

**Mark P. Mills**

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

**Mars 2019**

### **L'auteur**

Mark P. Mills est membre senior du *Manhattan Institute* et membre de la faculté de la *McCormick School of Engineering and Applied Science* de la *Northwestern University*, où il codirige l'*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 énergétiques). Auparavant, Mills a cofondé *Digital Power Capital*, un fonds de capital-risque spécialisé, et a été président et directeur technique d'*ICx Technologies*, qu'il a aidé à entrer en bourse en 2007. Mills est un collaborateur 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 en matière d'énergie » par l'*American Energy Society*.

Auparavant, Mills était conseiller en technologie pour la *Bank of America Securities* et coauteur du *Huber-Mills Digital Power Report*, un bulletin d'information sur les investissements technologiques. Il a témoigné devant le Congrès et a informé de nombreuses commissions de service public et législateurs au niveau des États. 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, les fibres optiques, le guidage des 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.

### **Résumé**

Depuis des décennies, un mouvement se développe pour remplacer les hydrocarbures, qui fournissent collectivement 84% de l'énergie mondiale. Cela a commencé par la crainte que le pétrole ne soit en train de s'épuiser. Depuis, cette crainte a évolué vers la croyance qu'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 chacun révélés abondants.

Jusqu'à présent, l'éolien, le solaire et les batteries – les alternatives préférées aux hydrocarbures – fournissent environ 2% de l'énergie mondiale et 3% de celle des États-Unis. Néanmoins, une nouvelle affirmation hardie a gagné en popularité : nous sommes à l'aube d'une révolution énergétique d'origine technologique qui non seulement est en mesure de 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 des batteries connaissent le même type de bouleversement que l'informatique et les communications, avec une baisse spectaculaire des coûts et une augmentation de l'efficacité. Mais cette analogie de base ne tient pas compte des différences profondes, fondées sur 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 cultiver une tonne de nourriture est déterminée par les 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 montrer pourquoi il n'y a aucune possibilité que le monde connaisse – ou puisse connaître – une transition à court terme vers une « nouvelle économie énergétique ».

### **Des raisons parmi d'autres :**

Les scientifiques n'ont pas encore découvert, et les entrepreneurs 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 transportabilité. En termes concrets, cela signifie qu'en dépensant un million de dollars pour des éoliennes ou des panneaux solaires à l'échelle d'un service public industriel et commercial, chacun d'entre eux produira, sur une période de 30 ans, environ 50 millions de kilowattheures (kWh), alors que le même million de dollars dépensé pour une plateforme de forage de roche-mère produit suffisamment de gaz naturel sur 30 ans pour générer plus de 300 millions de kWh.

Les technologies solaires se sont beaucoup améliorées et continueront à devenir moins chères et plus efficaces. Mais l'ère des gains décuplés 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 encore, il n'y a plus de possibilité de décupler les gains. La limite physique d'une éolienne, la limite de Betz, est une capture d'au maximum 60% de l'énergie cinétique de l'air en mouvement. Les turbines sur le marché dépassent aujourd'hui 40%.

La production annuelle de la *Gigafactory* de Tesla, la plus grande usine de batteries au monde, pourrait stocker trois minutes de la demande annuelle d'électricité des États-Unis. Il faudrait 1000 ans de fabrication de batteries pour répondre à deux jours de la demande d'électricité des États-Unis. Pendant ce temps, chaque kilo de batterie produite nécessite l'extraction, le transport et le traitement de 25 à 50 kilos de matériaux.

## Introduction

Des voix de plus en plus nombreuses exhortent le public et les responsables politiques à reconnaître la nécessité, – en fait l'inévitabilité – de la transition de la société vers une « nouvelle économie de l'énergie » (voir encadré « **Le pic des hydrocarbures est tout proche** »). Les défenseurs de cette idée affirment que les changements technologiques rapides réalisent de telles percées et que l'énergie renouvelable devient si rapidement bon marché qu'il n'y a aucun risque économique à accélérer – voire à rendre obligatoire – le passage à un monde post-hydrocarbures qui n'ait plus besoin de beaucoup de pétrole, de gaz naturel ou de charbon, voire qui n'en ait plus besoin du tout.

Cette vision du monde repose sur l'idée que le secteur de l'énergie connaît le même genre de percées technologiques que celles que la *Silicon Valley* a apportées à tant d'autres marchés. De ce fait, les entreprises énergétiques de la « vieille économie » sont un mauvais choix pour les investisseurs, selon les tenants de la nouvelle économie de l'énergie, parce que les actifs des sociétés d'hydrocarbures seront bientôt sans valeur, ou « privés de vent ». <sup>1</sup> 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 d'opinions en expansion des deux côtés de l'Atlantique. <sup>2</sup> 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 dites propres, améliorer l'efficacité énergétique et limiter la demande d'énergie.

Cette prescription devrait vous sembler familière, car elle est identique au consensus quasi universel sur la politique énergétique qui s'est dégagé à la suite de l'embargo pétrolier arabe de 1973 – 1974, lequel a été un choc pour le monde entier. Mais alors que les politiques énergétiques du demi-siècle dernier étaient animées par la crainte de l'épuisement des ressources, on craint aujourd'hui que la combustion des abondants hydrocarbures de la planète ne libère de dangereuses quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Certes, l'histoire montre que des transitions énergétiques formidables sont possibles. La question clé aujourd'hui est de savoir si le monde est sur le point d'en connaître une nouvelle.

La réponse courte est non. La thèse selon laquelle le monde pourra bientôt abandonner les hydrocarbures présente deux défauts en son fondement même. Le premier : les réalités physiques ne permettent pas de connaître, dans les domaines de l'énergie, le type de changement révolutionnaire réalisé aux confins du numérique. Le second : aucune technologie énergétique fondamentalement nouvelle n'a été découverte ou inventée depuis près d'un siècle – à tout le moins, rien d'analogue à l'invention du transistor ou d'Internet.

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

## Le pic des hydrocarbures est tout proche

« [Les technologies propres sont] l'exemple parfait d'un processus exponentiel (10x) qui fera disparaître les combustibles fossiles du marché en 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 À L'UBS

« Le monde connaît une transformation énergétique globale, stimulée par l'évolution technologique 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 pensent... [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 le semble aujourd'hui. »

– FONDS MONÉTAIRE INTERNATIONAL

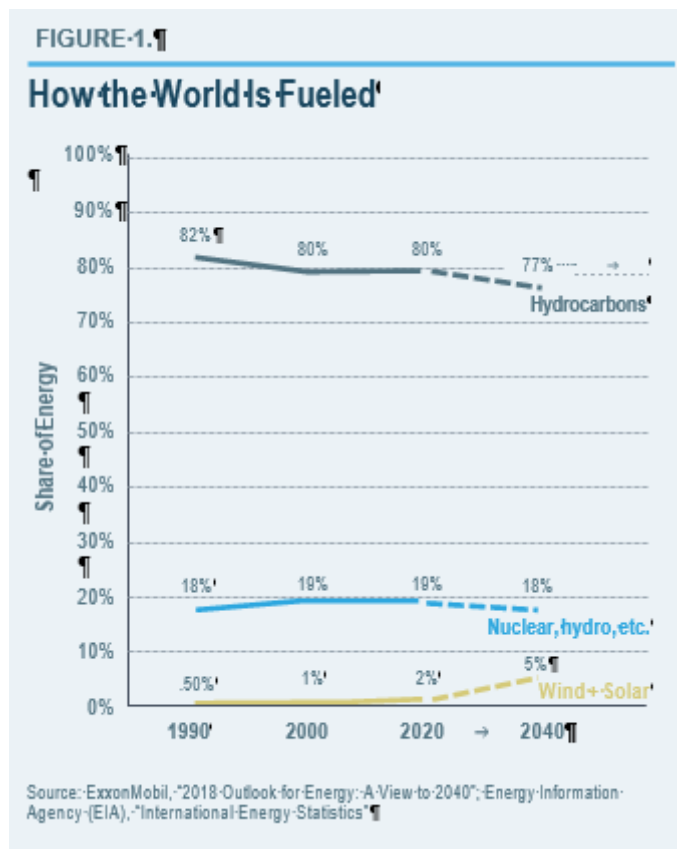
Source : Tony Seba, « Clean Disruption » (vidéo), Université de Stanford, 2017 ; Jean-François Mercure cité dans Steve Hanley, « Carbon Bubble About to Burst, Leaving Trillions in Stranded Assets Behind, Claims New Research », *Clean Technica*, 5 juin 2018 ; Sam Arie, « Renewables Are Primed to Enter the Global Energy Race », *Financial Times*, Aug. 13, 2018 ; OCDE, « Mission possible », Commission des transitions énergétiques, novembre 2018 ; Steve Hanley, « Ahead of G7 Meeting, Investors Urge an End to Coal Power & Fossil Fuel Subsidies », *Clean Technica*, 5 juin 2018 ; « Economists' Statement on Carbon Dividends » ; « Investing Prophet Jeremy Grantham Takes Aim at Climate Change », *Bloomberg*, janv. 17, 2019 ; *Wall Street Journal*, 16 janvier 2019 (plan Baker –Shultz) ; Fonds monétaire international, « Riding the Energy Transition : Oil Beyond 2040 », mai 2017.

## Décrocher la lune : le défi de l'échelle

L'univers regorge d'énergie. Pour l'humanité, le défi a toujours été de fournir de l'énergie à des fins d'usage, d'une manière 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 en surface, de la lumière du soleil en altitude ou d'hydrocarbures enfouis profondément dans la terre, la conversion d'une source en énergie utilisable nécessite toujours du matériel à forte intensité de capital.

Si l'on considère la population mondiale et la taille des économies modernes, des considérations d'échelle ont leur importance. En physique, lorsqu'on tente de modifier un système, 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 est celle-ci : 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**).<sup>3</sup> Au cours de ces deux décennies, la consommation mondiale totale d'énergie a augmenté de 50%, ce qui revient à l'ajout de deux fois la demande des Etats-Unis.<sup>4</sup>



Le faible pourcentage de baisse de la part des hydrocarbures dans la consommation mondiale d'énergie a nécessité plus de 2000 milliards de dollars de dépenses mondiales cumulées pour des solutions de remplacement au cours de cette période<sup>5</sup>. Les images populaires de champs ornés de moulins à vent 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 de l'échelle pour toute transformation des ressources énergétiques commence par une description. Aujourd'hui, les économies mondiales ont besoin d'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. Pour en donner une représentation visuelle : si tout ce carburant se trouvait sous forme de pétrole, les barils formeraient une ligne de Washington, D.C., à Los Angeles, et cette ligne entière augmenterait de la hauteur du Washington Monument chaque semaine.

Pour remplacer complètement les hydrocarbures au cours des 20 prochaines années, la production mondiale d'énergies renouvelables devrait être multipliée par au moins 90.<sup>6</sup> Replaçons les choses dans leur contexte : il a fallu un demi-siècle pour que la production mondiale de pétrole et de gaz soit multipliée par 10.<sup>7</sup> Il est illusoire de penser, indépendamment des coûts, qu'une nouvelle forme d'infrastructure énergétique pourrait aujourd'hui se développer neuf fois plus que cela, en moins de la moitié de ce temps.

Si l'objectif initial était plus modeste – par exemple remplacer les hydrocarbures uniquement aux États-Unis et seulement ceux utilisés pour la production d'électricité –, le projet nécessiterait un effort industriel supérieur à la mobilisation de la Seconde Guerre mondiale.<sup>8</sup> Une transition vers une *électricité* 100% sans hydrocarbures d'ici 2050 exigerait un programme de construction du réseau américain 14 fois plus important que le taux de construction du réseau qui a prévalu au cours du dernier demi-siècle.<sup>9</sup>

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

La réponse courante à ce défi redoutable est que « Si nous pouvons envoyer un homme sur la lune, nous pouvons sûrement ... [remplir les blancs avec un objectif ambitieux] ». Mais transformer l'économie énergétique ne revient pas à envoyer quelques personnes sur la lune à quelques reprises. Cela revient à mettre toute l'humanité sur la lune – de façon permanente.

## La réalité des coûts de l'énergie éolienne et solaire repose sur la physique

Les technologies qui forment le cadre de vision de la nouvelle économie de l'énergie se résument à trois choses : les éoliennes, les panneaux solaires et les batteries.<sup>10</sup> Bien que les batteries ne produisent pas d'énergie, elles sont essentielles pour garantir que l'énergie éolienne et solaire intermittente soit disponible pour les foyers, les entreprises et les transports.

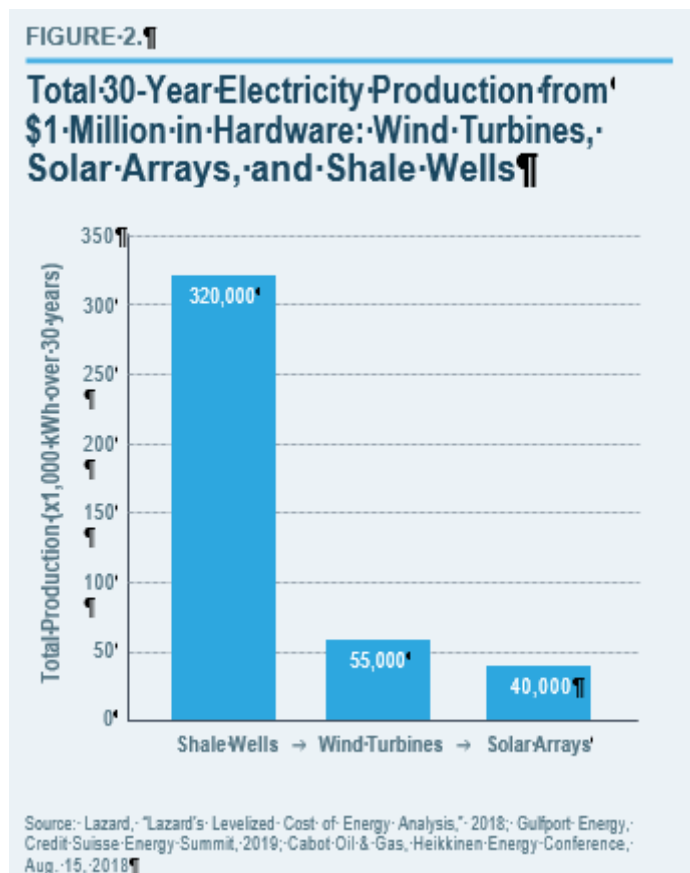
Pour autant, les éoliennes et l'énergie solaire ne sont pas en soi de « nouvelles » sources d'énergie. L'éolienne moderne est apparue il y a 50 ans et a été rendue possible par de nouveaux matériaux, notamment la fibre de verre à base d'hydrocarbures. La première technologie solaire commercialement viable date également d'un demi-siècle, tout comme l'invention de la batterie au lithium (par un chercheur d'Exxon).<sup>11</sup>

Au fil des décennies, ces trois technologies se sont grandement améliorées et sont devenues environ dix fois moins chères.<sup>12</sup> Subventions mis à part, ce fait explique pourquoi, au cours des dernières décennies, l'utilisation de l'énergie éolienne/solaire s'est tellement développée en partant quasiment de zéro.

Néanmoins, les technologies éolienne, solaire et les batteries vont continuer à s'améliorer, dans certaines limites. Ces limites ont une grande importance – nous y reviendrons plus tard – en raison de la demande exponentielle d'énergie dans le monde moderne et des réalités en matière de sources d'énergie offertes par Mère Nature.

Avec la technologie actuelle, un million de dollars de panneaux solaires à l'échelle industrielle produira environ 40 millions de kilowattheures (kWh) sur une période de 30 ans (**figure 2**). Il en va de même pour 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.<sup>13</sup> En revanche, un matériel d'une valeur d'un million de dollars pour une plate-forme de forage de roche-mère produira suffisamment de gaz naturel sur 30 ans pour générer plus de 300 millions de kWh.<sup>14</sup> Cela représente environ 600% d'électricité en plus pour le même capital dépensé pour la production d'énergie primaire.<sup>15</sup>



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 schiste, on peut construire deux éoliennes de 2 mégawatts (MW) de 500 pieds de haut. Ces deux éoliennes produisent une énergie combinée qui, au fil des ans, équivaut en moyenne à celle 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 sur des décennies.<sup>16</sup>

L'énorme disparité de production découle des différences inhérentes aux densités énergétiques, qui sont des caractéristiques de la nature insensibles aux aspirations du public ou aux subventions gouvernementales. La haute densité énergétique de la chimie des hydrocarbures à l'œuvre dans le monde physique est unique en son genre et bien comprise, tout comme la science qui sous-tend la faible densité énergétique inhérente à la lumière solaire de surface, aux volumes et à la vitesse du vent.<sup>17</sup> *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 rendements de conversion des cellules photovoltaïques ou des éoliennes.*

Ce type de comparaison entre l'éolien, le solaire et le gaz naturel montre d'où l'on part pour faire d'une source d'énergie brute une énergie utilisée. Mais pour que toute forme d'énergie devienne une source primaire d'énergie, il faut une technologie supplémentaire. Pour le gaz, il faut nécessairement investir dans un turbo-générateur afin de convertir le combustible en électricité de réseau. Pour l'énergie éolienne ou solaire, il faut investir dans une forme de stockage pour convertir l'électricité intermittente en électricité commercialisée, disponible 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.



## Un coût élevé pour assurer la disponibilité de l'énergie

La disponibilité est la caractéristique la plus critique de toute infrastructure énergétique, suivie du prix, puis de la recherche éternelle d'une diminution des coûts sans affecter la disponibilité. Jusqu'à l'ère moderne de l'énergie, le progrès économique et social a été entravé par la nature intermittente 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<sup>18</sup>.

Dans notre société centrée sur les données et de plus en plus électrifiée, il est vital de disposer d'une alimentation électrique permanente. Mais comme en toute chose, la contrainte en matière de technologies et de coût, en vue d'assurer la disponibilité, réside dans la physique.<sup>19</sup> Pour les systèmes à base d'hydrocarbures, la disponibilité est dominée par le coût de l'équipement capable de convertir le combustible en énergie de manière continue pendant au moins 8000 heures par an, durant des décennies. Dans le même temps, il est par nature facile de stocker le combustible associé pour répondre aux hausses prévues ou inattendues de la demande, ou aux défaillances de la chaîne d'approvisionnement dues aux conditions météorologiques ou aux 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.<sup>20</sup> Le stockage du charbon est encore moins cher. Il n'est donc pas surprenant que les États-Unis aient en moyenne un à deux *mois* de demande nationale en stock pour chaque type d'hydrocarbure et à tout moment<sup>21</sup>.

Par ailleurs, avec des batteries, il en coûte environ 200 dollars pour stocker l'énergie équivalente à un baril de pétrole.<sup>22</sup> Ainsi, au lieu de mois, à peine deux *heures* de la demande nationale d'électricité peuvent être stockées dans le total combiné de toutes les batteries à l'échelle industrielle du réseau, plus toutes les batteries du million de voitures électriques qui existent aujourd'hui en Amérique.<sup>23</sup>

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 problématiques que pour les turbines à combustion. Mais l'électrochimie complexe et relativement instable des batteries constitue un moyen par nature plus coûteux et moins efficace de stocker l'énergie et de garantir sa disponibilité.

Comme les hydrocarbures sont si facilement stockés, les centrales électriques conventionnelles inactives peuvent être activées et désactivées pour suivre les cycles de la demande 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 moins.<sup>24</sup> Les centrales électriques conventionnelles, en revanche, ont une « disponibilité » très élevée, de l'ordre de 80 à 95%, et souvent plus.<sup>25</sup>

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 trois fois supérieure à celle d'un réseau à hydrocarbures : autrement dit, il faut construire 3kW d'équipement éolien/solaire pour chaque kW d'équipement de combustion éliminé. Cela se traduit directement par des coûts trois fois plus élevés, même si les coûts par kW étaient tous identiques.<sup>26</sup>

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 sources<sup>27</sup>.



## Le mythe de la parité de réseau

Comment ces désavantages en termes de capacité et de coûts s'accordent-ils 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 (AIE) des États-Unis et d'autres analyses similaires font état d'un « coût de l'énergie actualisé » (LCOE) pour tous les types de technologies d'énergie électrique. Dans les calculs du LCOE de l'AIE, l'électricité produite par une éolienne ou un panneau solaire est calculée comme étant, respectivement, 36% et 46% plus chère que celle produite par une turbine au gaz naturel, c'est-à-dire qu'elle s'approche de la parité.<sup>28</sup> Mais dans une mise en garde importante et rarement remarquée, l'AIE déclare : « Les valeurs de LCOE pour les technologies renouvelables et non renouvelables sont indiquées séparément dans les tableaux, parce que leur comparaison *doit être effectuée avec soin* »<sup>29</sup> (c'est nous qui soulignons). En d'autres termes, les calculs des LCOE ne tiennent pas compte de l'ensemble des coûts réels, même 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 utilisant 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 son illusion de précision, repose sur une un ensemble de suppositions et supputations sujettes à contestation, si ce n'est à caution.

Par exemple, un LCOE suppose que le coût futur des combustibles concurrents – notamment le gaz naturel – augmentera de manière significative. Mais cela signifie que le LCOE est plus une prévision qu'un calcul. C'est important car un « coût actualisé » fait usage d'une telle prévision pour calculer un prétendu coût moyen sur une 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 le constat que les prix bas sont la nouvelle normalité dans un avenir prévisible.<sup>30</sup> L'ajustement du calcul du LCOE pour refléter un avenir où les prix du gaz n'augmentent pas radicalement accroît l'avantage du coût LCOE du gaz naturel par rapport à l'éolien/au solaire.

Un LCOE intègre 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 en faveur de la dépense d'un capital précieux aujourd'hui afin de résoudre un problème futur (théorique). Les partisans de l'utilisation de faibles taux d'actualisation supposent pour l'essentiel une croissance économique lente.<sup>31</sup>

Un taux d'actualisation élevé suppose en effet qu'une société future sera beaucoup plus riche qu'aujourd'hui (sans compter qu'elle disposera de meilleures technologies).<sup>32</sup> 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 une hypothèse sur les facteurs de capacité moyens sur plusieurs décennies, sur la part de temps pendant laquelle l'équipement fonctionne réellement (c'est-à-dire le temps réel, et non théorique, pendant lequel le soleil brille et le vent souffle). L'EIA suppose, par exemple, des facteurs de capacité, respectivement, de 41% et 29% 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 33% et 22%.<sup>33</sup> 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 2MW, 3 millions de dollars de production d'énergie supposée dans les modèles financiers n'existeront pas, et ce pour une éolienne dont le coût d'investissement initial 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.<sup>34</sup> Il est à noter que ce gain a été obtenu principalement en réduisant le nombre de turbines par acre tentant de capter l'air en mouvement, ce qui a entraîné une augmentation d'environ 50% de la superficie moyenne utilisée par unité d'énergie éolienne.

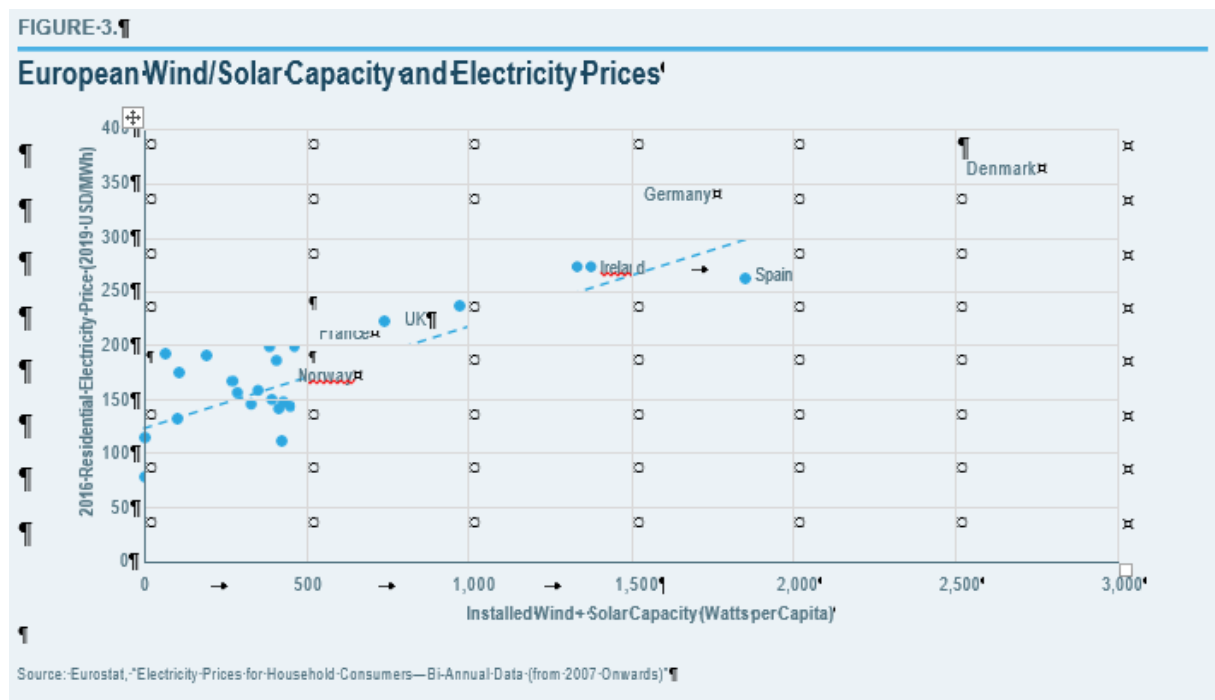
Les calculs du LCOE incluent raisonnablement des coûts tels que les taxes, le coût de l'emprunt et l'entretien. Mais là encore, les résultats mathématiques donnent l'apparence de la précision tout en cachant des hypothèses. Par exemple, les hypothèses concernant les coûts de maintenance et les performances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

Pour résoudre au moins un problème lié à l'utilisation du LCOE en tant qu'outil, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a récemment avancé l'idée d'un LCOE « ajusté à la valeur », ou VALCOE, afin d'inclure les éléments de flexibilité et d'intégrer les implications économiques de la capacité de distribution. Les calculs de l'AIE utilisant la méthode VALCOE ont montré que l'énergie du charbon, par exemple, est bien moins chère que l'énergie solaire, avec un désavantage de coût qui va s'accroissant à mesure qu'augmente la part de la production solaire dans un réseau.<sup>36</sup>

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. En fait, indépendamment des coûts d'exploitation supposés, nous disposons bien d'indications sur l'impact économique qu'entraîne l'usage accru de l'éolien et du solaire.

## Les coûts cachés d'un réseau « vert ».

Les subventions, les avantages fiscaux et les obligations d'utilisation peuvent masquer les coûts réels, mais lorsqu'ils s'accumulent suffisamment, l'effet sur les coûts globaux du système devrait être visible. 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).



L'Allemagne et la Grande-Bretagne, bien engagées sur la voie des « énergies nouvelles », ont vu les tarifs moyens de l'électricité augmenter de 60 à 110% au cours des deux dernières décennies.<sup>37</sup> La même tendance – plus d'énergie éolienne/ solaire et des factures d'électricité plus élevées – est visible en Australie et au Canada.<sup>38</sup>

Étant donné que la part de l'énergie éolienne par habitant aux États-Unis ne représente encore qu'une petite fraction de celle de la plupart des pays européens, l'impact sur les coûts pour les utilisateurs américains est moins spectaculaire et moins visible. Néanmoins, les coûts moyens de l'électricité résidentielle aux États-Unis ont augmenté d'environ 20% au cours des 15 dernières années.<sup>39</sup> Cela n'aurait pas dû se produire. Les tarifs moyens d'électricité 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.<sup>40</sup> Le prix du carburant représente environ 60 à 70% du coût de production de l'électricité lorsqu'on utilise des hydrocarbures.<sup>41</sup> 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 diminué d'environ 25% au cours de la seule dernière décennie. En d'autres termes, les économies réalisées grâce à la révolution du gaz de schiste ont, jusqu'à présent, protégé de manière significative les consommateurs contre des hausses de tarifs encore plus importantes.

L'utilisation accrue de l'énergie éolienne/solaire impose un ensemble de coûts cachés, relevant de la physique, qui sont rarement évoqués dans la comptabilité des distributeurs ou des gouvernements. Par exemple, lorsque de grandes quantités d'énergie font fluctuer la charge rapidement, de façon répétée et imprévisible, le défi et les coûts associés à l'« équilibrage » d'un réseau (c'est-à-dire au fait de l'empêcher de tomber en panne) s'en trouvent considérablement accrus. Les analystes de l'OCDE estiment qu'au moins certains de ces coûts « invisibles » imposés au réseau ajoutent 20 à 50% au coût des kilowattheures du réseau<sup>42</sup>.

En outre, le fait de faire passer le rôle des centrales électriques existantes du réseau de première source de production, à celui de soutien pour l'éolien et le solaire, entraîne d'autres coûts réels mais non alloués, qui découlent des réalités physiques. La cyclicité accrue des centrales électriques conventionnelles accroît l'usure et les coûts de maintenance. Cela réduit également l'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.<sup>43</sup>

Ensuite, si la part de l'énergie intermittente devient importante, le risque de blackout augmente. C'est ce qui s'est produit à deux reprises après que le vent s'est arrêté de manière inopinée (certains clients ont été privés d'électricité pendant plusieurs jours dans certaines zones) dans l'État d'Australie Méridionale, qui tire plus de 40% de son électricité de l'énergie éolienne<sup>44</sup>.

Après une panne totale du système en Australie Méridionale, en 2018, Tesla a installé, avec un fort battage médiatique, la plus grande « ferme » de batteries au lithium du monde sur ce réseau.<sup>45</sup> Pour remettre les choses en contexte, pour garder d'Australie Méridionale allumée pendant une demi-journée sans vent, il faudrait 80 de ces « plus grandes » fermes de batteries Tesla « du monde », et ce sur un réseau qui ne dessert que 2,5 millions de personnes.

Les ingénieurs ont d'autres moyens d'assurer la fiabilité, notamment en utilisant les bons vieux générateurs géants à moteur diesel comme système de secours (moteurs pour l'essentiel identiques à ceux qui propulsent les navires de croisière ou qui sont utilisés pour soutenir les centres de données). Sans tambour ni trompette, en raison de l'utilisation croissante de l'éolien, les distributeurs d'énergie américains ont installé des moteurs sur l'ensemble du réseau à un rythme effréné. Le réseau compte aujourd'hui plus de 4 milliards de dollars de générateurs à moteur (assez pour une centaine de navires de croisière), et beaucoup d'autres sont à venir. La plupart brûlent du gaz naturel, mais beaucoup d'entre

eux sont alimentées au pétrole. Au cours des deux dernières décennies, trois fois plus de gros moteurs alternatifs de ce type ont été ajoutés au réseau américain qu'au cours du demi-siècle précédent<sup>46</sup>.

Tous ces coûts sont réels et ne sont pas attribués aux générateurs éoliens ou solaires. Mais les consommateurs d'électricité les paient. Pour comprendre ce qui se passe, il faut savoir que la gestion des réseaux avec des coûts cachés imposés à des acteurs qui ne bénéficient pas d'avantages reviendrait à faire payer aux automobilistes 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 de l'énergie solaire se résume à un point simple : à l'échelle nationale, elles n'ont pas d'utilité en tant que source de combustible principale 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 permettent une analogie instructive.

La mise au point d'un hélicoptère pratique dans les années 1950 (quatre décennies après son invention) a suscité de tous côtés des commentaires hyperboliques, selon lesquels cette technologie révolutionnerait 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 vols réguliers transatlantiques – bien que cela soit possible avec une logistique élaborée – qu'on n'emploierait un réacteur nucléaire pour faire avancer un train ou des systèmes photovoltaïques pour alimenter un pays.

## Les batteries ne peuvent pas sauver le réseau ou la planète

Les batteries sont un élément central de ce à quoi aspire la nouvelle économie énergétique. La découverte d'une technologie capable de stocker l'électricité de manière aussi efficace et économique que, par exemple, le pétrole dans un baril ou le gaz naturel dans une caverne souterraine révolutionnerait le monde.<sup>47</sup> Un tel matériel de stockage de l'électricité rendrait même inutile la construction de centrales électriques nationales. On pourrait imaginer une OPEK (Organisation des pays exportateurs de kilowattheures) qui expédierait des barils d'électrons dans le monde entier à partir des pays 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 grands fleuves 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.<sup>48</sup> 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 toute autre affaire. Prenons l'exemple de Tesla, le fabricant de batteries le plus connu au monde : pour stocker l'équivalent énergétique d'un baril de pétrole, il faut des batteries Tesla d'une valeur de 200'000 dollars, qui pèsent toutes ensemble plus de 10 tonnes.<sup>49</sup> Un baril de pétrole, quant à lui, pèse 150 KG et peut être stocké dans un réservoir à 20 dollars. 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 aux batteries ne permettra pas de combler un tel écart.

Nonobstant cela, les décideurs politiques américains et européens adoptent avec enthousiasme des programmes et des subventions visant à étendre considérablement la production et l'utilisation de batteries à l'échelle du réseau.<sup>50</sup> Des quantités étonnantes de batteries seront nécessaires pour maintenir les réseaux nationaux sous tension, et le niveau d'extraction requis pour les matières premières sous-jacentes 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 un aperçu de chacune de ces réalités.

### **Combien de batteries faudrait-il pour éclairer la nation ?**

Un réseau entièrement basé sur l'éolien et le solaire nécessite d'aller au-delà de la préparation à la variabilité quotidienne normale du vent et du soleil ; il faut aussi 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 aucun des deux. Bien que peu fréquente, une telle combinaison d'événements – une couverture nuageuse continentale de jour sans vent significatif où que ce soit, ou une nuit sans vent – s'est produite 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 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 avait disparu.<sup>51</sup>

Combien de batteries faudrait-il donc pour stocker, disons, non pas deux mois, mais deux jours de l'électricité du pays ? La « *Gigafactory* » de Tesla, dans le Nevada, d'une valeur de 5 milliards de dollars, est actuellement la plus grande installation de fabrication de batteries au monde.<sup>52</sup> Sa production annuelle totale pourrait stocker l'équivalent de trois *minutes* de la demande annuelle d'électricité des États-Unis. Par conséquent, pour fabriquer une quantité de batteries permettant de stocker l'équivalent de deux jours de demande d'électricité aux États-Unis, il faudrait 1000 ans de production de la *Gigafactory*.

Les partisans de l'éolien et du solaire proposent de minimiser l'utilisation des batteries grâce à 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 pas toujours vrai, même à l'échelle d'un pays), la longueur de la transmission nécessaire pour atteindre un endroit « toujours » ensoleillé ou venteux pose également des problèmes importants de fiabilité et de sécurité. (Et le transport d'énergie sur de longues distances par fil est deux fois plus coûteux que par pipeline)<sup>53</sup>.

### **La construction de quantités massives de batteries aurait des implications considérables pour l'exploitation minière.**

L'une des principales raisons de la recherche d'une nouvelle économie de l'énergie est de réduire les externalités environnementales liées à l'utilisation des hydrocarbures. Si, de nos jours, l'attention se porte principalement 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 transport et au traitement des minéraux et des matériaux.

L'augmentation extrêmement forte 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. Il faut environ 30 kilos de batteries pour stocker l'énergie équivalente à celle contenue dans un demi-kilo d'hydrocarbures. Parallèlement, entre 25 et 50 kilos de matériaux divers sont extraits, déplacés et traités pour chaque livre de batterie produite.<sup>54</sup> 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.<sup>55</sup> Un avenir centré sur les batteries signifie que le monde devra extraire des gigatonnes de matériaux supplémentaires.<sup>56</sup> Et cela ne tient pas compte des gigatonnes de matériaux nécessaires pour fabriquer des éoliennes et des panneaux solaires.<sup>57</sup>

Même en l'absence d'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.<sup>58</sup> Dans un avenir où toutes les batteries seront utilisées, l'exploitation minière mondiale devra augmenter de plus de 200% pour le cuivre, d'au moins 500% pour des minéraux comme le lithium, le graphite et les terres rares, et de beaucoup plus pour le cobalt.<sup>59</sup>

Viennent ensuite les hydrocarbures et l'électricité nécessaires pour mener à bien toutes les activités d'extraction et pour fabriquer les batteries elles-mêmes. En gros, il faut l'équivalent énergétique d'environ 100 barils de pétrole pour fabriquer une quantité de batteries pouvant stocker un seul baril d'énergie équivalente au pétrole<sup>60</sup>.

Compte tenu de la réglementation hostile à l'exploitation minière sur le continent américain, un avenir énergétique centré sur les batteries garantit virtuellement une exploitation minière dans d'autres pays et une dépendance croissante de l'Amérique à l'égard 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. En particulier, la République démocratique du Congo produit 70% du cobalt mondial, et la Chine raffine 40% de cette production pour le monde entier<sup>61</sup>.

La Chine domine déjà la fabrication mondiale de batteries et est en passe de fournir près des deux tiers de l'ensemble de la production d'ici 2020.<sup>62</sup> Importance de cette vision pour la nouvelle économie de l'énergie : 70% du réseau électrique chinois est aujourd'hui alimenté par le charbon et ce pourcentage sera encore de 50% en 2040.<sup>63</sup> 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.<sup>64</sup>

La transformation du transport individuel, passant de l'utilisation des hydrocarbures à des véhicules à batterie, 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<sup>65</sup>.

Les batteries au lithium ont finalement permis aux VE de devenir raisonnablement pratiques. Tesla, qui vend désormais plus de voitures aux États-Unis que Mercedes-Benz, dans la catégorie de prix supérieure, a incité les constructeurs du monde entier à se précipiter pour produire des véhicules à batterie attractifs.<sup>66</sup> Cela a favorisé les velléités bureaucratiques à interdire purement et simplement 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 VE dans le monde passera de près de 4 millions aujourd'hui à 400 millions en deux décennies.<sup>67</sup> Un monde comptant 400 millions de VE en 2040 réduirait la demande mondiale de pétrole d'à peine 6%. Cela semble contre-intuitif, mais les chiffres sont clairs. Il y a environ 1 milliard d'automobiles aujourd'hui, et elles consomment environ 30% du pétrole mondial.<sup>68</sup> (Les poids-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 permettrait de remplacer environ 6% de la demande de pétrole.

En tout état de cause, les batteries ne représentent pas une révolution dans la mobilité individuelle équivalente, par exemple, au passage du cheval et de la calèche à la voiture – une analogie qui a été invoquée.<sup>69</sup> Conduire un VE présente plus d'analogies avec le fait de changer l'alimentation des chevaux et d'importer le nouveau foin.

## La loi de Moore mal appliquée

Face à toutes les réalités évoquées ci-dessus concernant les technologies vertes, les adeptes de la nouvelle économie de l'énergie pensent néanmoins que de véritables percées sont à venir et sont même inévitables. En effet, on prétend que les technologies énergétiques suivront la même trajectoire que celle observée ces dernières décennies dans le domaine de l'informatique et des communications. Le monde verra l'équivalent d'un Amazon ou d'un « Apple de l'énergie propre »<sup>70</sup>.

Cette idée est séduisante en raison des progrès stupéfiants des technologies du silicium, que si peu de prévisionnistes ont anticipés il y a des décennies. C'est une idée qui rend caduque toute mise en garde contre le fait que l'éolien, l'énergie solaire et les batteries sont trop chers aujourd'hui – une telle mise en garde est considérée comme stupide et à courte vue, analogue à l'affirmation, vers 1980, que le citoyen moyen ne pourrait jamais s'offrir un ordinateur. Ou encore de dire, en 1984 (année de la sortie du premier téléphone cellulaire au monde), qu'un milliard de personnes posséderaient un téléphone cellulaire, alors que celui-ci coûtait 9000 \$ (en dollars d'aujourd'hui). C'était une « brique » d'un kilo avec une durée de conversation de 30 minutes.

Les smartphones d'aujourd'hui ne sont pas seulement beaucoup moins chers, ils sont aussi beaucoup plus puissants qu'un ordinateur central IBM de la taille d'une pièce, il y a 30 ans. Cette transformation est due au fait que les ingénieurs n'ont cessé de réduire la taille et l'appétit énergétique des transistors et, par conséquent, de multiplier leur nombre par puce par deux environ tous les deux ans : c'est la « loi de Moore », du nom du cofondateur d'Intel, Gordon Moore.

L'effet combiné 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 moteurs logiques.<sup>71</sup> 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 aujourd'hui.

Dans le monde 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 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 cultiver une tonne de nourriture est déterminée par des propriétés physiques 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 même niveau d'efficacité que les ordinateurs depuis 1971, année de l'introduction par Intel du premier circuit intégré largement utilisé, le moteur d'une voiture produirait mille fois plus de *puissance* et se réduirait à la taille d'une *fourmi*.<sup>72</sup> Avec un tel moteur, une voiture pourrait réellement voler, et très rapidement.

Si le photovoltaïque était mis à l'échelle selon 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 adaptées à la loi de Moore, une batterie de la taille d'un livre, coûtant trois *cents*, pourrait alimenter un A380 à destination de 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 s'échelonne en sens inverse.

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<sup>73</sup>.



Le défi consistant à stocker et à traiter des informations en utilisant la plus petite quantité d'énergie possible est distinct du défi consistant à produire de l'énergie, ou à déplacer ou remodeler des objets physiques. Ces deux domaines font appel à 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 réduire ainsi la consommation d'énergie. Aucune option de compression comparable n'existe dans le monde des humains et du matériel.

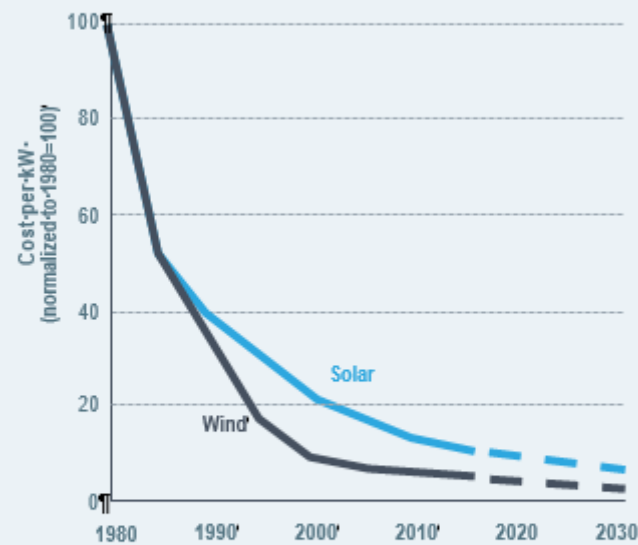
Bien sûr, les éoliennes, les cellules solaires et les batteries continueront à améliorer considérablement leurs coûts et leurs performances, tout comme les plates-formes de forage et les turbines à combustion (un sujet abordé plus loin). Et, bien sûr, les technologies de l'information de la *Silicon 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-après). Mais les résultats ne seront pas aussi miraculeux que l'invention du circuit intégré, ou la découverte du pétrole ou de la fission nucléaire.

## Descendre le long de l'asymptote du renouvelable

Les prévisions d'une baisse rapide et continue des coûts pour l'éolien, le solaire et les batteries s'inspirent des gains que ces technologies ont déjà connus. Au cours des deux premières décennies de commercialisation, après les années 1980, les coûts ont été divisés par 10. Mais la trajectoire des améliorations suit désormais ce que les mathématiciens appellent une asymptote ; ou, en termes économiques, les améliorations sont soumises à une loi de rendements décroissants, où chaque gain incrémentiel donne lieu à moins de progrès que par le passé (**figure 4**).

FIGURE 4.1

## Cost Reductions for Wind and Solar Power, 1980–2030



Source: Data drawn 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; Ran Fu, David Feldman, and Robert Margolis, "U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018," NREL, November 2018.

C'est un phénomène normal dans tous les systèmes physiques. Tout au long de l'histoire, les ingénieurs ont réalisé de grands progrès dans les premières années du développement d'une technologie, qu'il s'agisse de turbines à vent ou à gaz, de navires à vapeur ou à voile, de combustion interne ou de cellules photovoltaïques. Avec le temps, les ingénieurs parviennent à se rapprocher des limites physiques. Les raisons de fanfaronner pour des gains d'efficacité – ou de vitesse, ou d'autres mesures équivalentes telles que la densité énergétique (puissance par unité de poids ou de volume) – vont alors de pourcentages à deux chiffres à des pourcentages fractionnaires. 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 chiffre. De tels progrès sont économiquement significatifs, mais pas révolutionnaires.

Les limites des systèmes énergétiques imposées par la physique sont sans équivoque. Les panneaux solaires *ne peuvent pas* convertir plus de photons que ceux venant 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 limitées 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 huile *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 rendement de Carnot**, qui est ancrée dans la température de 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 présente dans le carburant peut être transformée en énergie.<sup>74</sup> En utilisant les matériaux haute température actuels, les meilleurs moteurs à hydrocarbures convertissent environ 50% à 60% en énergie. Des améliorations sont encore possibles, mais elles n'ont rien à voir avec les progrès révolutionnaires – une multiplication par dix à cent – réalisés au cours des deux premières décennies suivant leur invention. Les technologies éolienne et solaire se trouvent actuellement au même endroit de cette courbe technologique asymptotique.

**Dans le cas du vent, la limite est appelée limite de Betz**, qui détermine la quantité d'énergie cinétique de l'air qu'une pale peut capter ; cette limite est d'environ 60%.<sup>75</sup> Capter 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.<sup>76</sup> Il reste donc des gains réels à faire, mais comme pour les moteurs à combustion, rien de révolutionnaire.<sup>77</sup> Une nouvelle amélioration par un facteur 10 n'est pas possible.

Pour les cellules photovoltaïques (PV) en silicium, la limite physique est appelée limite de Shockley-Queisser : un maximum d'environ 33% des photons entrants sont convertis en électrons. Les cellules photovoltaïques commerciales les plus modernes 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 mettre au point de nouvelles options sans silicium offrant des améliorations de performance alléchantes, toutes ont des limites physiques similaires, et aucune n'est proche de la fabrication, encore moins à bas prix.<sup>78</sup> Il n'y a plus de gain d'un facteur 10.<sup>79</sup>

Les progrès futurs en matière d'économie éolienne et solaire sont désormais centrés sur des améliorations techniques incrémentielles : les économies d'échelle dans la fabrication des 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 essentiels – béton, acier et fibre de verre pour l'éolien, et silicium, cuivre et verre pour le solaire – sont déjà produits en masse et se situent bien en deçà des courbes de coût asymptotiques dans leurs propres domaines.

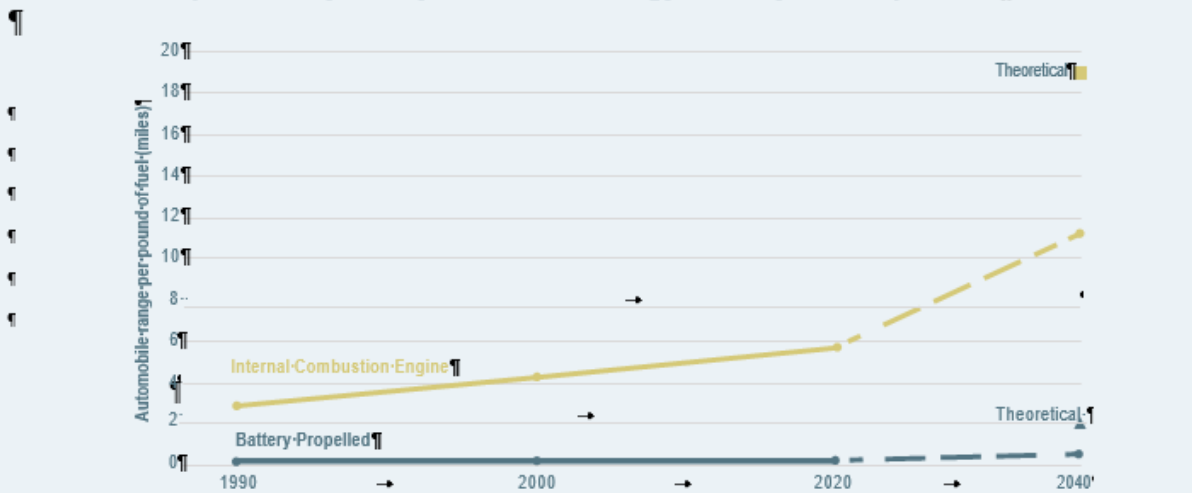
S'il n'y a pas de gains surprenants en matière d'économies d'échelle dans la chaîne d'approvisionnement, cela ne veut pas dire que des améliorations sont exclues en matière de coûts. En fait, tous les processus de fabrication connaissent des améliorations continues de l'efficacité de la production à mesure que les volumes augmentent. Cette courbe d'apprentissage 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 supporter. De même, 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 conduise à une baisse des coûts marginaux, mais, encore une fois, ce n'est pas le genre d'amélioration révolutionnaire qui pourrait rendre une nouvelle économie énergétique un tant soit peu plausible.

En ce qui concerne les batteries modernes, il existe encore des possibilités prometteuses d'amélioration significative de leur chimie physique fondamentale. Dans les laboratoires de recherche, de nouveaux matériaux autres que le lithium offrent un gain de 200%, voire de 300%, en termes de performances intrinsèques.<sup>80</sup> Ces gains ne constituent toutefois pas les avancées décuplées ou centuplées des premiers jours de la chimie de combustion.<sup>81</sup> Les améliorations potentielles laisseront toujours les batteries à des kilomètres de la véritable concurrence : le pétrole.

Il n'y a pas de subventions ni d'ingénierie de la *Silicon Valley* ou d'ailleurs, qui puissent combler l'écart physique entre les densités énergétiques des batteries et du pétrole (**figure 5**). L'énergie stockée par kilo est le critère essentiel pour les véhicules et, surtout, les avions. L'énergie potentielle maximale contenue dans les molécules de pétrole est environ 1500% plus élevée, kilo pour kilo, que celle contenue dans la chimie du lithium.<sup>82</sup> C'est pourquoi les avions et les fusées sont propulsés par des hydrocarbures. Et c'est pourquoi une amélioration de 20% de la propulsion par le pétrole (tout à fait réalisable) a plus de valeur qu'une amélioration de 200% des batteries (toujours difficile).

FIGURE-5.

### Tale-of-the-Tape: Battery-vs.-Hydrocarbon-Energy-Density-for-Propulsion



Source: Author calculations; 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* 7, no. 5 (May 2012): 7854-63; Richard Van Noorden, "The Rechargeable Revolution: A Better Battery," *Nature* 507, no. 7490 (March 2014): 26-8; Anton Wabman, "The New 39-MPG Toyota SUV vs. Tesla Model 3: Same Fuel-Cost-per-Mile," *Seeking Alpha*, Nov. 20, 2018; Kevin Gullis, "70 mpg, Without a Hybrid," *MIT Technology Review*, Oct. 25, 2010; Justin Hughes, "Toyota Develops World's Most Thermally Efficient 2.0-Liter Engine," *The Drive*, Mar. 1, 2018.

Enfin, en ce qui concerne les limites, il convient de noter que les technologies qui ont débloquent le pétrole et le gaz de schiste n'en sont encore qu'aux premiers stades de leur développement technique, 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-mère par une plateforme, avant d'approcher les limites physiques.<sup>83</sup> Ce fait contribue à expliquer pourquoi, au cours de la dernière décennie, le pétrole et le gaz de schiste ont ajouté 2000% de plus à la production d'énergie américaine que l'éolien et le solaire réunis.<sup>84</sup>

### La numérisation n'Uberisera pas le secteur de l'énergie

Les outils numériques améliorent déjà, et peuvent encore améliorer, l'efficacité de pans entiers de l'économie de toutes sortes de manières, et il est raisonnable de penser que les logiciels apporteront encore des améliorations significatives à la fois dans l'efficacité intrinsèque des machines éoliennes/solaires/batteries, et dans l'efficacité avec laquelle ces machines sont intégrées dans les infrastructures. La logique du silicium a amélioré, par exemple, le contrôle et donc l'efficacité énergétique des moteurs à combustion, et elle fait de même pour les éoliennes. De même, le logiciel incarné par Uber a montré qu'optimiser l'efficacité dans l'utilisation de moyens de transport coûteux permet de réduire les coûts. L'Uberisation de toutes sortes de biens d'équipement est inévitable.

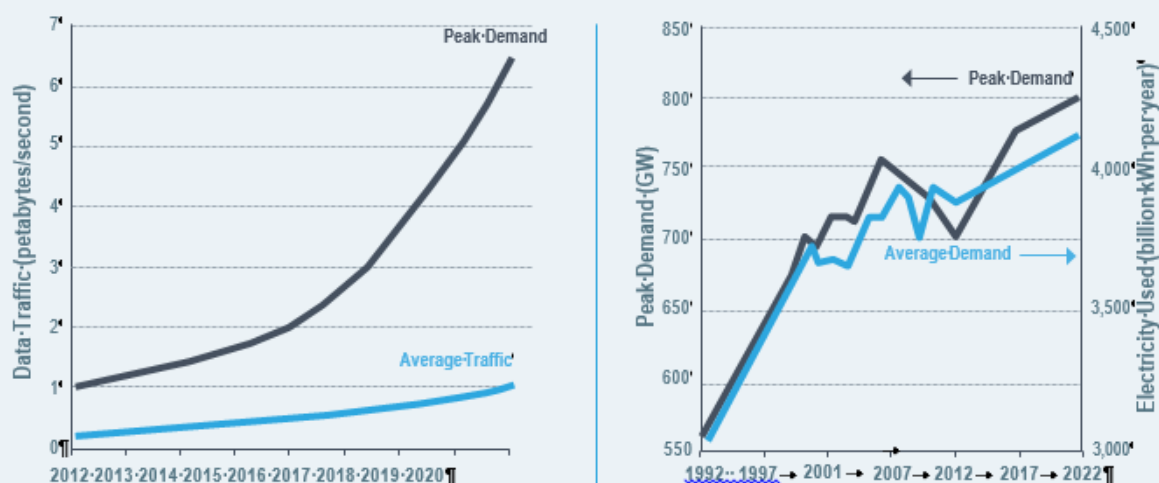
La mise en place d'un réseau électrique sans hydrocarbures est une toute autre affaire.

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

Dans le monde de l'énergie, l'un des problèmes les plus épineux est l'adéquation optimale entre 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 sera d'augmenter le besoin de batteries pour répondre à ces pics.

FIGURE-6.¶

### Peak vs. Average Demand: Data Traffic & Electricity'



Source: Cisco, "Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022 White Paper," Feb. 27, 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," Feb. 18, 2014; EPRI (Electric Power Research Institute), "The Integrated Grid: Capacity and Energy in the Integrated World," 2015 ¶

Tout ceci est pertinent pour encourager les VE. En ce qui concerne la gestion de la nature cyclique de la demande, transférer l'utilisation des carburants de transport du pétrole au 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 gérer avec le pétrole, étant donné la facilité de stockage. Le réapprovisionnement en carburant des véhicules électriques exacerbera la nature périodique de la demande au réseau.

Pour remédier à ce problème, une proposition consiste à encourager, voire à exiger, le ravitaillement en carburant des VE en dehors des heures de pointe.<sup>85</sup> On ne sait pas encore à quel point cette mesure sera populaire, ni même si elle sera tolérée.

Bien que les kilowattheures et les voitures – 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 les deux est très loin d'être à saturation. Les enthousiastes de l'écologie font des déclarations extravagantes sur l'effet des possibilités offertes par *Uber* and co. et les voitures à conduite autonome. Cependant, les données montrent que les gains d'efficacité économique liés à l'utilisation d'*Uber* ont jusqu'à présent augmenté l'utilisation des voitures et les pics de congestion urbaine.<sup>86</sup> De même, de nombreux analystes considèrent aujourd'hui que les véhicules autonomes amplifient cet effet, au lieu de l'atténuer.<sup>87</sup>

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

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

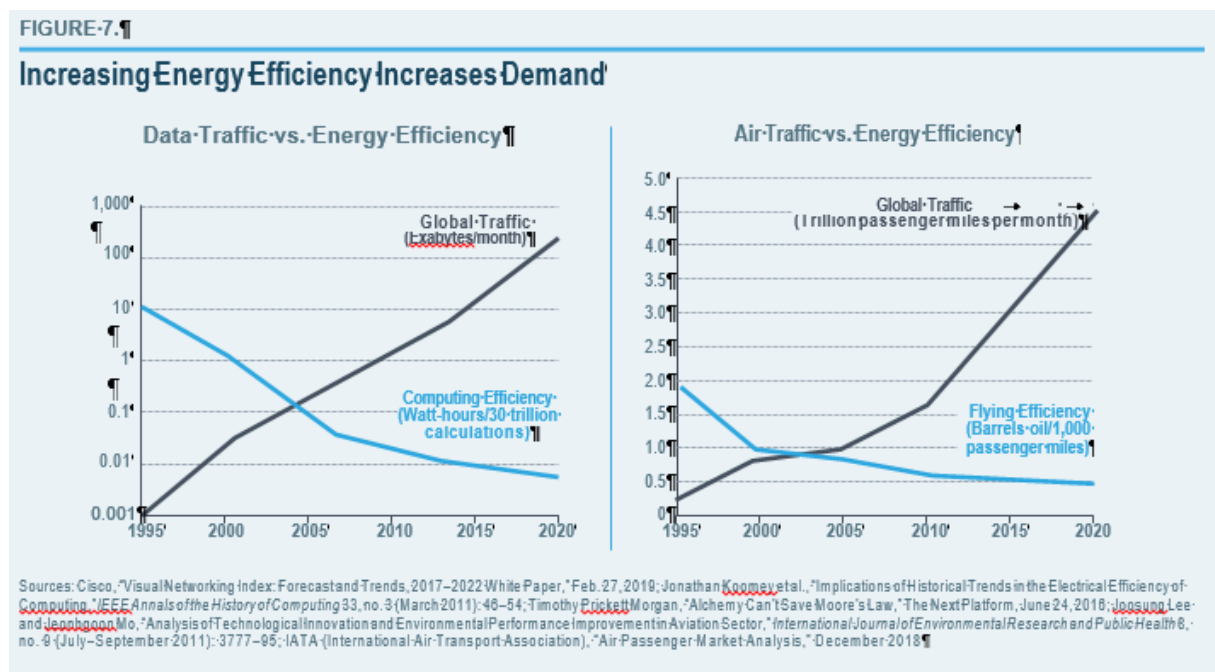
Chaque conversion d'énergie dans notre univers comporte une inefficience induite – conversion de la chaleur en propulsion, des hydrates de carbone en mouvement, des photons en électrons, des électrons en données, etc. Tous ces processus impliquent un certain coût énergétique, ou gaspillage, qui peut 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 a été associée. Nous constatons la même chose avec les moteurs à combustion modernes. Les avions d'aujourd'hui, par exemple, sont trois fois plus efficaces sur le plan énergétique que les premiers jets commerciaux de passagers des années 1950.<sup>88</sup> Cela n'a pas réduit la consommation de carburant, mais a fait exploser le trafic aérien et, avec lui, multiplié par quatre la consommation de kérosène.<sup>89</sup>

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 la consommation d'énergie de l'informatique. Au total, l'informatique et les communications mondiales consomment aujourd'hui l'équivalent énergétique de 3 milliards de barils de pétrole par an, soit *plus* d'énergie que l'aviation mondiale<sup>90</sup>.

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 gens et les entreprises veulent plus de ces avantages, la baisse des coûts 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 le transport aérien<sup>91</sup>.

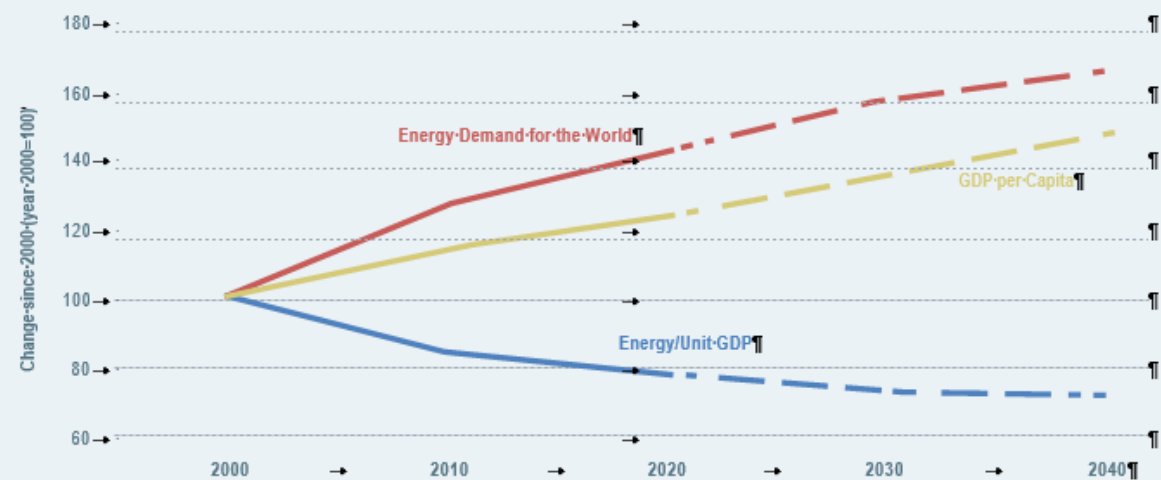


Bien sûr, la croissance de la demande d'un produit ou d'un service spécifique peut s'atténuer dans une société (riche) lorsque des limites sont atteintes : la quantité de nourriture qu'une personne peut manger, les kilomètres par jour qu'un individu est prêt à parcourir, le nombre de réfrigérateurs ou d'ampoules par foyer, etc. Mais un monde de 8 milliards d'habitants 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 favorisée. Les améliorations du coût et de l'efficacité apportées par les technologies numériques vont accélérer cette tendance, et non y mettre fin.

FIGURE-8.¶

### As Global Efficiency Improves, Energy Demand Rises ¶



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

## Les révolutions énergétiques ne sont pas encore à l'horizon

Lorsque les 4 milliards de personnes les plus pauvres du monde amèneront leur consommation d'énergie à seulement 15% du niveau par habitant des économies développées, la consommation mondiale d'énergie augmentera de l'équivalent d'une demande supplémentaire de l'ensemble des Etats-Unis.<sup>92</sup> Face à de telles projections, certains proposent que les gouvernements limitent la demande, voire interdisent certains comportements consommateurs d'énergie. Un article universitaire propose que « la vente de versions énergivores d'un appareil ou d'une application soit interdite sur le marché, et que les limitations deviennent progressivement plus strictes d'année en année, afin de stimuler les lignes de produits économes en énergie ».<sup>93</sup> D'autres ont fait des propositions pour « réduire la dépendance énergétique », en limitant la taille des infrastructures ou en exigeant l'utilisation des transports en commun ou du covoiturage<sup>94</sup>.

Le problème n'est pas seulement que les personnes les plus pauvres voudront et pourront inévitablement vivre davantage comme les personnes plus riches, mais aussi 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 la consommation de quelque 5 milliards de dollars de carburant d'aviation, sur deux décennies, pour les faire fonctionner. De même, chaque milliard de dollars de construction de centres de données consommera 7 milliards de dollars d'électricité sur la même période.<sup>95</sup> Le monde achète ces deux types d'énergie au rythme d'environ 100 milliards de dollars par an.<sup>96</sup>

La marche inexorable du progrès technologique pour les choses qui utilisent de l'énergie crée l'idée séduisante que quelque chose de radicalement nouveau est également inévitable dans les moyens de *produire* de l'énergie. Mais parfois, l'ancienne technologie ou la technologie établie est la solution optimale, et presque garantie contre tout dysfonctionnement. Nous utilisons toujours la pierre, les briques et le béton, qui datent tous 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 câbles électriques... la liste est longue. Les hydrocarbures sont, jusqu'à présent, les moyens optimaux d'alimenter la plupart des besoins et des envies de la société.



Il y a plus de dix ans, Google a concentré son capital humain bien connu d'ingénierie sur un projet appelé « RE<C », 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 : « Les améliorations incrémentales des technologies [énergétiques] existantes ne suffisent pas ; nous avons besoin de quelque chose de vraiment disruptif. (...) Nous n'avons pas les réponses. »<sup>97</sup> Ces ingénieurs ont redécouvert les types de physique et de réalités d'échelle mis en évidence dans ce document.

Une révolution énergétique ne viendra que de la poursuite des sciences fondamentales. Ou, comme l'a dit Bill Gates, le défi exige des « miracles » scientifiques.<sup>98</sup> Ceux-ci émergeront de la recherche fondamentale, et non des subventions aux technologies d'aujourd'hui. L'Internet n'est pas né de la subvention du téléphone commuté, ni le transistor de la subvention des tubes à vide, ni l'automobile de la subvention des 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.<sup>99</sup> Si les décideurs politiques veulent une révolution dans les technologies énergétiques, l'action la plus importante serait de recentrer et d'augmenter radicalement le soutien à la recherche scientifique *fondamentale*.

Les hydrocarbures – pétrole, gaz naturel et charbon – constituent la principale ressource énergétique mondiale aujourd'hui, et ils 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 est tout simplement impossible que le monde connaisse – ou puisse connaître – une transition à court terme vers une « nouvelle économie énergétique ».

## Notes de bas de pages

<sup>1</sup> Bill McKibben, “At Last, Divestment Is Hitting the Fossil Fuel Industry Where It Hurts,” *Guardian*, Dec. 16, 2018.

<sup>2</sup> “Mission Possible,” Energy Transitions Commission, November 2018.

<sup>3</sup> BP, “Energy Outlook 2018.”

<sup>4</sup> Ibid.

<sup>5</sup> IEA, “World Energy Investment 2018: Investing in Our Energy Future”; REN21, “Renewables 2018 Global Status Report.”

<sup>6</sup> 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.

<sup>7</sup> Ibid.

<sup>8</sup> Jason Hickel, “The Nobel Prize for Climate Catastrophe,” *Foreign Policy*, Dec. 6, 2018.

<sup>9</sup> Michael Cembalest, “Pascal’s Wager,” J. P. Morgan Asset Manager, April 2018.

<sup>10</sup> 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.

<sup>11</sup> Batteries International, “Battery Pioneers: Stanley Whittingham,” 2016.

<sup>12</sup> 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.

<sup>13</sup> 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.

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> 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.

<sup>16</sup> EIA, “Drilling Productivity Report,” February 2019.

<sup>17</sup> 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.

<sup>18</sup> 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 Thernstrom, “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,” *Influite 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; Leecham 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.