burns McDonnell (undated).
- ⁴⁷ Tantalizing scientific discoveries are possible, but still largely dreams; see, e.g., R. Colin Johnson, "Superconducting Graphene Beckons," *EE Times*, Sept. 16, 2015.
- ⁴⁸ Even this likely understates battery costs. The 200:1 ratio emerges from "Lazard's Levelized Cost of Storage: 2018." Lazard's assumption of 84%–90% battery efficiency (electricity in vs. output) may be optimistic, since data from operating grid storage systems reveals efficiencies of 41%–69%. See Northern Power Grid (UK), "Lessons Learned Report Electrical Energy Storage," Dec. 8, 2014.
- ⁴⁹ Manufacturing cost from Inside EVs, "Tesla Is Approaching the Anticipated Magic Battery Cost Number," June 28, 2018.
- ⁵⁰ EIA, "U.S. Battery Storage Market Trends," 2018; Jason Deign, "European Utilities Muscle into Energy Storage," Green Tech Media, Nov. 26, 2018.
- ⁵¹ Matthew R. Shaner et al., "Geophysical Constraints on the Reliability of Solar and Wind Power in the United States," *Energy & Environmental Science* 11, no. 4 (February 2018): 914–25.
- ⁵² Trefis Team, "Gigafactory Will Cost Tesla \$5 Billion but Offers Significant Cost Reductions," *Forbes*, Mar. 11, 2014.
- ⁵³ Bonneville Power Administration and Northwest Gas Association, "Comparing Pipes & Wires" (undated).
- ⁵⁴ Ore grades: lithium (Nicholas LePan, "Not All Lithium Mining Is Equal: Hard Rock (Pegmatites) vs. Lithium Brine," TSX Media, July 17, 2018); nickel (Greg Ashcroft, "Nickel Laterites: The World's Largest Source of Nickel," *Geology for Investors*, undated); copper (Vladimir Basov, "The World's Top 10 Highest-Grade Copper Mines," *Mining.com*, Feb. 19, 2017); graphite (Fred Lambert, "Breakdown of Raw Materials in Tesla's Batteries and Possible Bottlenecks," *electrek*, Nov. 1, 2016).
- ⁵⁵ Elena Timofeeva, "Raw Materials Supply for Growing Battery Production," Inluite Energy, June 11, 2018.
- ⁵⁶ Pieter van Exter et al., "Metal Demand for Renewable Electricity Generation in the Netherlands," Dutch Ministry of Infrastructure and Water Management, 2018.
- ⁵⁷ Vaclav Smil, "To Get Wind Power You Need Oil," *IEEE Spectrum*, Feb. 29, 2016; Robert Wilson, "Can You Make a Wind Turbine Without Fossil Fuels?" Energy Central, Feb. 25, 2014.
- ⁵⁸ Marcelo Azevedo et al., "Lithium and Cobalt: A Tale of Two Commodities," McKinsey & Co., June 2018.
- ⁵⁹ Henry Sanderson et al., "Electric Cars: China's Battle for the Battery Market," *Financial Times*, Mar. 5, 2017; Jamie Smyth, "BHP Positions Itself at Centre of Electric-Car Battery Market," *Financial Times*, Aug. 9, 2017.
- ⁶⁰ Jens F. Peters et al., "The Environmental Impact of Li-Ion Batteries and the Role of Key Parameters: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (January 2017): 491–506; Qinyu Qiao et al., "Cradle-to-Gate Greenhouse Gas Emissions of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in China," *Journal of Applied Energy* 204 (October 2017): 1399–1411.
- ⁶¹ Terence Bell, "World's Biggest Cobalt Producers," *the balance.com*, Oct. 23, 2018.
- ⁶² Henry Sanderson, "Electric Cars: China's Battle for the Battery Market," *Financial Times*, Mar. 5, 2017; Jeff Desjardins, "China Leading the Charge for Lithium-Ion Megafactories," *Visual Capitalist*, Feb. 17, 2017.
- ⁶³ EIA, "Chinese Coal-Fired Electricity Generation Expected to Flatten as Mix Shifts to Renewables," Sept. 27, 2017.
- ⁶⁴ Qiao, "Cradle-to-Gate Greenhouse Gas Emissions."
- ⁶⁵ NREL, "Electric Vehicle Grid Integration."
- ⁶⁶ Zachary Shahan, "Tesla Model S Crushes Large Luxury Car Competition," *Clean Technica*, July 5, 2017; Anton Wahlman, "Tesla: From 100% EV Market Share to 0% in 100 Easy Steps," *Seeking Alpha*, Sept. 29, 2017.
- ⁶⁷ IEA, "Global EV Outlook 2017"; BP, "Energy Outlook 2019."
- ⁶⁸ EIA, "Global Transportation Energy Consumptions," 2017.
- ⁶⁹ Tony Seba, "Clean Disruption" (video), Stanford University, 2017.
- ⁷⁰ Diane Cardwell, "Testing the Clean-Energy Logic of a Tesla-Solar City Merger," *New York Times*, June 23, 2016.
- ⁷¹ Max Roser and Hannah Ritchie, "Moore's Law—Exponential Increase of the Number of Transistors on Integrated Circuits," *Our World in Data*, 2019; Timothy Morgan, "Alchemy Can't Save Moore's Law," *The Next Platform*, June 24, 2016.
- ⁷² S. Brown et al., "Investigation of Scaling Laws for Combustion Engine Performance," Oregon State University, 2016.

- ⁷³ Author's calculations. For useful perspectives, see Toyohashi University of Technology, "Unveiling of the World's Smallest and Most Powerful Micro Motors," *Physics.Org*, May 1, 2015; Ella Davies, "The World's Strongest Animal Can Lift Staggering Weights," *BBC Earth*, Nov. 21, 2016; Leeham News and Analysis, "Updating the A380: The Prospect of a Neo Version and What's Involved," March 2014.
- ⁷⁴ Christopher Goldenstein, "Advanced Combustion Engines," Stanford University, Dec. 9, 2011.
- ⁷⁵ Marisa Blackwood, "Maximum Efficiency of a Wind Turbine," *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two* 6, no. 2 (Spring 2016): 1–10.
- ⁷⁶ Lee Teschler, "Wind Turbines for Low Wind Speeds Defy Betz Limit Efficiency," *Machine Design*, May 29, 2014. Note: while the concept is clever, the claim is still not a 10x gain, and commercial realization points to a real-world efficiency closer to 40%.
- ⁷⁷ Robin Whitlock, "6 High-Efficiency Wind Turbine Models," *Interesting Engineering*, Oct. 29, 2015.
- ⁷⁸ "Crystalline Material Could Replace Silicon to Double Efficiency of Solar Cells," Purdue University, Apr. 6, 2017.
- ⁷⁹ NREL, "Best Research-Cell Efficiencies," Dec. 21, 2018.
- ⁸⁰ Azevedo et al., "Lithium and Cobalt."
- ⁸¹ Vaclav Smil, *Prime Movers of Globalization: The History and Impact of Diesel Engines and Gas Turbines* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 2009).
- ⁸² Michael M. Thackeray, Christopher Wolverton, and Eric D. Isaacs, "Electrical Energy Storage for Transportation—Approaching the Limits of, and Going Beyond, Lithium-Ion Batteries," *Energy & Environmental Science*, no. 7 (May 2012): 7854–63.
- ⁸³ James L. Smith, "Estimating the Future Supply of Shale Oil: A Bakken Case Study," MIT Center for Energy and Environment Policy Research, Jan. 19, 2017; Emily Ayshford, "'Realistic' New Model Points the Way to More Efficient and Profitable Fracking," *Phys.org*, Jan. 7, 2019.
- ⁸⁴ EIA, "Monthly Energy Review," Table 1.2: Primary Energy Production by Source, February 2019.
- ⁸⁵ Dan Murtaugh and Mark Chediak, "Why Charging Your Electric Car at Night Could Save the World," *Bloomberg*, Feb. 25, 2018.
- ⁸⁶ John Markoff, "Urban Planning Guru Says Driverless Cars Won't Fix Congestion," *New York Times*, Oct. 27, 2018.
- ⁸⁷ EIA, "Adoption of Autonomous Vehicles Could Increase U.S. Transportation Energy Consumption," June 18, 2018; Kenneth A. Perrine et al., "Anticipating Long-Distance Travel Shifts Due to Self-Driving Vehicles," University of Texas at Austin, 2018.
- ⁸⁸ Alice Larkin et al., "Air Transport, Climate Change and Tourism," *Tourism and Hospitality Planning & Development* 6, no. 1 (April 2009): 7–20.
- ⁸⁹ International Council on Clean Transportation, "Fuel Efficiency Trends for New Commercial Jet Aircraft: 1960 to 2014," August 2015.
- ⁹⁰ Mark P. Mills, "Energy and the Information Infrastructure Part 1: Bitcoins & Behemoth Datacenters," *Real Clear Energy*, Sept. 19, 2018.
- ⁹¹ Mark P. Mills, "Energy and the Information Infrastructure Part 3: The Digital 'Engines of Innovation' & Jevons' Delicious Paradox," *Real Clear Energy*, Dec. 11, 2018.
- ⁹² The World Bank, DataBank.
- ⁹³ Sofie Lambert and Mario Pickavet, "Can the Internet Be Greener?" *Proceedings of the IEEE* 105, no. 2 (February 2017): 179–82.
- ⁹⁴ Kris De Decker, "Keeping Some of the Lights On: Redefining Energy Security," *Low-Tech Magazine*, December 2018.
- ⁹⁵ "Data Centers," U.S. Chamber of Commerce, Technology Engagement Center, 2017.
- ⁹⁶ Rich Miller, "As Cloud Investment Surges, What's the New Normal for Data Centers?" *Data Center Frontier*, May 29, 2018; Mark Haranas, "The Booming Data Center Market: A Look at Hyperscale Spending as It Explodes to an All-Time High," *CRN*, June 6, 2018; Tom Cooper et al., "Global Fleet & MRO Market Forecast Commentary 2019–2029," Oliver Wyman, 2019; Statista, "Average Prices for Boeing Aircraft as of January 2019."
- ⁹⁷ Ross Koningstein and David Fork, "What It Would Really Take to Reverse Climate Change," *IEEE Spectrum*, Nov. 18, 2014.
- ⁹⁸ James Bennet, "We Need an Energy Miracle," *The Atlantic*, November 2015.
- ⁹⁹ Mark P. Mills, "Basic Research and the Innovation Frontier," Manhattan Institute, February 2015.

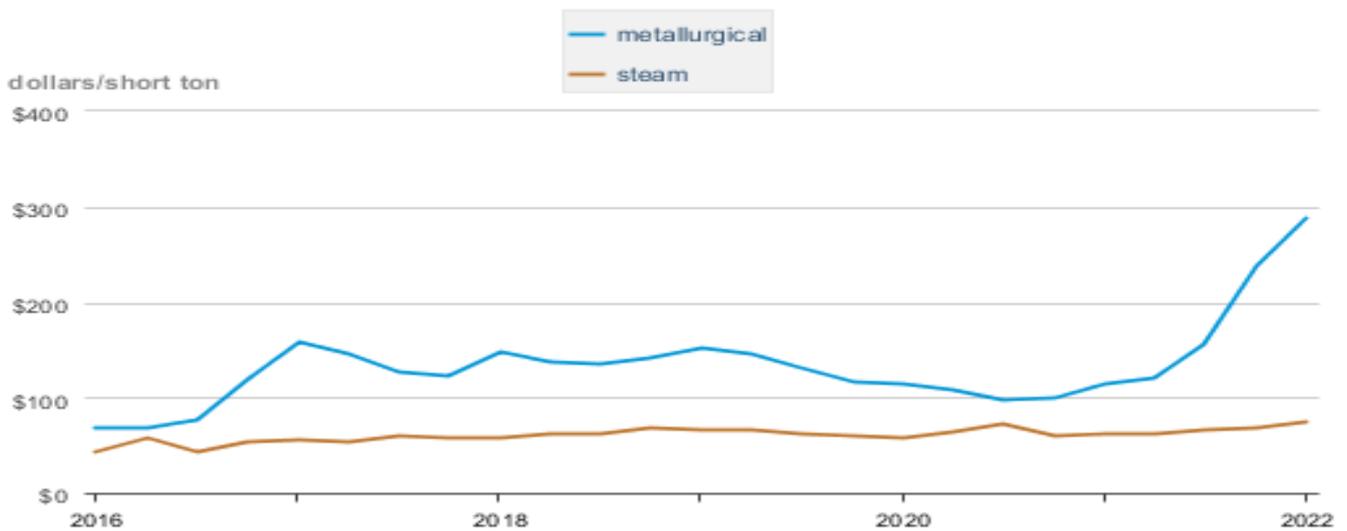
Remerciements

Connor Harris, Preston Turner, Eric Li et Chris DeSante ont fourni une aide à la recherche pour ce rapport.

[Note du Traducteur

NdT : voici les prix à l'export du charbon américain en \$ par « short ton » de 0,9071847 tonne métrique

Average quarterly price of U.S. steam and metallurgical coal exports, 2016-2022



Source: U.S. Energy Information Administration: Quarterly Coal Report

<https://www.eia.gov/coal/production/quarterly/>

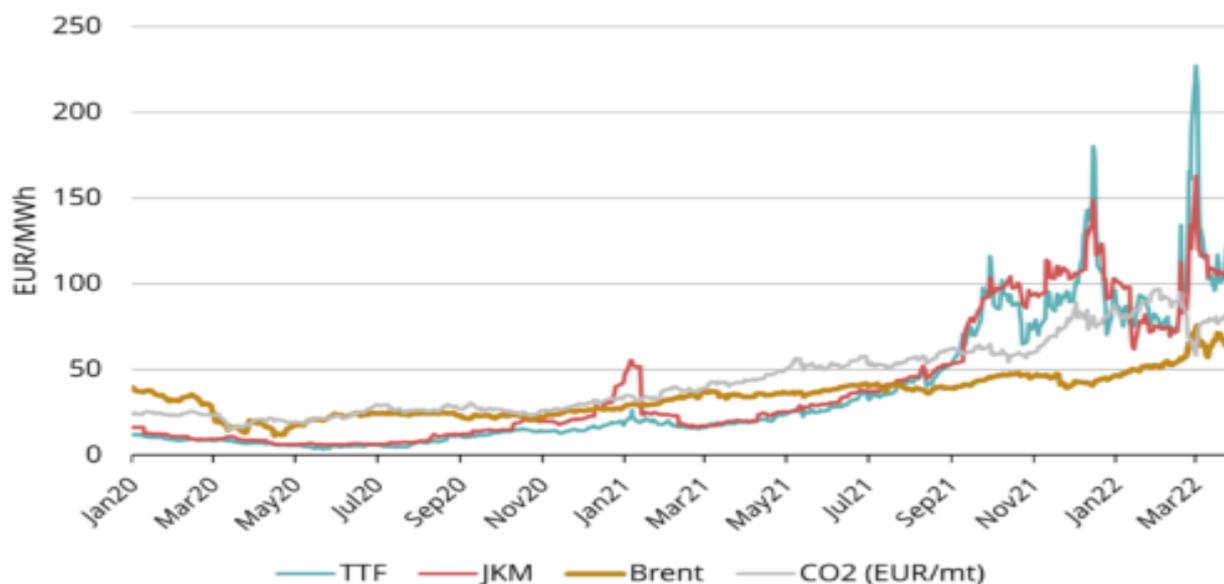
Du charbon bitumineux entre 8300 et 13500 Btu/ (pound de 0,45492 kg) soit 19,26 à 31,32 GJ/tonne métrique, avec un rendement de 45% amène une production de 2,4 à 3,9 MWh électrique /tonne, soit à 100\$/short ton ou $100 / 0,9071748 = 110$ \$/ (tonne métrique) un coût de combustible entre $110 / 3,9 = 28,2$ \$/MWh et $110 / 2,4 = 45,7$ \$/MWh.

Mais le charbon du Montana (Powder River Basin) à 8800 Btu/pound est encore (juin 2022) à moins de 50\$/(short ton)]

[Le prix des combustibles <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-energy-prices-oct-2020-jan-2022> augmente si il y a insuffisance de l'offre. Ci-dessous des prix de référence du gaz naturel selon <https://elenger.lv/en/gas-market-overview-q1-2022/>

La Title Transfer Facility ou TTF, est un point d'échange virtuel pour le gaz naturel aux Pays-Bas. Ce point d'échange permet à un certain nombre de négociants aux Pays-Bas d'échanger des contrats à terme, des contrats physiques et des contrats de change.

JKM est le Japan Korea Marker



]

Résumé de « Mines, minéraux et l'énergie « verte » : un rappel à la réalité »

<https://media4.manhattan-institute.org/sites/default/files/mines-minerals-green-energy-reality-checkMM.pdf>

Les décideurs politiques ayant délaissé les défis de la pandémie pour se concentrer sur la reprise économique, les plans d'infrastructure font à nouveau l'objet de discussions actives, y compris ceux relatifs à l'énergie. Les défenseurs de l'énergie verte redoublent leurs pressions pour poursuivre, voire accroître, l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire et des voitures électriques. Toute considération sérieuse des vastes implications de l'énergie renouvelable sur l'environnement et la chaîne d'approvisionnement est absente de ces discussions.

Comme je l'ai exploré dans un article précédent, "*The New Energy Economy : An Exercise in Magical Thinking*", de nombreux enthousiastes croient à des choses qui ne sont pas possibles lorsqu'il s'agit de la physique de l'alimentation de la société, notamment la croyance magique que l'énergie "propre" peut faire écho à la vitesse de progression des technologies numériques. Ce n'est pas le cas.

Cet article examine une autre réalité : toutes les machines productrices d'énergie doivent être fabriquées à partir de matériaux extraits de la terre. En bref, aucun système énergétique n'est réellement "renouvelable", puisque toutes les machines nécessitent l'extraction et le traitement continu de millions de tonnes de matériaux primaires et l'élimination de ce matériel qui s'use inévitablement.

Par rapport aux hydrocarbures, les machines vertes impliquent, en moyenne, une multiplication par 10 des quantités de matériaux extraits et traités pour produire la même quantité d'énergie.

Cela signifie que toute expansion significative du modeste niveau actuel d'énergie verte - qui représente actuellement moins de 4 % de la consommation totale des USA (contre 56 % pour le pétrole et le gaz) - entraînera une augmentation sans précédent de l'extraction mondiale des minéraux nécessaires, exacerbera radicalement les problèmes environnementaux et de main-d'œuvre existants sur les marchés émergents (où se trouvent de nombreuses mines), et augmentera considérablement les importations américaines et la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement énergétique de l'Amérique.

En 1990 encore, les États-Unis étaient le premier producteur mondial de minéraux. Aujourd'hui, ils occupent la septième place. Bien que la nation dispose de vastes réserves minérales valant des billions de dollars, l'Amérique dépend désormais à 100 % des importations pour quelque 17 minéraux clés et, pour 29 autres, plus de la moitié des besoins nationaux sont importés.

Parmi les réalités matérielles de l'énergie verte :

- La construction d'éoliennes et de panneaux solaires pour produire de l'électricité, ainsi que de batteries pour alimenter les véhicules électriques, nécessite, en moyenne, une quantité de matériaux plus de 10 fois supérieure à celle nécessaire à la construction de machines utilisant des hydrocarbures pour fournir la même quantité d'énergie à la société.

- Une seule voiture électrique contient plus de cobalt que 1 000 batteries de smartphones ; les pales d'une seule éolienne contiennent plus de plastique que 5 millions de smartphones ; et un panneau solaire qui peut alimenter un centre de données utilise plus de verre que 50 millions de téléphones.

- Le remplacement des hydrocarbures par des machines vertes dans le cadre des plans actuels - sans parler des aspirations à une expansion bien plus grande - augmentera considérablement l'extraction de divers minéraux critiques dans le monde. Par exemple, une seule batterie de voiture électrique pesant 500 kilogrammes nécessite l'extraction et le traitement de quelque 250 000 kilos de matériaux. En moyenne sur la durée de vie d'une batterie, chaque kilomètre parcouru au volant d'une voiture électrique "consomme" 2,5 kg de terre. L'utilisation d'un moteur à combustion interne consomme moins de 0,1 kilo de liquide par kilomètre.

- Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont nécessaires pour produire le béton, l'acier, les plastiques et les minéraux purifiés utilisés pour construire les machines vertes. L'équivalent énergétique de 100 barils de pétrole est utilisé dans les processus de fabrication d'une seule batterie qui peut stocker l'équivalent d'un baril de pétrole.

- D'ici 2050, selon les plans actuels, la quantité de panneaux solaires usés - dont la plupart ne sont pas recyclables - représentera le double du tonnage de tous les déchets plastiques mondiaux actuels, ainsi que plus de 3 millions de tonnes par an de plastiques non recyclables provenant de pales d'éoliennes usées. D'ici 2030, plus de 10 millions de tonnes par an de batteries deviendront des déchets.