

Vitesse de déploiement et acceptabilité des nouvelles technologies dans le domaine des énergies

Grégory De Temmerman est directeur général de Zenon Research¹.

Respecter l'Accord de Paris sur le climat, visant à limiter le réchauffement climatique global à 1,5 ou 2 degrés, implique de diviser les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'un facteur 4 ou plus d'ici 2050 pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2100, c'est-à-dire ne plus émettre de CO₂ dans l'atmosphère². Sachant que plus de 80 % de l'énergie consommée dans le monde en 2019 provenait de combustibles fossiles (environ 65 % si

on considère seulement l'électricité³), une transformation, ou transition, radicale de notre infrastructure énergétique est nécessaire dans les trente prochaines années.

Les discussions autour de l'énergie sont souvent centrées sur le type de sources d'énergie à exploiter et négligent généralement le temps nécessaire pour mettre en place les technologies associées. On entend souvent des annonces spectaculaires de pays visant à décarboner leur production

1. www.zenonresearch.org/

2. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

3. <https://ourworldindata.org/energy-mix>

électrique dans des échelles de temps très réduites⁴.

Le but de ce chapitre est de réexaminer la notion fondamentale de transition énergétique et les enseignements que l'on peut tirer des transitions passées et de leurs durées, tant au niveau national que mondial. Ainsi, l'étude du déploiement de différentes sources d'énergie (nucléaires, photovoltaïque, éolien, etc.) permet de mettre en avant des similitudes et surtout des limites sur ce qui est physiquement possible; contrastant ainsi avec les discours très optimistes souvent mis en avant.

D'autres aspects importants sont à considérer pour la transition énergétique à venir. L'intégration d'une part croissante de moyens de production renouvelables intermittents implique que pour la première fois dans son histoire l'humanité évolue dans la direction d'une densité de puissance décroissante, et ce, alors que la tendance est vers l'augmentation de la consommation énergétique et la concentration d'une part croissante de la population dans des méga-villes. De plus, qu'on parle de nucléaire, d'éolien ou de solaire photovoltaïque, la question de l'acceptabilité sociale de ces différentes technologies se fait de plus en plus pressante^{5,6}. Gestion des

déchets, besoin en matériaux, occupation des sols, etc., sont en effet des sujets de controverse qui rendent l'adoption et la réalisation de grands projets difficiles et longs dans un contexte d'urgence climatique croissante.

1 Définition de la transition énergétique et ses objectifs

1.1. Définition de la transition énergétique

Avant toute chose, il est important de définir de quoi on parle quand on parle de transition énergétique. Les discussions sur l'énergie se concentrent souvent sur l'électricité qui, à l'échelle mondiale, n'est que 20 % de l'énergie finale que nous utilisons⁷. La littérature sur la transition énergétique est très riche et plusieurs définitions un peu différentes sont utilisées selon les auteurs⁸.

Ici, nous avons sélectionné trois définitions, qui viennent de trois auteurs connus, parce qu'elles sont un petit peu différentes dans leur façon d'appréhender les choses (*Figure 1*) :

– un changement dans les carburants utilisés, par exemple du bois au charbon ou du charbon au pétrole, et de leurs technologies associées

4. <https://www.scientificamerican.com/article/bidens-infrastructure-plan-would-make-electricity-carbon-free-by-2035/>

5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620301213>

6. https://www.eria.org/RPR_FY2015_No.19_Chapter_2.pdf

7. www.statista.com/statistics/1117696/share-electricity-final-energy-consumption-globally/#:-:text=ln%202017%2C%20the%20share%20of,around%2030%20percent%20by%202050.

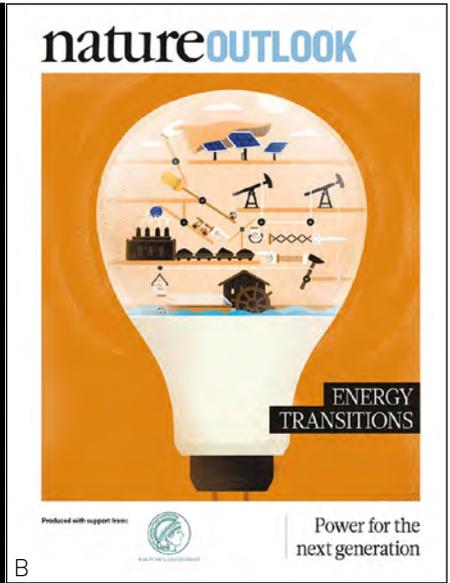
8. www.nature.com/collections/vhmqbnstc?WT.mc_id=PRT_NA_1117_Energytransitions

A

" A change in fuels (e.g. from wood to coal, or coal to oil) and their associated technologies (e.g. from steam engines to internal combustion engines)."
 R.F. Hirsh, C.F. Jones, *Energy Res. 1 Soc. Sci.* (2014)

" The switch from an economic system dependent on one or a series of energy sources and technologies to another."
 R. Fouquet, P.J.G. Pearson, *Energy Policy* (2012)

" The time that elapses between the introduction of a new primary energy source (or prime mover) and its rise to claiming a substantial share of the market."
 V. Smil, *Energy Myths and Reality*, (2010)



B

Figure 1

A) Trois définitions différentes de la transition énergétique ; B) Page de garde du magazine Nature Outlook sur les transitions énergétiques.

comme de la machine à vapeur au moteur à combustion interne⁹ ;

- le changement d'un système économique dépendant d'une ou d'une série de sources d'énergie et des technologies à un autre¹⁰ ;
- le temps entre l'introduction d'une nouvelle source d'énergie primaire (ou force motrice) et son ascension pour atteindre une part de marché significative¹¹.

Les deux définitions utilisées dans ce chapitre sont celles

9. Hirsh RF., Jones CF. (2014). *EnergyRes.*, 1 Soc. Sci.
 10. Fouquet R., Pearson PJG. (2012). *Energy Policy*.
 11. Smil V. (2010). *EnergyMyths and Reality*.

de Fouquet¹² ou de Smil¹³, qui se réfèrent à la transition d'un système économique dépendant d'une source d'énergie ou d'une série d'énergie à une autre. La vision de Smil est intéressante car elle s'intéresse à l'aspect temporel : la durée entre le moment où une nouvelle source d'énergie est introduite (ou un nouveau type

12. Roger Fouquet est chercheur et professeur membre de l'Institut de recherche de Grantham sur le changement climatique et l'environnement.

13. Vaclav Smil est un chercheur et analyste politique canadien pluridisciplinaire, professeur émérite de l'Université de Manitoba. Il a rédigé plus d'une quarantaine de livres portant sur des sujets allant de l'environnement à l'énergie, en passant par la politique publique.

de moteur] et le moment où elle devient dominante dans le système énergétique. Dans ce cas, le terme dominant implique une part de marché de 20-25 %. Comme nous le verrons, lorsqu'on s'intéresse à l'énergie et aux transitions, les échelles de temps sont en général assez longues.

1.2. Situation actuelle et perspectives

La **Figure 2**, issue du *Global Carbon Project*¹⁴, montre l'évolution des émissions anthropiques de dioxyde de carbone depuis 1850 et les différentes trajectoires de diminution des émissions compatibles avec la limitation à 2 °C, la hausse moyenne de la température mondiale par rapport à la période préindustrielle. En 2019, les émissions mondiales étaient d'environ 40 Gt

(milliards de tonnes) pour le CO₂ et d'environ 52 Gt pour l'ensemble des gaz à effet de serre¹⁵. On remarque que les émissions de CO₂ ont augmenté d'un facteur 4 entre 1950 et 2019, et n'ont jamais connu de baisses autres que celles liées à des événements ponctuels – des crises par exemple.

Ces chiffres sont gigantesques et il est difficile de se rendre compte de ce que cela représente. Si on considère 40 Gt de CO₂, cela correspond à 12 Gt de carbone (la molécule de CO₂ est 3,6 fois plus lourde que l'atome de carbone). Si on suppose que tout ce carbone est émis par la combustion de charbon très pur (de l'antracite), et qu'il est sous forme de cubes de 5 cm x 5 cm x 5 cm (la taille d'un Rubik's cube), alors l'humanité brûle chaque seconde environ 1,35 million de ces cubes par seconde (**Figure 3**) ! Si on regarde les trois énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel, la consommation mondiale en 2019 était de :

- charbon : 8 milliards de tonnes ;
- pétrole : 5 milliards de tonnes ;
- gaz naturel : 3 milliards de tonnes.

Pour le charbon, cela représente environ 1 tonne de charbon par an et par habitant au niveau mondial. Ces quantités sont gigantesques et illustrent une difficulté fondamentale de la transition énergétique : les quantités de matières et d'énergie que nous utilisons chaque année sont énormes et toujours en augmentation. Se passer des énergies fossiles,

14. Le Global Carbon Project est une organisation qui vise à quantifier les émissions de gaz à effet de serre et à identifier leur origine.

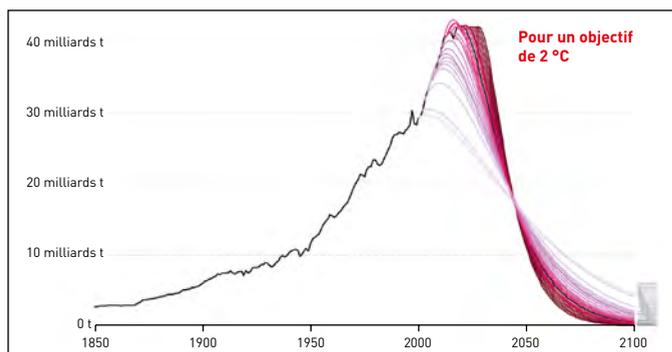


Figure 2

Évolution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère entre 1850 et 2100, avec plusieurs estimations entre 2020 et 2100.

Source : Robbie Andrews (2019), based on Global Carbon Project & IPCC SR15.

15. www.unep.org/emissions-gap-report-2020

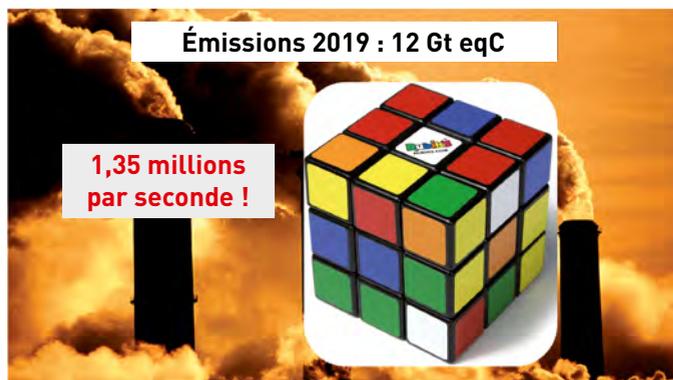


Figure 3

Émissions globales de CO₂ en 2019.

fortement émettrices de CO₂, implique donc un effort sans précédent. La Chine produit quasiment 50 % du charbon mondial¹⁶. Le deuxième producteur est l'Inde, avec environ 800 millions de tonnes, quasiment cinq fois moins que la Chine.

En 2019, la Chine a émis 14 Gt, soit 27 % des émissions mondiales. Loin devant les États-Unis (6,6 Gt) et l'Union Européenne (4,3 Gt). Les sept plus gros émetteurs représentent 65 % du total. Le groupe des vingt pays les plus riches engendre 78 % des émissions mondiales. Ramenés à la population, les chiffres donnent une image assez différente puisque la Chine, avec 10 t CO₂eq/hab., est alors très loin derrière les États-Unis avec quasiment 20 t CO₂eq/hab.

Ces chiffres doivent cependant être remis dans un contexte plus large pour pouvoir être interprétés.

Pour l'avenir du climat, le paramètre important est l'excès de CO₂ accumulé dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle. Depuis 1850, l'humanité a émis près de 2 000 Gt de CO₂. Les États-Unis sont responsables d'environ un quart de ces émissions¹⁷. L'Union Européenne a émis 22 %, la Chine 12,7 %. Certes, la part de cette dernière augmente rapidement. Mais la responsabilité historique du changement climatique actuel est donc principalement sur les pays occidentaux.

Sur la *Figure 2*, différents scénarios de baisse des émissions sont illustrés selon l'année à laquelle la baisse est effectivement engagée. Si celle-ci avait commencé en 2000, le rythme de baisse des émissions aurait été à peu près similaire au rythme de la hausse historique. Comme le montre le graphique, fin 2019 les émissions étaient

16. www.iea.org/reports/coal-2020/supply

17. <https://ourworldindata.org/contributed-most-global-co2>

toujours en hausse. La baisse doit maintenant être d'environ 7 % par an pendant les trente prochaines années pour limiter le réchauffement climatique. Cela représente une division par un facteur quatre entre 2020 et 2050. Pour rappel, et pour caractériser la vitesse que cela représente, les émissions avaient été multipliées par quatre entre 1950 et 2019 donc sur une période d'environ soixante-dix ans. Les émissions doivent donc diminuer à un rythme au moins deux fois supérieur à la hausse de ces soixante-dix dernières années. Il faut préciser que ces scénarios ne prennent pas en compte les technologies dites « à émissions négatives », c'est-à-dire la captation du CO₂ atmosphérique pour le stocker.

La *Figure 4* montre la baisse des émissions observée en 2020 du fait de la crise de la Covid-19. Les émissions mondiales

ont baissé d'environ 6,7 %¹⁸ par rapport à 2019. Baisse équivalente à ce qu'il faudrait faire tous les ans d'ici 2050. Cette baisse est largement conjoncturelle et est le résultat des mesures drastiques, confinements notamment, qui ont été prises pour tenter d'endiguer la propagation du virus. L'économie mondiale a été mise au ralenti pendant de nombreuses semaines – le PIB mondial a baissé d'environ 5 % en 2020¹⁹. S'il faut être prudent sur les parallèles entre la crise de 2020 et ce qu'il est nécessaire de faire pour diminuer les émissions, l'année 2020 illustre le fait que le défi climatique requiert des actions massives pour faire baisser significativement les émissions.

Quand on parle de transition énergétique, on peut avoir l'image de la *Figure 5* en tête, cette image d'un monde gris où l'on brûle du charbon, du pétrole ou du gaz naturel qui polluent l'environnement, et celui du monde à venir, un monde alimenté par des « énergies vertes ». Image d'un passage progressif vers des énergies peu émettrices de CO₂ et en grande partie renouvelables. Les narrations de type « *Green New Deal* »²⁰ donnent l'impression

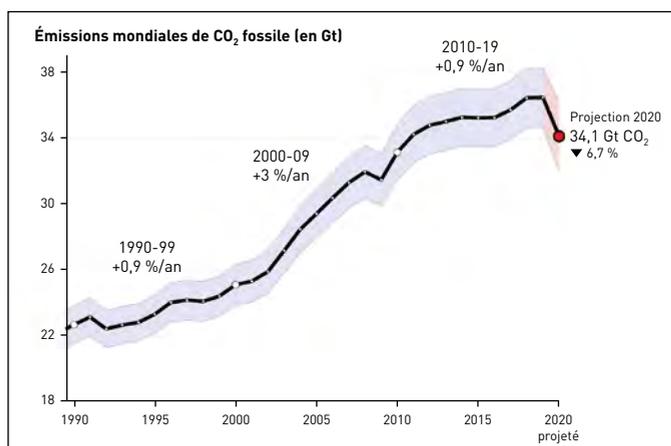


Figure 4

Évolution des émissions de dioxyde de carbone entre 1990 et 2020, avec une baisse observée en 2020 à cause de la pandémie de Coronavirus.

Source : www.carbonbrief.org, octobre 2020.

18. www.carbonbrief.org/global-carbon-project-coronavirus-causes-record-fall-in-fossil-fuel-emissions-in-2020

19. www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/06/24/WEOUpdateJune2020

20. Le « *Green New Deal* », ou pacte vert, désigne des projets globaux d'investissement visant à promouvoir les énergies renouvelables de manière à lutter contre le changement climatique tout en assurant une justice sociale.



Figure 5

Représentation de la volonté de passer d'un monde pollué et gris à un monde plus respirable avec les énergies renouvelables.

d'un changement qui se fera rapidement pour peu que la volonté politique soit présente. Mais, comme nous le verrons, les transitions énergétiques sont par nature lentes, et celle que nous devons engager a bien des chances de l'être également.

Le développement, permis par la stabilisation du climat, peut être vu comme une première façon de concentrer l'énergie solaire et ainsi d'augmenter la quantité d'énergie nette disponible. De même, l'utilisation de chevaux de traits représente un moyen d'augmenter la puissance disponible. Un cheval de trait consomme

2 Les transitions énergétiques par le passé : des additions

2.1. Historique des transitions énergétiques majeures

Historiquement, l'humanité a connu plusieurs transitions énergétiques, comme l'illustre la **Figure 6**. Ces transitions peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, mais une constante a été d'augmenter la quantité d'énergie utilisable. L'humain est en effet unique dans sa capacité de ne pas dépendre uniquement de son organisme mais d'être capable d'utiliser des sources d'énergie externes pour différents usages.

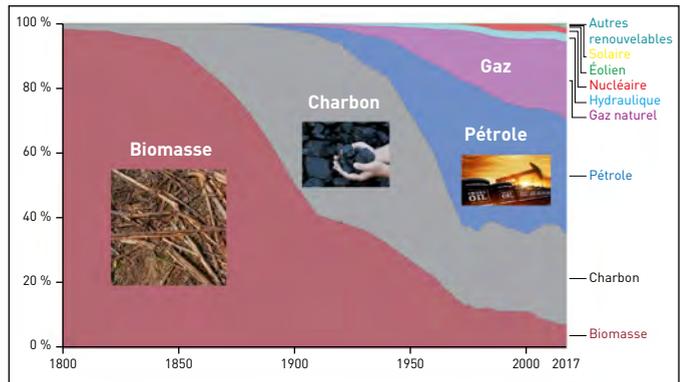


Figure 6

Évolution des sources d'énergie entre 1800 et 2017. Le graphe montre la part dans le bouquet énergétique primaire en pourcentage.

Source : Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy.

environ 4 kg d'avoine par jour, dont la culture prend l'espace nécessaire pour nourrir six personnes, mais fournit un travail équivalent à celui de dix hommes²¹. Le développement de moulins à eau, à vent, l'utilisation de bois et de charbon de bois... sont autant d'étapes dans l'accroissement de l'énergie mobilisée²². La biomasse (le bois notamment) a constitué la principale source d'énergie primaire utilisée. Le charbon s'est ensuite imposé et a contribué au développement de l'industrie.

Le charbon était déjà utilisé en Chine il y a 2 000 ans. Il fut utilisé pour des applications « industrielles » en Belgique dès le XII^e siècle²³. Mais c'est en Angleterre que son utilisation a vraiment décollé. En 1750, l'Angleterre en utilisait déjà 10 millions de tonnes notamment pour la sidérurgie. Le charbon a permis de contourner la limite posée par une déforestation sérieuse²⁴ causée entre autres par le développement de la sidérurgie. Il marque de plus un pivot d'une économie de flux, limitée par la vitesse de pousse des arbres, à une économie de stock. Les capacités d'extraction de cette matière accumulée pendant des millions d'années se développent rapidement, la demande étant portée par le développement rapide de la machine à vapeur et son

utilisation pour un nombre croissant d'applications.

Le pétrole s'est ensuite développé rapidement à partir du début du XX^e siècle. Le pétrole a l'avantage de posséder une densité énergétique bien plus élevée que le charbon : 42-47 MJ/kg contre 17-25 MJ/kg pour le charbon et 16 MJ/kg pour le bois sec. Étant dense et liquide, il peut être stocké et transporté plus facilement, ce qui explique son importance pour le domaine des transports. Enfin, le gaz naturel est le plus récent des combustibles fossiles à s'être déployé. Si sa densité énergétique massique (environ 53 MJ/kg) est plus élevée que celle du pétrole, il est gazeux à température ambiante et a donc une faible densité énergétique volumique. Il nécessite une infrastructure plus complexe pour être transporté et son transport par la mer n'a été possible qu'en le liquéfiant.

Le bouquet énergétique primaire est largement dominé par ces trois énergies. Au niveau mondial, le pétrole compte pour 37 % de l'énergie primaire, le charbon pour 30 % et le gaz pour environ 26 %²⁵.

En regardant les choses de façon un peu large, on pourrait dire que l'histoire énergétique de l'humanité se résume en l'exploitation de sources d'énergie toujours plus denses, celle-ci culminant avec le développement de l'énergie nucléaire dont la densité énergétique est 10 000 fois supérieure à celle du charbon.

21. Smil V., *Energy, a beginner's guide*.

22. Smil V., *Energy and Civilization: a history*.

23. www.jstor.org/stable/pdf/40564252.pdf?refreqid=excelsior%3A7ea1c4cb5c0f2f92aedecd32904bdfcb

24. <https://oneworld-publications.com/energy.html>

25. <https://ourworldindata.org/energy-mix>

En fait, ce n'est pas tout à fait vrai et l'évolution fut tout sauf linéaire. Ainsi, le charbon fut longtemps décrié pour la fumée qu'il produisait et fut même officiellement banni par le roi d'Angleterre au ^{xvi}^e siècle²⁶ – même si ce fut peu suivi. Le développement de l'industrie et de la population en Angleterre ont longtemps reposé sur le bois causant une importante déforestation. L'exploitation du charbon a permis de suppléer à la demande énergétique croissante. Il y a aussi des aspects économiques derrière l'émergence du charbon. Ainsi, l'utilisation de moulins à eau (pour les filatures par exemple) nécessitait d'être à proximité de cours d'eau. Le développement du charbon et du chemin de fer ont permis l'installation d'usines en ville là où la population est plus importante et la compétition pour l'emploi est plus grande. Cela a permis une pression sur les salaires et une augmentation des profits²⁷.

Il y a des aspects économiques derrière, ce qui a permis par exemple le charbon. Quand vous utilisiez des moulins à eau, il fallait que vos usines soient installées auprès d'une rivière, auprès d'un cours d'eau. Il fallait en fait au début installer le charbon près d'une mine de charbon mais ensuite, une fois que les transports se sont un peu développés, ce qu'on vous a permis de faire, c'est d'installer des usines dans les villes, là où il y a

beaucoup de personnel, ce qui vous permet en fait de payer le personnel moins et d'augmenter la survaleur. Donc il y a aussi un aspect capitaliste derrière l'expansion du charbon. De même, Jean-Baptiste Fressoz et Christophe Bonneuil dans leurs travaux montrent que l'essor du pétrole a en fait été un peu aidé par les grèves de mineurs de charbon parce qu'en fait, cela permettait de compenser ou d'amener une source d'énergie en plus et de faire pression sur les travailleurs du charbon²⁸.

2.2. Les transitions énergétiques : des accumulations de sources d'énergie

La Figure 6 donnait l'évolution relative des différentes énergies utilisées. Si on regarde maintenant en valeur absolue (*Figure 7*), la perception change complètement. Les différentes sources d'énergie ne se sont pas substituées les unes aux autres mais elles se sont au contraire additionnées. L'histoire des deux cents dernières années, et on pourrait remonter plus loin, est celle d'un empilement de sources d'énergie. On peut ainsi remarquer qu'on utilise plus de biomasse en 2019 qu'il y a deux cents ans. Le charbon représentait environ 47 % de l'énergie primaire mondiale en 1900, la biomasse 50 %. Si cette part a diminué au cours du ^{xx}^e siècle, la production de charbon a été multipliée par six sur le siècle. La part du charbon a même augmenté

26. Freese B., *Coal, a Human history*.

27. Andreas Malm, *L'anthropocène contre l'histoire*.

28. Fressoz J.-B., Bonneuil C., *L'événement anthropocène*.

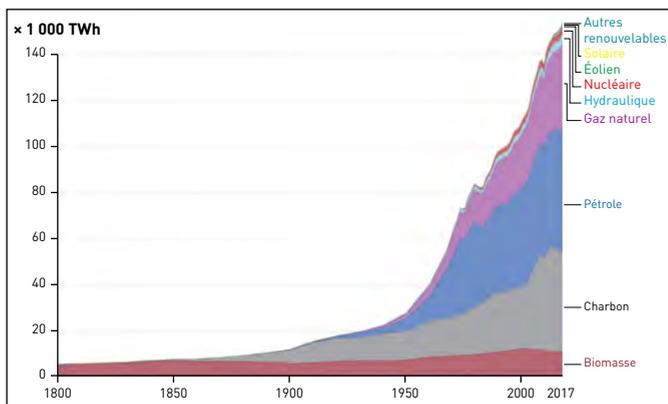


Figure 7

Additions des sources d'énergie les unes aux autres de 1800 à 2017, superposition des énergies au fur et à mesure de leur utilisation.

Source : Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy.

au début du ^{xxi}^e siècle sous l'influence de la Chine. La production chinoise a triplé entre 2000 et 2019. C'est pourtant la source d'énergie la plus émettrice de CO₂ (par unité de puissance produite) et celle qui cause le plus de décès²⁹, notamment à cause de la pollution de l'air.

Pire, l'utilisation de nouvelles sources d'énergie a historiquement toujours été accompagnée d'une augmentation de l'utilisation des énergies déjà utilisées³⁰. Et c'est assez logique puisque le développement de l'infrastructure nécessaire pour exploiter une nouvelle énergie se fait avec les énergies dont nous avons à disposition. Même à l'heure actuelle, les énergies fossiles

29. <https://ourworldindata.org/grapher/death-rates-from-energy-production-per-twh>

30. <https://theconversation.com/lenergie-fossile-cette-drogue-dont-nous-narrivons-pas-a-nous-sevrer-160507>

comptant pour plus de 80 % de l'énergie primaire, la construction de panneaux solaires ou d'éoliennes (cela est vrai également pour des réacteurs nucléaires) est permise par des énergies fossiles. Ce point est très souvent négligé et beaucoup d'ouvrages ou de reportages dénoncent l'utilisation d'énergies fossiles pour la construction d'éoliennes par exemple³¹, mais il ne peut en être autrement. Tant que la part d'énergie bas carbone dans le bouquet énergétique est faible, notre société repose sur des énergies fossiles.

Si on regarde la Figure 7, on constate que la transition énergétique à effectuer consiste à remplacer les trois gros blocs que sont le gaz, le charbon et le pétrole, par les énergies présentes sur le dessus de la courbe et comptant pour quelques pourcents.

31. <https://www.youtube.com/watch?v=Zk11vl-7czE>

Ainsi en 2020, le nucléaire représente 4 % de l'énergie primaire dans le monde, l'éolien 2 % et le photovoltaïque 1 %. L'hydroélectricité est la plus grosse source d'énergie bas carbone et compte pour environ 6,5 %. Ces sources devraient d'ici trente ans fournir la plus grosse part de notre énergie. Une substitution jamais réalisée jusqu'ici.

Pour aller un peu plus loin, on peut regarder l'évolution de la part des énergies fossiles dans le bouquet énergétique primaire (Figure 8A) entre 1960 et 2019, ainsi que les quantités en valeurs absolues. Si la part des fossiles a légèrement baissé depuis 1960, on remarque que cette baisse est extrêmement lente et que les fossiles représentent toujours plus de 80 % de notre énergie primaire. En parallèle, la consommation de pétrole a été multipliée par presque 5 sur cette période, et celle de gaz naturel par 7. S'il faut retenir une chose, c'est que loin de décarboner notre énergie, nous la carbonons : nous utilisons toujours plus d'énergies fossiles même si leur proportion dans le bouquet énergétique diminue légèrement. La transition énergétique n'est donc pour l'instant amorcée que de façon relative, alors que ce qui est important pour le climat c'est la quantité absolue d'énergie fossile que nous utilisons.

Si on regarde la production d'électricité, on voit que la situation est encore pire : en 2019 la part des énergies fossiles dans la production d'électricité est légèrement plus élevée qu'en 1960 ! Le charbon représente en effet

37 % de l'électricité mondiale³². Si la France est en train de fermer ses dernières centrales à charbon, certains pays développés en sont encore très dépendants. Cela représente en effet en 2020 : 19 % de l'électricité aux États-Unis³³, 23 % en Allemagne³⁴ et 29 % au Japon³⁵. Au total, il y a environ 2 000 GW de puissance au charbon installée dans le monde et environ 500 GW en construction ou prévus. Le rythme de construction a tendance à diminuer³⁶. Mais

- 32. <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- 33. <https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/electricity-in-the-us.php>
- 34. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
- 35. <https://ourworldindata.org/energy/country/japan>
- 36. https://endcoal.org/wp-content/uploads/2020/03/BoomAndBust_2020_English.pdf

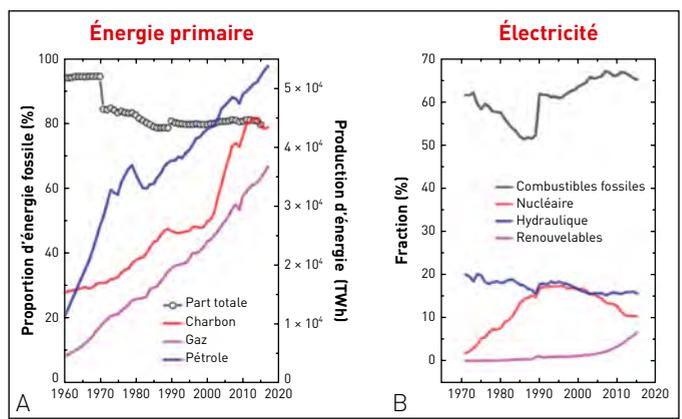


Figure 8

Évolution de la part des énergies fossiles (gaz, charbon, pétrole) dans l'énergie primaire (A) et de la proportion des sources d'énergie (fossiles, nucléaire, hydro-électricité) dans la production d'électricité (B) entre 1960 et 2020.

Source : à partir des données de la Banque mondiale.

un pays comme le Japon prévoyait en 2021 la construction de vingt-et-une centrales à charbon³⁷. On remarque que la part des renouvelables augmente dans la production électrique, et de nombreux pays ont des politiques très ambitieuses à ce niveau. Mais fermer les centrales à charbon et ne plus en construire est un passage obligé de la décarbonation, comme le rappelait, en 2021, l'IEA dans son scénario Net Zero by 2050³⁸.

Si on regarde maintenant plus en détails une analyse intéressante sur la **Figure 9**, on

37. <https://www.powermag.com/japan-pulls-back-from-coal-though-new-plants-move-forward/>
38. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

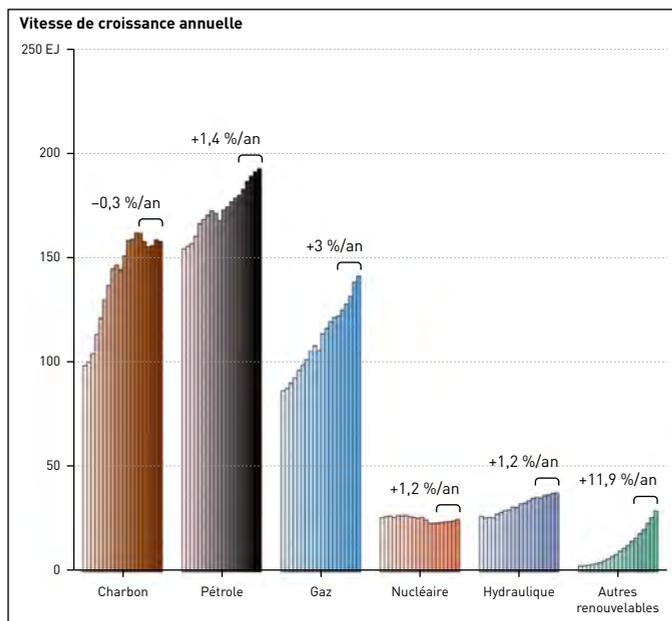


Figure 9

Évolution de la consommation d'énergie mondiale annuelle entre 2000 et 2019 par source.

Source : BP 2020 ; Jackson *et coll.*, 2019 ; Global Carbon Budget, 2020.

voit que le charbon a très fortement augmenté entre 2000 et 2014, en grande partie portée par la construction d'un grand nombre de centrales en Chine, pour stagner entre 2014 et 2019, avec une légère baisse de 0,3 % par an sur cette période. Le pétrole connaît une hausse de 1,4 % par an quand le gaz est en croissance rapide de 3 % par an. Le nucléaire et l'hydraulique sont sur des hausses de 1,2 % par an quand les renouvelables (éolien et photovoltaïque) connaissent de fortes croissances de l'ordre de 12 % par an. Elles restent cependant très minoritaires dans le bouquet énergétique même si elles devraient d'ici quelques années dépasser l'hydraulique et le nucléaire.

2.3. Parallèle entre vitesse de déploiement des technologies et consommation d'énergie

Si on regarde l'activité humaine, tout donne l'impression d'aller de plus en plus vite. On parle d'ailleurs de 'Grande Accélération' pour caractériser le développement spectaculaire, depuis les années 1950, de la population mondiale, de l'économie, de la population, de la consommation énergétique, des échanges commerciaux, et... de l'impact sur l'environnement.

Les vitesses d'adoption de certaines technologies peuvent également donner le vertige (**Figure 10**). En 2000, il y avait 730 millions de téléphones mobiles dans le monde. Seize ans plus tard, on en comptait 7,4 milliards, autant que d'habitants sur la planète. Ce qui ne signifie

pas que tous les habitants en ont un, certains en ayant plusieurs. Sur la même période, la proportion de foyers américains possédant une tablette est passée de 3 % à 64 %. Le rythme de sortie de nouveaux objets est également très rapide. Les fabricants de téléphone sortent une nouvelle version de leur modèle haut de gamme chaque année. Le nombre de pixels sur les appareils photos de smartphones a été multiplié par plus de 35 en dix ans³⁹, et la tendance est maintenant à la multiplication des capteurs. Rien ne surpasse la loi de Moore formulée sur la base d'observations empiriques par

39. <https://spire.sciencespo.fr/hdl/2441/3tcpvf3sd399op9sgtn8tq5bhd/resources/2019-cage-herve-et-viaud-the-production-of-information-in-an-online-world-is-copy-right.pdf>

le co-fondateur d'Intel en 1965 puis révisée en 1975. Elle postule un doublement du nombre de transistors sur un circuit imprimé tous les deux ans, soit une croissance annuelle de 41 %. Croissance maintenue sur quasiment cinquante ans, résultant en une multiplication par 25 millions !

Ces données (et les autres exemples montrés par la Figure 10) peuvent justifier l'optimisme entendu au sujet de la transformation de notre système énergétique. Mais il faut se rappeler qu'un téléphone portable, c'est très petit, même s'il y a une infrastructure d'antenne, etc., et cela ne concerne qu'une application donnée. Et l'infrastructure énergétique, par nature, ne peut pas avoir une dynamique aussi rapide parce que sa transformation représentée en fait un changement

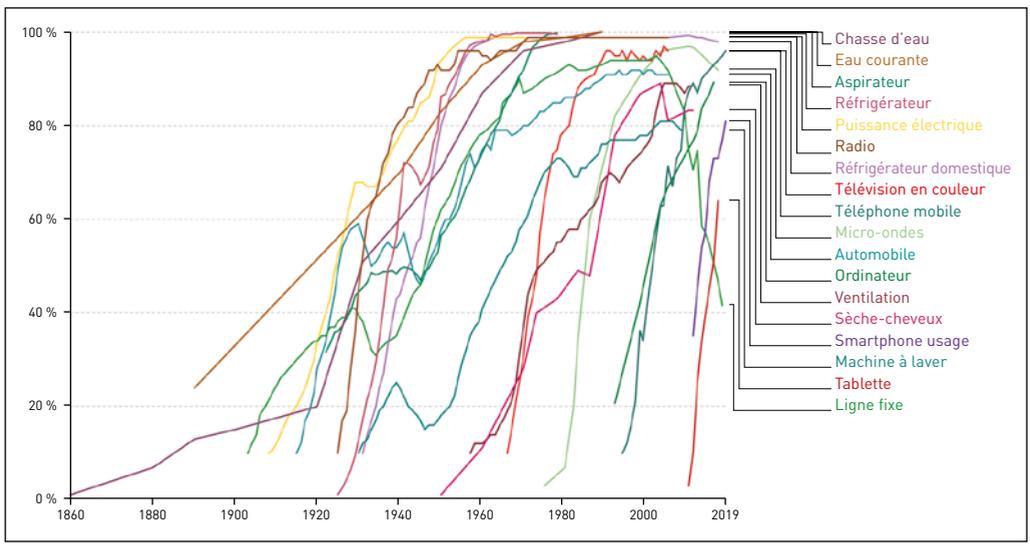


Figure 10
 Proportion de diffusion des technologies aux États-Unis entre 1860 et 2019.
 Source : Comin and Hobijn (2004) and others. OurWorldInData.org/technology-adoption/CC BY.

complet de la source d'énergie à la chaîne de transport et d'utilisation.

Smil, dans son livre *Energy transitions*⁴⁰, regarde la vitesse de déploiement du charbon, du pétrole et du gaz naturel à partir du moment où ces sources représentent 5 % de la demande mondiale. Ce critère est en partie arbitraire mais est choisi car représentatif du moment où une source d'énergie occupe une place non négligeable dans le bouquet énergétique. Ainsi, le charbon a mis cinquante ans pour passer de 5 % à 40 % de la part d'énergie primaire. Le pétrole a mis cinquante ans pour passer de 5 % à 30 % et le gaz naturel a mis cinquante ans mais pour passer de 5 % à 20 %. On remarque que les échelles de temps s'allongent sur ces trois exemples. Pourquoi ? En fait, parce que

40. <http://vaclavsmil.com/2016/12/14/energy-transitions-global-and-national-perspectives-second-expanded-and-updated-edition/>

la base augmente : la consommation énergétique mondiale augmente et il devient de plus en plus difficile d'atteindre une certaine part du marché. Et comme la consommation énergétique était sur une évolution en croissance et plus ou moins en croissance exponentielle, il est de plus en plus dur de suivre le rythme.

De plus, les énergies fossiles les plus faciles à récupérer ont d'abord été utilisées. Parce qu'au tout début, prendre du charbon, c'était assez simple. En Angleterre, les premiers filons étaient très proches de la surface. Pour le pétrole, on a tous des images de pétrole jaillissant du sol au début du xx^e siècle. Maintenir le rythme de production et exploiter des nouveaux gisements impose l'utilisation de techniques plus complexes. Ainsi les puits de pétrole *offshore* les plus profonds atteignent maintenant des profondeurs supérieures à 3,5 km⁴¹. Enfin, le gaz naturel est complexe à transporter. Il faut, pour le transporter sur des grandes distances, soit des pipelines⁴² ou des gazoducs⁴³, soit liquéfier le gaz. Cela induit une complexité. Tant qu'on est sur une base qui augmente, et comme on développe a priori des sources d'énergie qui sont de plus en plus techniques, il

41. <https://www.offshore-technology.com/features/deepwater-exploration-what-it-takes-to-drill-really-really-deep/>

42. Pipeline : ouvrage destiné à transporter sur de grandes distances des fluides, comme du gaz dans notre cas.

43. Gazoduc : canalisation permettant le transport de gaz sous pression.

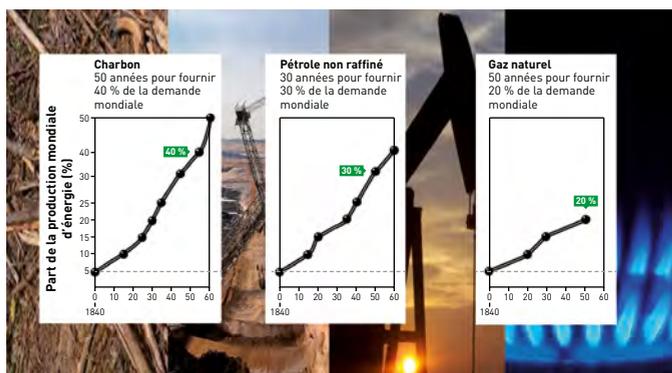


Figure 11

Évolution des proportions de charbon, de pétrole et de gaz naturel utilisé pour la production mondiale d'énergie.

Source : Smil V., *Energy Transitions : Global and national perspectives*.

faut de plus en plus de temps pour les développer.

En effet, le développement d'une technologie, peut prendre énormément de temps. Entre le moment où une technologie commence à apparaître et le moment où elle se développe, il peut se passer des années et des dizaines d'années, voire même beaucoup plus.

Un exemple avec l'éolien (**Figure 12**) : en 1888 dans l'Ohio (États-Unis), Charles Brush développe une éolienne de 16 kW ayant un diamètre de 17 m⁴⁴. C'est la première à alimenter directement des foyers. Un an plus tôt en Écosse, une éolienne est utilisée pour charger une batterie. Le premier modèle de 1 MW date de 1941. Elle casse après 1 100 h de production, les matériaux de l'époque n'étant pas assez résistants. Le développement de l'éolien retrouve du souffle grâce à la NASA, qui développe son premier modèle de 100 kW en 1975⁴⁵. En 2021, Vesta détient le record de l'éolienne la plus puissante avec un modèle d'une puissance de 15 MW et dont le rotor a un diamètre de 236 mètres. Pour rappel, la Tour Eiffel mesure 324 mètres de haut.

Le nucléaire a eu, lui, un développement un peu plus rapide (**Figure 13**). Et d'ailleurs, c'est la source d'énergie qui s'est développée le

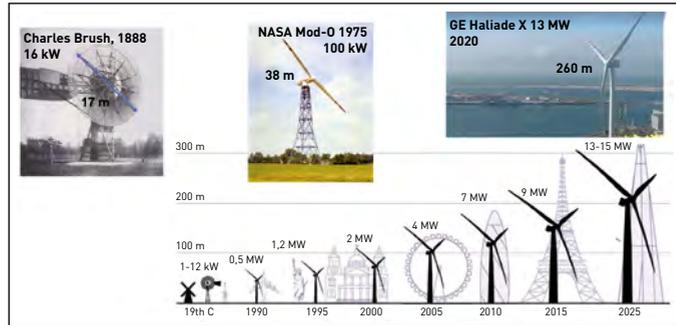


Figure 12

Diverses éoliennes produites au cours du temps, entre 1888 et 2020, et évolution des systèmes rotatifs à pâles, du moulin à l'éolienne.

Source : Bloomberg, New Energy Finance, 2017.

plus rapidement dans l'histoire. De 1965 à 1990, les taux de déploiement du nucléaire ont été plus rapides que n'importe quelle énergie dans le monde. Le premier réacteur produisant de l'électricité fut mis en service en 1951 à Argonne, aux États-Unis. Le déploiement se fait assez rapidement après. Et de 1970 jusqu'à 1985, on passe de quelques réacteurs dans le monde à 418 réacteurs sur une croissance qui est assez rapide. En France, 58 réacteurs sont mis en service entre 1978 et 2000. À cette époque, l'argument climatique ne rentre pas en compte, mais l'intensité carbone de l'électricité française est divisée par 5. Depuis les années 1990, le nombre de réacteurs a stagné suite à l'accident de Tchernobyl. Les dernières années montrent une légère hausse du nombre de réacteurs qui reste à confirmer sur le long terme. Les pays ayant construit des réacteurs dans les années 1970-1980 ont lancé des programmes de prolongement des durées

44. <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/wind-power%20web/fr/pictures/brush.htm>

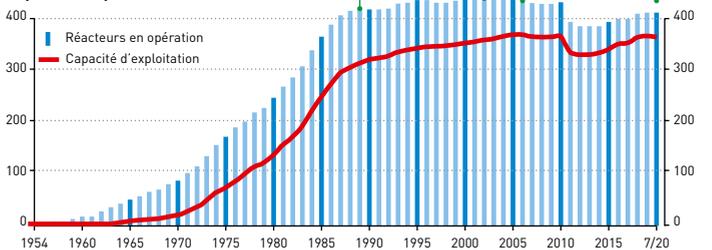
45. <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/98-nasa-mod-0-nasa-lockheed>



A

Réacteurs nucléaires et capacité de production mondiale

Capacité d'exploitation



B

Figure 13

Première centrale nucléaire à produire de l'électricité (A) et évolution de la capacité de production électrique à partir de nucléaire entre 1954 et 2020 (B).

d'opérations mais rares sont ceux ayant des programmes de construction ambitieux pour les prochaines années.

3 Vitesses des déploiements des technologies dans l'énergie

3.1. Les deux lois empiriques du déploiement des technologies

Une étude parue en 2009 dans *Nature*⁴⁶ propose une explication intéressant des dynamiques de déploiement des énergies. Cet article se veut une réponse aux narrations de type Green New Deal promettant une décarbonation du secteur de l'énergie dans une échelle de temps de dix-vingt ans. En étudiant l'historique de différentes technologies (Figure 14), ils proposent deux lois empiriques expliquant le déploiement :

- les nouvelles technologies connaissent une phase de croissance exponentielle pendant plusieurs décennies, caractérisée au xx^e siècle par une croissance de l'ordre d'un facteur dix par décennie (ou 26 % par an). Cette phase se poursuit jusqu'à atteindre le seuil d'environ 1 % de la demande globale, à partir duquel la technologie en question devient largement disponible et déployable ;

- après cette phase, la croissance devient linéaire jusqu'à ce que cette technologie atteigne sa part finale du marché.

Peut-on accélérer les choses ? Pendant la première phase, le retour d'expérience est extrêmement important (« *C'est en faisant qu'on apprend* »), et cela demande du temps : le temps de concevoir, de développer, de tester et d'optimiser. De plus, en parallèle de cette évolution, l'outil de production (mécanique mais aussi humain) doit lui aussi être développé et à ce stade les investissements

46. <https://www.nature.com/articles/462568a>

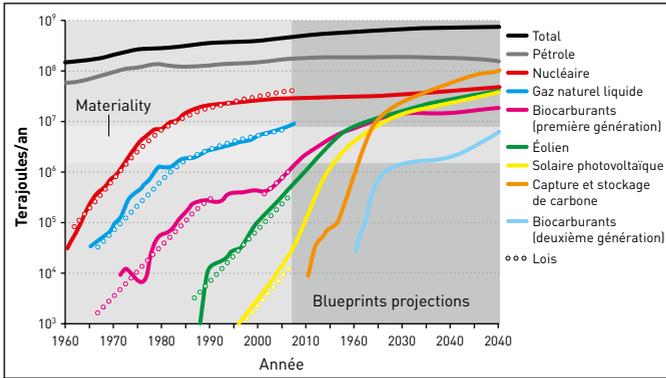


Figure 14

Évolution du déploiement des énergies et technologies entre 1960 et 2009, avec prévisions jusqu'en 2050.

Source : d'après Kramer GJ ; Haigh M. (2009). *Nature*, 462, 568.

ne sont pas nécessairement les éléments limitants. Autrement dit : l'argent ne peut pas résoudre tous les verrous scientifiques, technologiques et industriels. Pendant la deuxième phase, la vitesse de déploiement va être limitée par les durées de vie (souvent très longues) des centrales électriques et la volonté de ne pas sacrifier des outils de production non encore rentabilisés.

Tant que la nouvelle technologie ne représente que quelques pourcents de la demande, son déploiement ne concurrence pas vraiment les moyens de production existants. Ensuite, le déploiement de nouvelles sources nécessite de fermer des centrales existantes, ce qui est problématique pour des installations non amorties. Cette phase ne peut être accélérée qu'à la condition de liquider des installations non amorties. Une décision politique ayant des conséquences financières.

La **Figure 15** est une mise à jour des données de la Figure 14

avec les données pour les énergies fossiles depuis 1850, et en incluant les données jusqu'en 2019. Ce que l'on remarque c'est que le nucléaire est en effet la technologie avec le taux de déploiement historique le plus rapide. Les biocarburants (de première génération) ont connu au début des années

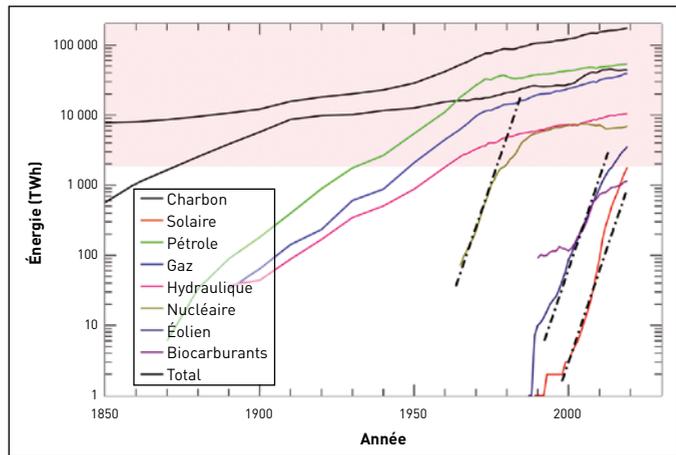


Figure 15

Mise à jour des données de déploiement des énergies et de leurs technologies associées entre 1850 et 2019.

2000 une progression fulgurante avant d'atteindre un plateau assez rapidement. La Figure 15 montre également que les technologies introduites après les années 1950 ont connu des déploiements plus rapides que les fossiles. On remarque également que l'éolien semble montrer un léger ralentissement alors que le photovoltaïque est toujours sur une progression rapide. Il est trop tôt pour tirer des conclusions mais dans un contexte d'urgence climatique, un déploiement rapide devra être maintenu pendant une longue période.

Si on regarde un peu plus en détails les taux de déploiement de l'éolien et du photovoltaïque pour quelques pays, on remarque que les vitesses de déploiement ont assez fortement ralenti dans plusieurs pays développés (Figure 16). Si on considère le cas de l'Allemagne par exemple, après une phase de forte croissance, l'éolien et le photovoltaïque ont connu un fort ralentissement qui pour le photovoltaïque depuis 2010 est très marqué. S'il est difficile d'expliquer de façon

unique les observations dans différents pays, il est important de noter que les taux de déploiement dans la majorité des pays vont devoir fortement ré-augmenter pour tenir les objectifs climatiques.

3.2. Perspectives de décarbonation de l'énergie

Pour illustrer les besoins en termes de vitesse de déploiement, on peut procéder à l'analyse de la promesse de Joe Biden de décarboner la production électrique aux États-Unis d'ici 2035⁴⁷. En 2020, l'électricité provenait majoritairement du gaz naturel (40 %) et du charbon (20 %), donc des combustibles fossiles⁴⁸. Le nucléaire et les renouvelables contribuaient chacun à hauteur de 20 % de la production. Le terme renouvelable inclut l'éolien (8 %), le photovoltaïque (2,2 %), l'hydraulique (7 %), la biomasse (1,4 %) et la géothermie (0,4 %). Dans un rapport récent, des chercheurs du Lawrence Berkeley National Lab étudient en détail l'évolution de la production électrique sur la période 2005-2020⁴⁹. Ce qui permet de mettre les déclarations récentes en perspective (Figure 17).

Sur cette période, on constate deux évolutions majeures. Tout d'abord, une transition

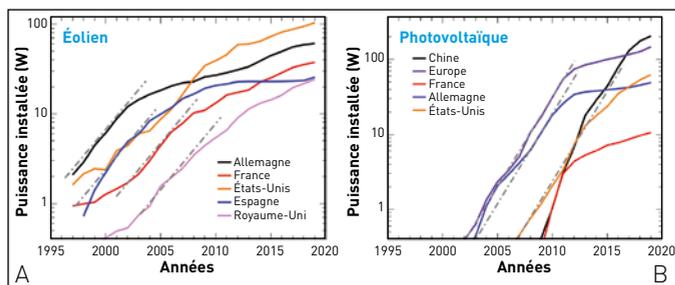


Figure 16

Taux de déploiement de l'éolien (A) et du photovoltaïque (B) entre 1995 et 2019 dans différents pays.

47. <https://www.forbes.com/sites/melissaholzberg/2021/05/06/biden-wants-clean-electricity-by-2035-a-pandemic-driven-fall-in-solar-jobs-complicates-that/>

48. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>

49. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/halfway_to_zero_report.pdf

du charbon vers le gaz naturel, soutenue par le gaz de schiste peu cher. La part du charbon a ainsi été divisée par 2,6 pendant que celle du gaz doublait. Ensuite, la part des renouvelables a été multipliée par 2,3. Le nucléaire est, lui, resté stable. La part d'électricité bas carbone est donc passée en quinze ans de 28 % à 40 % dans un contexte de consommation stable. Dans les prochaines années, la production nucléaire est vouée, au mieux, à rester stable. Deux réacteurs sont actuellement en construction dans la centrale de Vogtle en Géorgie et le réacteur numéro 2 de la centrale d'Indian Point, dans l'État de New York, vient d'être définitivement arrêté.

Les espoirs de décarboner la production électrique reposent donc sur les renouvelables, et notamment le solaire et l'éolien. Pour respecter l'objectif de 80 % de bas carbone en 2030, il faut quasiment tripler

la capacité de production renouvelable en neuf ans. Cela correspond à installer l'équivalent d'un tiers de la production électrique française chaque année, en supposant que la consommation reste constante. Un défi de taille. La **Figure 17** montre une extrapolation prenant en compte les vitesses de déploiement actuelles pour les renouvelables et les prolongeant jusqu'en 2035. On voit qu'en continuant les courbes, on arrive tout juste à atteindre l'objectif fixé. Ce petit exercice ne prend pas en compte les besoins d'infrastructure comme le renforcement de la grille électrique ou le développement de capacités de stockage permettant de compenser l'intermittence des énergies renouvelables.

Mais décarboner la production électrique signifie également de fermer des capacités de production carbonée. En 2018, on comptait 400 centrales à charbon et

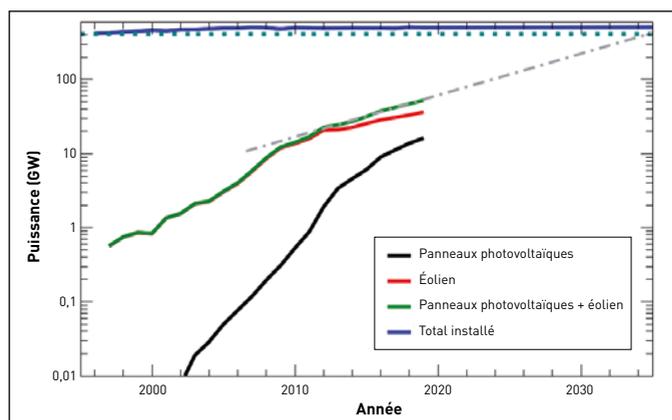


Figure 17

Simulation de la puissance électrique fournie par les différentes sources d'énergie renouvelable entre 1990 et 2035.

1 800 centrales à gaz aux États-Unis, des centrales qui devront fermer. L'âge de ces centrales américaines est plutôt propice à une transition rapide d'ici 2035⁵⁰. Seulement 15 % des centrales seraient forcées de fermer avant l'âge moyen de mise à l'arrêt pour des centrales thermiques (non nucléaires). Cela nécessite tout de même de gérer la reconversion des employés, les nouvelles capacités de production étant différentes et pas forcément installées au même endroit. Cet aspect social de la transition énergétique est d'ailleurs assez rarement évoqué. La même étude montre justement que 25 % des employés des centrales thermiques existantes pourraient se retrouver sans emploi plus rapidement que prévu, ce qui demande une action politique forte pour la reconversion du personnel (Figure 18).

50. <https://science.sciencemag.org/content/370/6521/1171/tab-figures-data>

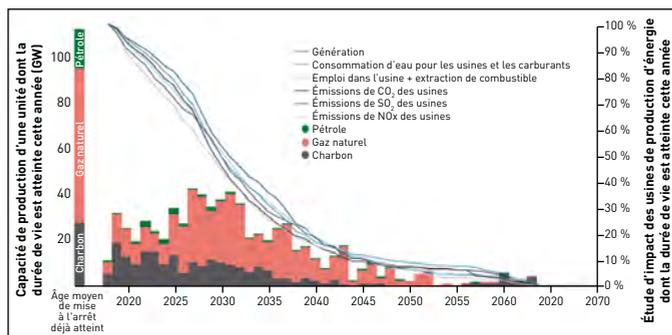


Figure 18

Prévision des fermetures des unités de production d'énergie arrivant à leur limite de durée de vie jusqu'en 2065 et le nombre de travailleurs impactés par ces fermetures.

Source : Grubert E., *Science*, 2020.

3.3. Transitions nationales

Le lecteur averti pourrait objecter que si à l'échelle mondiale l'infrastructure énergétique change très lentement, il y a eu des transitions rapides à l'échelle nationale. La France est évidemment un exemple qui vient immédiatement en tête, mais il y en a eu d'autres. Pour étudier le cas de différents pays, il est utile d'utiliser une représentation de type Fisher-Pry (Figure 19) utilisée pour les modèles de diffusion des innovations⁵¹.

Commençons par étudier le cas des Pays Bas (Figure 19) sur la période 1950-2020. En 1950, les Pays Bas sont largement dépendants du charbon, qui fournit 83 % de l'énergie primaire, et un peu du pétrole. En 1959, le superchamp géant de gaz naturel de Groningen est découvert et commence à produire du gaz à partir de 1963. La capacité de ce champ était estimée à 2 800 milliards de m³. Cette même année, le charbon représentait 55 % de l'énergie primaire, le pétrole 43 % et le gaz moins de 2 %. En 1965, le gaz représentait 5 % de l'énergie primaire et atteindra 46 % à peine dix ans plus tard en 1975. Une transformation radicale du bouquet énergétique en un temps très faible. Il faut cependant garder en tête que les Pays Bas

51. Le modèle de diffusion des innovations, mis en place par Everett Rogers en 1962, vise à associer les différents groupes de clients correspondants aux différentes phases d'adoption d'une nouveauté. L'innovation elle-même est achevée et il s'agit d'expliquer comment elle se diffuse auprès des utilisateurs

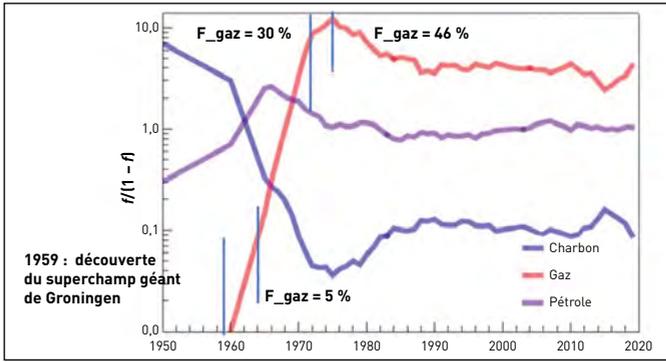


Figure 19

Évolution des proportions des différentes sources d'énergie fossile dans l'énergie primaire des Pays Bas entre 1950 et 2019. Les données sont montrées sur une échelle particulière : fraction dans le mix divisée par 1 moins la fraction. Cette façon de montrer les données permet de mieux mettre en évidence les tendances.

Source : Smil V.

sont un pays assez petit avec environ 17 millions d'habitants en 2019, et que cette transition s'est faite dans un contexte de hausse de la consommation. Néanmoins, le pays a transitionné de façon rapide du charbon au gaz naturel.

La France a connu une évolution rapide de son bouquet énergétique dans les années 1970-1990 avec le plan Messmer⁵² lancé en 1974, avec 14 TWh de production nucléaire. Avec la construction de 58 réacteurs, la France a atteint 415 TWh à la fin des années 1990. La part du nucléaire dans la production électrique a atteint quasiment

80 %, pour redescendre un peu ces dernières années. Il faut cependant remarquer que là encore on est face à un empilement plus qu'à une transition. Si on regarde la **Figure 20**, on constate en effet que l'émergence du nucléaire a suivi la hausse de la consommation d'énergie primaire. La consommation de charbon a certes baissé un peu en parallèle, mais elle était déjà très faible. Le pétrole est resté à peu près stable alors que la consommation de gaz a augmenté. Cependant, l'exemple français montre qu'il est possible de construire rapidement des centrales nucléaires même si les déboires récents peuvent laisser penser le contraire.

On parle souvent de l'Allemagne quand on parle d'énergie ; il est aussi intéressant de regarder du côté de l'Angleterre (**Figure 21**). Jusqu'au milieu des années 1990, la production

52. Le plan Messmer est un programme proposé par Pierre Messmer en 1974. Il s'agit d'un plan énergétique visant à limiter la dépendance de la France au pétrole par la construction d'un parc nucléaire et une série de mesures de sobriété énergétique.

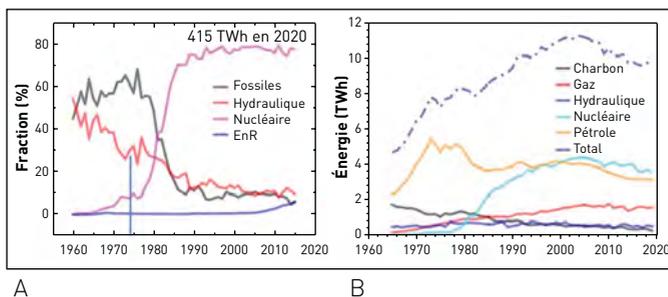


Figure 20

Part de la production d'électricité (A) ou d'énergie primaire (B) dans la production française entre 1960 et 2019.

électrique anglaise était majoritairement à base de charbon. Une première baisse de la part du charbon s'est produite entre 1990 et 2000 avec la construction de centrales à gaz. Le développement du gaz a été permis par le développement de l'extraction des champs *offshore* en mer du Nord. La consommation de gaz a ainsi été multipliée par neuf entre 1970 et 2000.

À partir de 2012, l'Angleterre a diminué rapidement sa consommation de charbon (qui tombe à zéro en 2019) avec en parallèle un fort développement des renouvelables et un maintien d'une forte portion de génération au gaz. Les centrales à gaz sont en effet idéales pour pallier l'intermittence des renouvelables car elles peuvent démarrer très rapidement. Il faut dans le meilleur des cas seulement quelques minutes pour atteindre la pleine capacité⁵³. Les années à venir permettront de voir comment l'Angleterre réussira à diminuer sa dépendance au gaz, une nécessité pour arriver à une électricité bas carbone. Il est important de noter que l'Angleterre est un cas relativement unique car sa consommation d'électricité baisse régulièrement depuis le milieu des années 2000⁵⁴.

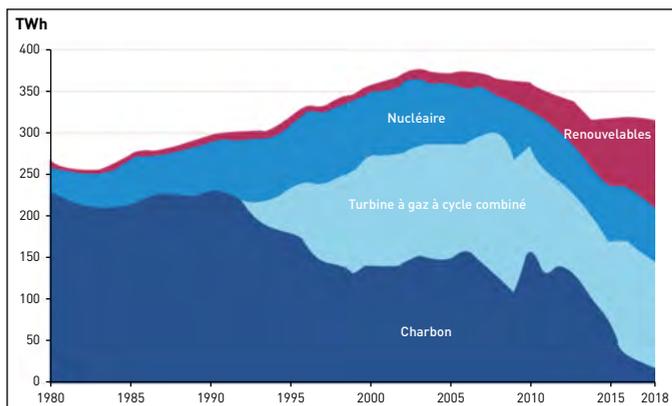


Figure 21

Origines de la production d'électricité au Royaume-Uni entre 1980 et 2018.

Source : Aurora Energy Research, BEIS.

53. <https://www.ge.com/power/transform/article.transform.articles.2017.jun.load-following-power-plant>

54. <https://www.carbonbrief.org/analysis-uk-low-carbon-electricity-generation-stalls-in-2019>

Si maintenant, on compare les différents pays sur leurs émissions de CO₂ dues à la production d'énergie, on remarque des résultats assez contrastés avec des politiques assez différentes sur la période 2005-2018 (Figure 22). L'Allemagne et les États-Unis sont deux cas intéressants. L'Allemagne a en effet une politique ambitieuse de transition énergétique, Energiewende⁵⁵, qui repose sur un fort développement des renouvelables et un arrêt du nucléaire. Les États-Unis ont connu l'explosion de la production de gaz et de pétroles dit de schiste⁵⁶. Ainsi, si en 2008 le gaz de schiste comptait pour environ 16 % de la production américaine, cette part est passée à 70 % en 2018. Ce gaz peu cher et abondant a rendu le charbon moins attractif d'un point de vue économique et a poussé à la fermeture d'anciennes centrales à charbon et au développement de centrales à gaz. Sur la période 2005-2018 l'Allemagne a vu ses émissions pour le secteur de l'énergie baisser de 15 % avec sa politique volontariste, alors que les États-Unis, en laissant le marché agir, ont connu une baisse de 13 %. L'Angleterre a connu la plus forte baisse avec 23 %, mais rappelons que cette baisse intervient dans un contexte de baisse de la consommation énergétique.

55. <https://www.usinenouvelle.com/article/l-energie-wende-ou-comment-l-alle-magne-compte-sortir-du-nucleaire-et-du-charbon>. N1045394

56. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=38372>

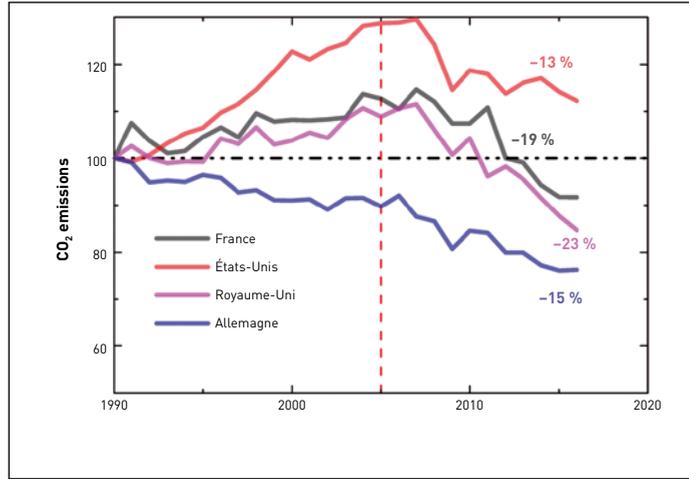


Figure 22

Variation des émissions de dioxyde de carbone entre 1990 et 2018 pour la France, les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Allemagne.

Source : OurWorldinData, 2020.

4 Nécessité de la transition énergétique et contraintes à pallier

4.1. Le changement : pourquoi ?

Pour aller un peu plus loin, il est intéressant de regarder quelles ont été dans le passé les motivations et raisons pour lesquelles de nouvelles sources d'énergie ont été adoptées. Le changement climatique et la finitude des ressources fossiles sont des motivations fortes pour la transition énergétique à venir, mais l'observation des tendances passées peut permettre d'identifier des facteurs la facilitant. Dans un ouvrage dédié⁵⁷, l'économiste

57. https://www.lavoisier.fr/livre/environnement/heat-power-and-light-paperback/fouquet/descriptif_3598456

de l'énergie Roger Fouquet a étudié l'évolution énergétique de l'Angleterre depuis le Moyen Âge à différents niveaux (Figure 23). Il s'est intéressé non seulement aux transitions massives donc de production, du réseau de distribution, de la source d'énergie mais aussi du service. Il a notamment regardé le passage du cheval à la vapeur, ou de la cuisson au gaz à la cuisson électrique. Il a ainsi identifié que dans tous les cas les facteurs clés du

changement étaient l'accès à un meilleur service et le prix plus bas.

Concernant les raisons du changement, dans quasiment tous les cas, encore une fois, c'est soit un meilleur service soit un nouveau service, quelque chose qui n'existait pas avant. Ce qui est intéressant aussi, c'est qu'il remarque que toutes ces transitions sont toujours accompagnées d'une hausse de la consommation, aidée notamment par la baisse du prix. Et c'est quelque chose d'extrêmement important quand on parle de transition. Ce point, l'effet rebond⁵⁸, sera abordé par la suite.

Substitution (Original-New)	Service	Name of Changes	Probable Key Factors in Diffusion	Approx. Period (Innovation to Dominance)	Approx. Period (Diffusion to Dominance)
Residential Woodfuel-Coal	Heating	Supply Energy Service	D: Price of Energy C: Invention	1300-1800 (500 years)	1300-1800 (500 years)
Iron Woodfuel-Coal	Heating	Supply Energy Service	D: Price of Energy C: Invention C: Efficiency	1700-1790 (81 years)	1750-1790 (40 years)
Manufacturing Woodfuel-Coal	Heating	Supply Energy Service	D: Price of Energy C: Invention	1300-1700 (400 years)	1550-1700 (150 years)
Residential Coal-Gas	Heating	Supply Energy Service	D: Better Service C: Price of Energy	1880-1975 (95 years)	1920-1975 (55 years)
Ox-Horse	Power	Energy	D: Efficiency	600-1600 (700 years)	1070-1600 (530 years)
Animals-Mills	Power	Supply Energy Service	D: Different Service C: Econ. of scale	700-1350* (650 years)	1000-1350* (350 years)
Animals-Steam	Power	Supply Energy Service	D: Different Service C: Efficiency	1710-1920 (210 years)	1830-1920 (90 years)
Steam-Electricity	Power	Supply Energy Service	D: Better Service C: Econ. of scale	1821-1930 (110 years)	1920-1930 (10 years)
Horses-Railways	Land Transport	Supply Energy Service	D: Better Service C: Price of Service	1804-1860 (54 years)	1830-1860 (30 years)
Sail-Steam Ship	Sea Transport	Supply Energy Service	D: Better Service C: Efficiency	1815-1890 (75 years)	1830-1890 (60 years)
Railways-Combustion Engine	Land Transport	Supply Energy Service	D: Better Service C: Efficiency	1876-1930 (74 years)	1911-1930 (19 years)
Candles-Gas	Lighting	Supply Energy Service	D: Better Service C: Price of Energy C: Efficiency	1800-1850 (50 years)	1810-1850 (40 Years)
Candles-Kerosene	Lighting	Supply Energy Service	D: Price of Energy C: Discovery	1850-1900* (50 years)	1850-1900* (40 Years)
Gas-Electricity	Lighting	Supply Energy Service	D: Better Service C: Price of Energy C: Efficiency	1810-1935 (125 years)	1880-1935 (55 years)

Figure 23

Les intérêts du changement exprimés par R. Fouquet. Les transitions sont de trois natures : réseau de distribution, énergie, service. La transition s'est toujours accompagnée d'une hausse de la consommation.

Source : Fouquet R. (2010). *The Slow Search for Solutions : Lessons from Historical Energy Transitions by Sector and Service*.

4.2. Des paramètres restrictifs à l'expansion des énergies renouvelables

On vient de le voir, les transitions passées ont souvent été motivées par la possibilité d'accéder à un meilleur service. Mais la transition à venir diffère des transitions passées par le fait qu'elle semble se diriger vers des énergies moins denses et moins contrôlables que par le passé. Pour la première fois de son histoire, l'humanité pourrait ainsi évoluer vers une densité de puissance plus faible. La transition énergétique n'est donc pas motivée par la possibilité d'une amélioration de notre accès à l'énergie

58. L'effet rebond a été mis en évidence par Jevons au XIX^e siècle. Il s'agit du phénomène par lequel les économies d'énergie prévues par l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou complètement compensées à la suite d'une adaptation du comportement de la société, une augmentation de la consommation.

mais par des contraintes climatiques, et à terme de finitude des ressources fossiles, même si celles-ci (notamment pour le charbon⁵⁹) sont encore très abondantes. Au contraire, l'intermittence par exemple pose des problèmes que nos systèmes énergétiques avaient quasiment éliminés. Regardons en détails certains de ces facteurs.

Smil a proposé dans un ouvrage dédié le concept de densité de puissance⁶⁰ (Figure 24), qui est définie comme la puissance produite (ou consommée) par unité de surface horizontale requise pour l'infrastructure de production (ou consommation). Ce paramètre est estimé à partir des installations existantes et prend en compte le facteur de charge⁶¹. Pour illustrer ce concept et fixer les ordres de grandeur, on peut regarder le cas de l'éolien. Les éoliennes ont des diamètres de plus en plus grands, dépassant maintenant 230 mètres pour les plus grandes turbines *off-shore* (à titre de comparaison, un Airbus A380 a une envergure d'environ 80 mètres). Il est nécessaire d'espacer les éoliennes avec une distance entre trois et sept fois le

59. <https://www.revue-internationale.com/2021/05/les-charbons-sont-eternels/>

60. <https://mitpress.mit.edu/books/power-density#:~:text=Smil%20provides%20the%20first%20systematic,and%20all%20common%20energy%20uses.>

61. Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale, puissance maximale pouvant être fournie, sur cette même période.

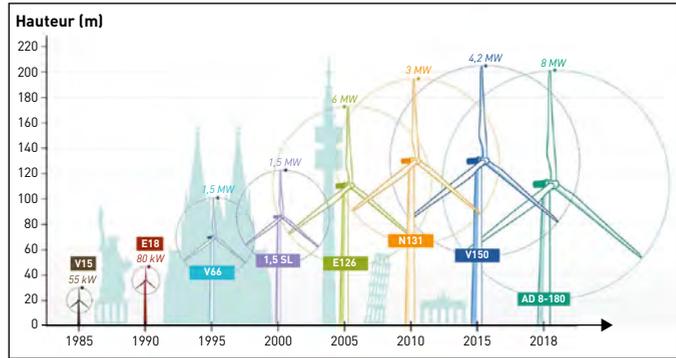


Figure 24

Amélioration de la densité de puissance des éoliennes au cours du temps, entre 1995 et 2018.

Source : Smil V. *Power density : key to understanding Energy sources and uses*, 2016.

diamètre selon l'orientation. On arrive alors à une densité de puissance de l'ordre de 1 à 5 watts par m^2 . Évidemment, l'espace entre deux éoliennes peut être utilisé pour différents usages, mais une certaine superficie doit être artificialisée et est couverte d'éoliennes – ce qui a un impact sur la biodiversité.

Et pour mettre cela en perspective, on peut comparer les densités de puissance de différents moyens de production (Figure 25). Une méta-analyse parue en 2018 fait un bilan pour neuf sources d'énergie⁶². On note que les énergies fossiles et le nucléaire présentent des densités de puissance supérieures à $100 W/m^2$, avec jusqu'à $1\ 000 W/m^2$ pour le gaz. En comparaison, le photovoltaïque est aux alentours de $10 W/m^2$ quand la biomasse est aux alentours de $0,1 W/m^2$ – trois ordres de grandeur

62. <https://drpaulbehrens.com/wp-content/uploads/2018/09/1-s2.0-S0301421518305512-main.pdf>

plus faibles que les énergies fossiles. Cela n'est pas totalement surprenant si on se souvient que les énergies fossiles sont de la biomasse qui a été compressée et concentrée pendant des dizaines de

millions d'années. La **Figure 25** illustre bien le fait que les scénarios de décarbonation de l'énergie sont principalement basés sur des sources beaucoup plus diffuses que l'infrastructure énergétique actuelle. Le nucléaire est une exception mais peu de scénarios considèrent le nucléaire comme la source principale d'énergie dans le futur.

La densité de puissance est importante car elle impose des contraintes spatiales qui peuvent se révéler compliquées. La **Figure 26A**, élaborée par David MacKay⁶³ dans son livre *Without the hot air*, illustre ce point en comparant les densités de puissance en production pour différentes

63. David MacKay était un professeur de philosophie naturelle du département de physique de l'Université de Cambridge et conseiller scientifique en chef du département de l'énergie et du changement climatique britannique.

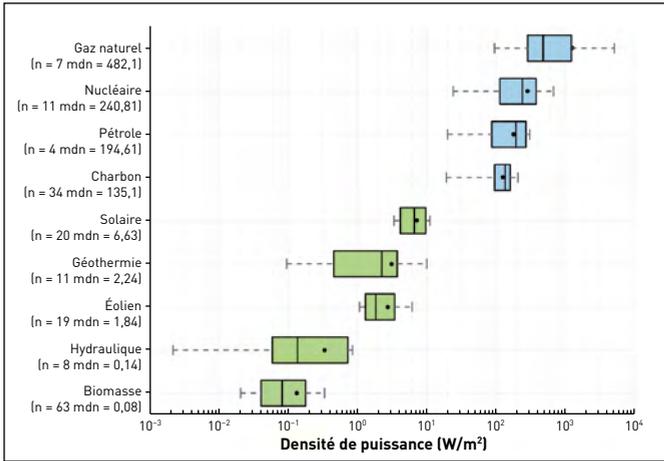


Figure 25

Densités de puissance des différents types de production d'énergie. Source : J.Van Zalk, *Energy Policy*, 123 (2018).

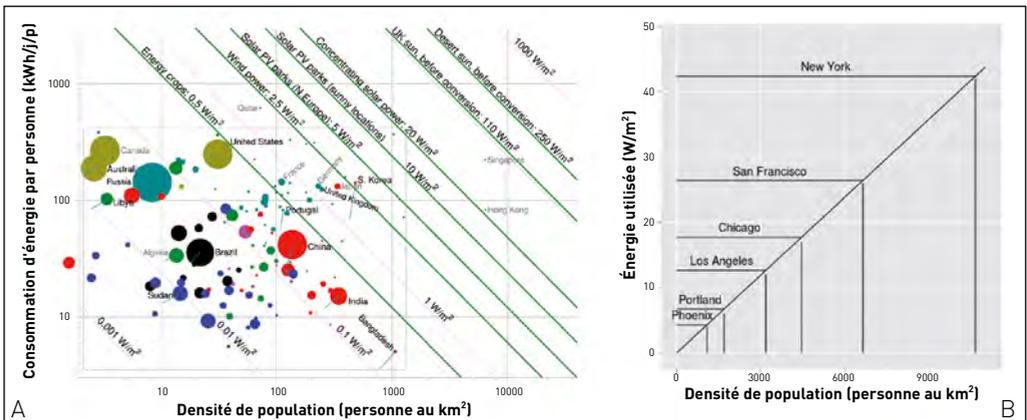


Figure 26

Mise en exergue des contraintes spatiales dans la production d'énergie. A) Évolution de la consommation énergétique par personne en fonction de la densité de population et comparaison à la densité énergétique des unités de production ; B) Évolution de la densité d'énergie utilisée en fonction de la densité de population.

Source : McKay D., *Without the hot air*.

technologies avec les densités de consommations de différents pays. En fait, on voit que pour certains pays, il faudrait occuper quasiment toute la surface avec des éoliennes par exemple pour produire l'énergie nécessaire. C'est un exemple extrême et aucun pays ne compte sur une seule technologie, mais cela fixe la problématique. L'aspect densité de puissance est d'autant plus important que la population mondiale a tendance à se concentrer dans des villes, villes dont la densité de puissance dépend au premier ordre de la densité de population. La **Figure 26B** montre pour les États-Unis la relation entre la densité de puissance et la densité de population avec une corrélation quasiment parfaite entre les deux. Depuis 2008, plus de 50 % de la population mondiale vit dans des zones urbaines⁶⁴ ; cette fraction est en hausse constante (54 % en 2017).

À titre de comparaison, du point de vue consommation, la ville de Paris présente en 2009 une densité de puissance d'environ 45 W/m²⁶⁵. Celle de l'ensemble de la région Île-de-France est d'environ 1 W/m², et pour l'agglomération lyonnaise⁶⁶, on trouve une valeur de 7 W/m². Le rapport entre les densités de puissance de consommation et de production donne une idée de

la surface nécessaire pour fournir l'énergie requise. En d'autres termes, pour subvenir aux besoins de Paris avec des panneaux solaires, il faut couvrir une surface entre 4,5 et 45 fois plus grande que celle de la ville elle-même ! Pour l'agglomération lyonnaise, une surface sept fois plus grande que celle de la région doit être recouverte d'éoliennes pour fournir suffisamment d'énergie !

Un autre point important à considérer est que les énergies renouvelables sont dépendantes de la géographie, de l'ensoleillement, des vents dominants. Si on considère le taux de retour énergétique⁶⁷ du solaire photovoltaïque, il dépend fortement de l'irradiance⁶⁸ locale (**Figure 27**). Le photovoltaïque n'est donc pas pertinent à toutes les latitudes, ce qui est différent par exemple des énergies fossiles, qui produisent partout de la même façon – l'énergie produite dépend de la qualité du combustible, mais ce dernier peut être exporté ou importé.

Les faibles densités de puissance vont avoir des implications sur les quantités de matériaux nécessaires pour construire l'infrastructure, et les unités de production. La **Figure 28** illustre les quantités de béton et d'acier nécessaires pour différents types

64. <https://ourworldindata.org/urbanization>

65. <https://api-site-cdn.paris.fr/images/71122>

66. <https://www.lesechos.fr/2017/03/bilan-energetique-du-grand-lyon-33-terawattheures-pour-3-milliards-deuros-168574>

67. Le taux de retour énergétique correspond au rapport entre l'énergie produite et l'énergie consommée pour la produire.

68. L'irradiance désigne la quantité d'énergie solaire atteignant chaque seconde une surface de 1 m² à l'extérieur de l'atmosphère terrestre.

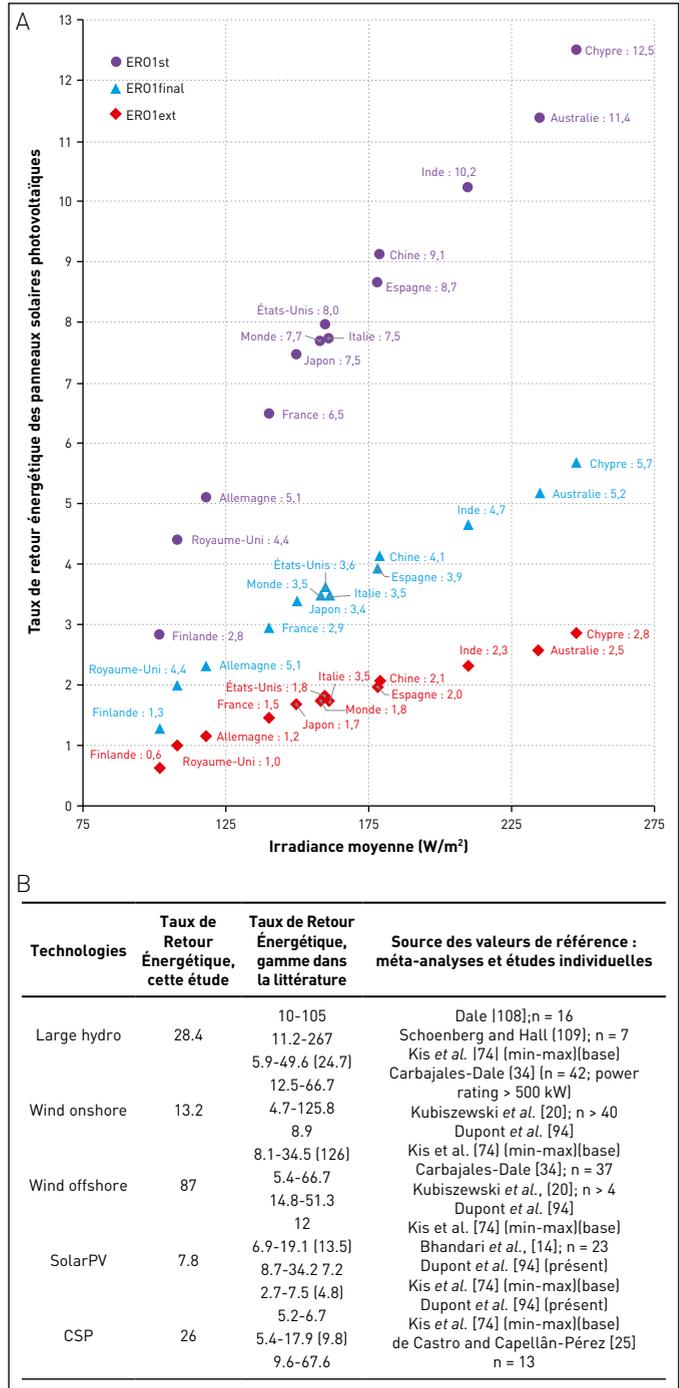


Figure 27

Taux de retour énergétique des panneaux solaires photovoltaïques en fonction de l'irradiance moyenne.

Source : C. De Castro, I. Capellan Perez, *Energies* (2020).

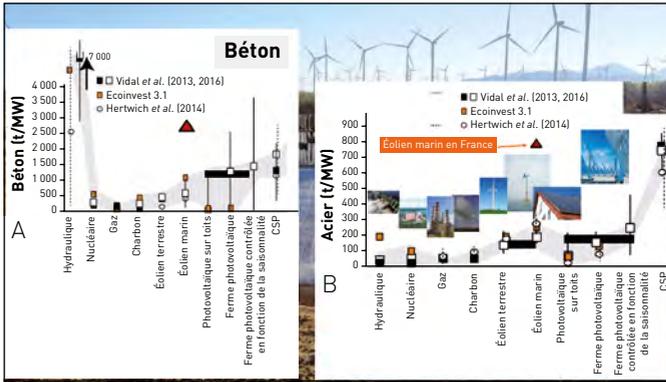


Figure 28

Consommation de béton (A) et d'acier (B) pour les différentes sources d'énergie, tonnes de matériaux consommés par MW d'énergie produite.

Source : Goffé B., 2017

de production d'électricité⁶⁹. Ainsi une centrale à charbon nécessite environ 50 tonnes d'acier par MW produit, quand l'éolien onshore en requiert 150 t/MW et l'éolien offshore deux fois plus (300 t/MW). Le nucléaire, de par sa forte densité de puissance, est beaucoup plus proche des énergies fossiles en termes de matériaux nécessaires.

Cela ne veut donc pas dire qu'il ne faut pas utiliser d'énergies renouvelables, mais il faut garder à l'esprit que la disponibilité des matériaux va être un enjeu important. Dans un rapport récent⁷⁰, l'Agence internationale de l'énergie met en évidence le besoin critique d'investissement dans les capacités d'extraction de minerais pour pouvoir

satisfaire à la forte croissance de la demande qu'imposera la décarbonation de l'infrastructure énergétique. L'électrification des usages (la mobilité par exemple) va également nécessiter des quantités importantes de différents métaux⁷¹. À terme, les capacités de recyclage vont devoir se développer pour diminuer les besoins d'extraction.

La question des ressources minérales et métalliques est également une question énergétique. La concentration des minerais, que ce soit en cuivre, en fer ou autre, a tendance à diminuer – les gisements les plus riches ont été exploités en premier. La quantité d'énergie nécessaire pour produire une quantité de métal donnée augmente avec la diminution de la concentration du minerai. La **Figure 29A** illustre cette situation avec la

69. <https://www.decitre.fr/livres/matieres-premieres-et-energie-9781784054038.html>

70. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621019168>

production de cuivre au Chili sur la période 1998-2017. Les barres bleues représentent la quantité de cuivre produite, qui est relativement constante, les barres rouges la consommation énergétique associée à cette production. Cette dernière augmente

fortement. La même tendance est observée pour différents métaux (*Figure 29B*).

4.3. L'effet rebond : limite à l'efficacité énergétique

Il existe également des facteurs non techniques qui doivent être pris en compte dans les discussions sur l'énergie car ils peuvent annuler certains des efforts déployés pour diminuer la consommation énergétique. Ainsi, il a été prouvé de longue date que l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés n'amène pas la baisse de consommation attendue en théorie. Ainsi, acheter une voiture consommant 20 % moins de carburant ne diminuera pas vos dépenses en carburant de 20 %. Pourquoi ? Car le coût du transport diminuant, la tentation de voyager plus sera plus grande. Ce concept a été mentionné pour la première fois par William Jevons et porte le nom de paradoxe de Jevons (ou effet rebond, (*Figure 30*)). Jevons, un économiste, s'est posé la question de savoir si le fait que l'efficacité des machines à vapeur augmentait allait diminuer les quantités de charbon utilisées. Mais en fait, non, c'est exactement le contraire. Plus les machines ont été efficaces, plus elles se sont déployées, plus la consommation de charbon a augmenté. L'augmentation de l'efficacité énergétique pousse paradoxalement à une augmentation de la quantité d'énergie totale utilisée.

Il existe énormément d'exemples de cet effet. L'automobile est un exemple très parlant. L'efficacité du moteur diesel a augmenté de

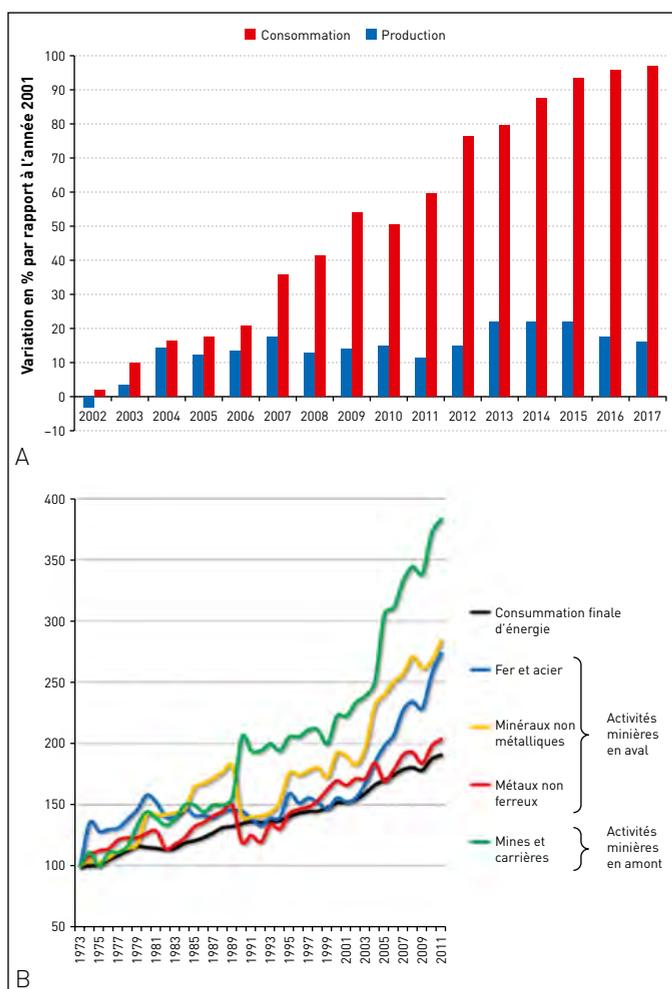


Figure 29

Consommation et production de cuivre entre 2002 et 2017(A), d'autres minerais entre 1973 et 2011 (B).

Sources : Hagens N., *Ecological Economics*, 2020 ; Fizaine F., Court V., *Ecological Economics*, 110 (2015).



Figure 30

William Stanley Jevons : « It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth ». William Stanley Jevons, *The Coal Question ; An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, 1865 « C'est une confusion totale que de supposer que l'utilisation économique de carburants est équivalente à une diminution de la consommation. C'est tout le contraire en vérité ».

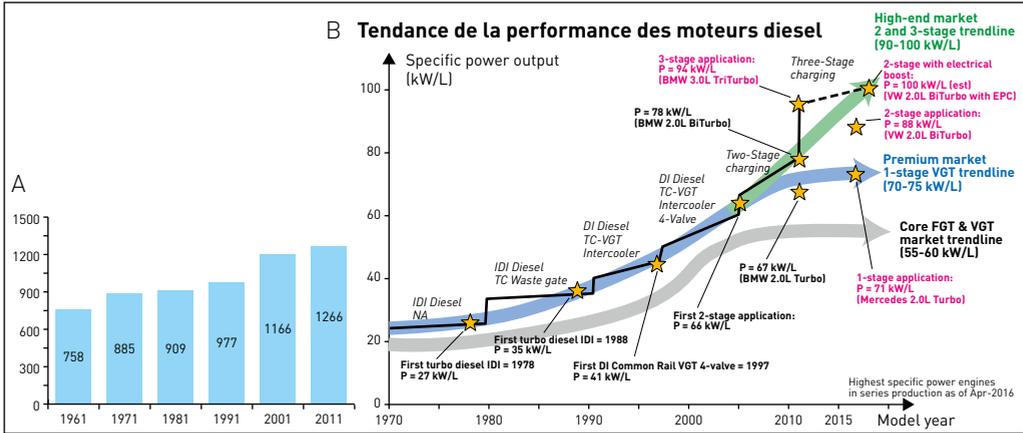


Figure 31

Évolution de la performance des moteurs diesel entre 1970 et 2019 (A) et du poids moyen des voitures entre 1961 et 2011 (B).

façon impressionnante depuis les années 1970. La **Figure 31B** montre l'évolution de la puissance spécifique (la puissance produite pour un litre de carburant), qui a augmenté d'un facteur 3 ou 4 depuis 1970. Les moteurs deviennent de plus en plus efficaces parce qu'on optimise le cycle de combustion ou l'injection. Mais en parallèle, le poids des voitures augmente. L'amélioration de l'efficacité des moteurs est gommée par l'évolution du poids et du niveau de confort des voitures. L'aviation est un autre exemple marquant. Entre 1960 et 2015, la consommation par passager-

kilomètre a été divisée par 11, mais en parallèle le nombre de passager-kilomètres effectués a été multiplié par... 65 !

Un autre aspect de la transition énergétique consiste en la décarbonation des secteurs industriels sur lesquels repose notre infrastructure et qui sont difficiles à décarboner. Ainsi, en 2020, la production mondiale d'acier a été de quasiment 1,9 milliard de tonnes (**Figure 32A**). 56 % de la production étant située en Chine. Si la production a baissé de 0,6 % par rapport à 2019, cette baisse est largement conjoncturelle et causée par la crise de la Covid-19

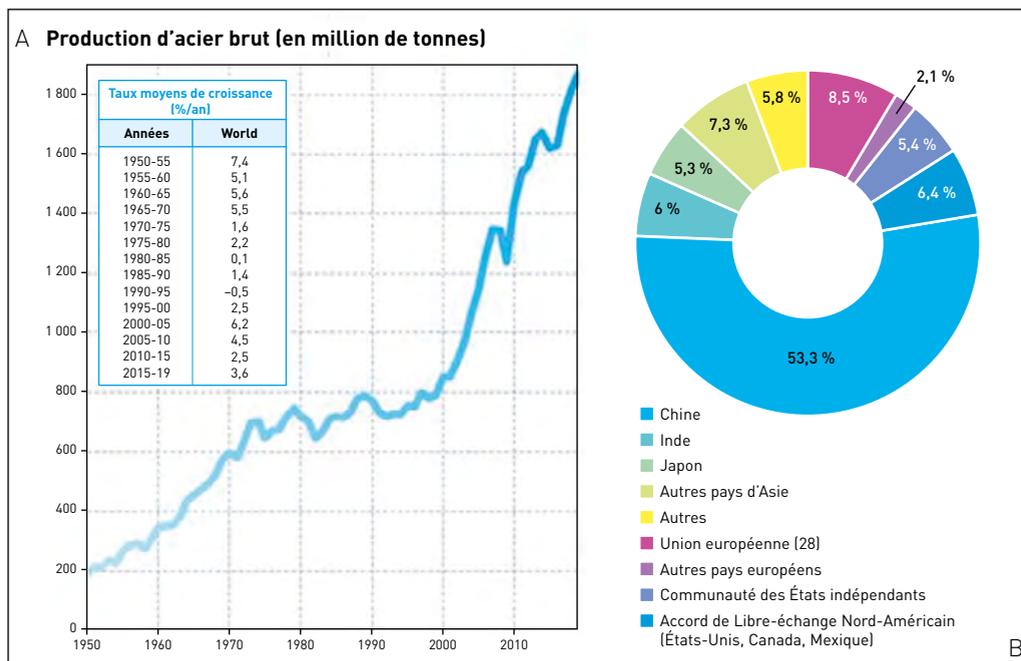


Figure 32

Évolution de la production d'acier brut entre 1950 et 2010 (A) et répartition de la production d'acier brut dans le monde (B). 50 % des émissions de CO₂ de l'industrie sont émises pour la production de l'acier, du ciment et de l'aluminium.

Source : Allwood et coll., 2018.

– la production a d'ailleurs augmenté en Chine. La production mondiale a été multipliée par trente entre 1900 et 2000, dépassant le milliard de tonnes en 2004 pour quasiment doubler entre 2004 et 2019⁷². La production d'acier est responsable d'environ 7 % des émissions mondiales du domaine de l'énergie⁷³. Il compte pour environ 9 % du total des émissions mondiales entre 1900 et 2015⁷⁴. Si de forts progrès

ont été réalisés – les émissions de CO₂ par tonne d'acier ont diminué d'un facteur 2,8 entre 1970 et 2019 –, décarboner la production est un défi majeur dans la lutte contre le changement climatique. En 2019, l'acier représentait 8 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, devançant le plastique, le ciment et le papier dans les matériaux les plus énergivores. Si des méthodes de production bas carbone existent, le volume produit annuellement est tel que le remplacement des hauts fourneaux actuels prendra du temps. On pourrait avoir le même raisonnement sur la production de ciment, qui est

72. <https://usbeketrica.com/fr/article/l-age-du-fer-n-est-pas-pres-de-s-arreter>

73. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

74. <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22245-6>

très émettrice de CO₂ et qui est également un matériau fondamental pour nos sociétés.

4.4. Réticences de la population et désinformation

Le dernier point à considérer est celui de l'acceptabilité des technologies et des moyens pour décarboner notre système énergétique. Une technologie peut être idéale sur papier, si elle rencontre une trop forte opposition, elle ne permettra pas de répondre aux défis climatiques. L'exemple le plus représentatif est certainement l'énergie nucléaire. La **Figure 33** montre un sondage réalisé annuellement sur la période 2014-2017 demandant aux sondés si selon eux le nucléaire contribue à l'effet de serre. Environ 70 % considèrent qu'il contribue « un peu » ou « beaucoup », alors que le nucléaire est la source d'énergie émettant le moins de CO₂⁷⁵. Et cette proportion semble augmenter avec le temps. Il y a clairement un

problème d'image et de communication sur ce qu'est vraiment cette énergie et ce qu'elle représente. Ces sondages rendraient tout gouvernement plutôt prudent vis-à-vis du développement d'un programme nucléaire...

Les raisons pour cette opposition sont assez complexes. Par exemple, en France, on sait que la discussion sur le nucléaire très difficile. Le nucléaire est un sujet complexe, la radioactivité est un sujet abordé très tard dans la scolarité. Les unités utilisées sont difficiles à appréhender. C'est donc quelque chose qu'il est nécessaire de prendre en compte : c'est une technologie qui a peut-être beaucoup d'atouts mais qui se heurte au moins dans les pays occidentaux (ce n'est pas forcément vrai partout) à une très faible acceptabilité sociale.

Mais il n'y a pas que le nucléaire. Il y a aussi par exemple l'éolien. Les données de l'Allemagne montrent qu'en 2017, 2018, 2019, il y a eu une forte chute de la puissance éolienne ajoutée sur le réseau (**Figure 34**). Chute principalement causée par une

75. https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?conventionnel.htm

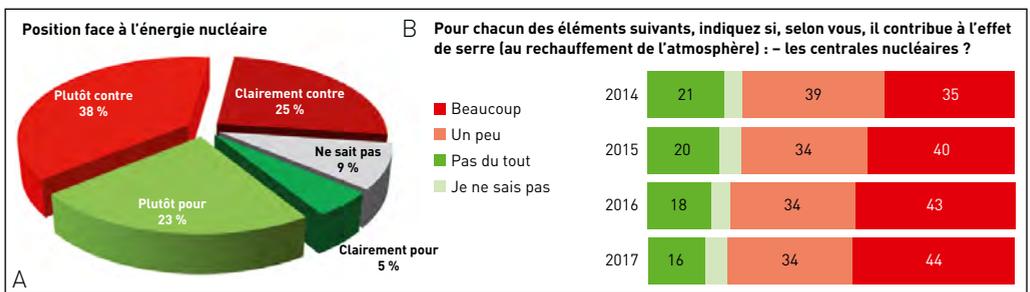


Figure 33

Position des populations française entre 2014 et 2017 (B) et suisse en 2011 (A) vis-à-vis du nucléaire.

opposition grandissante aux projets d'installations d'éoliennes. On trouve de plus en plus d'articles de presse relatant des mouvements citoyens d'opposition à l'implantation de fermes éoliennes ou solaires. Ces oppositions rendent les projets plus longs à réaliser (quand ils ne sont pas annulés), ce qui n'aide pas une transition déjà compliquée.

Il faut aussi prendre en compte le fait que la transition énergétique a un coût, porté en partie par l'utilisateur. L'Allemagne est

par exemple le pays d'Europe où l'électricité est la plus chère⁷⁶, ce qui constitue un autre mécanisme d'opposition. La Californie connaît le même problème.

Un autre sujet, un peu à l'opposé des arguments précédemment exposés, concerne le discours « solutionniste », qu'on peut voir se développer. La **Figure 35** montre un florilège de titres de presse présentant des technologies comme des solutions au changement climatique. Ce discours donne l'impression que toutes les technologies nécessaires existent ou pourront être développées, ce qui peut amenuiser la complexité de la situation. Si les technologies seront utiles, elles ne constituent qu'un des multiples leviers qui devront être actionnés. De plus, comme mentionné précédemment, sans contrôle, le déploiement de nouvelles technologies peut donner lieu à des effets rebonds, qui annuleraient les effets escomptés. Un autre problème est que souvent on voit des articles exagérant la portée d'une découverte ou d'une nouvelle technologie en la présentant comme à même de résoudre par elles-mêmes tous les problèmes. Des annonces de nouvelles batteries révolutionnaires, d'avancées décisives dans la fusion nucléaire ou dans l'hydrogène, apparaissent chaque semaine ou presque. Pourtant, souvent ces annonces retombent dans l'indifférence quelques années plus tard.

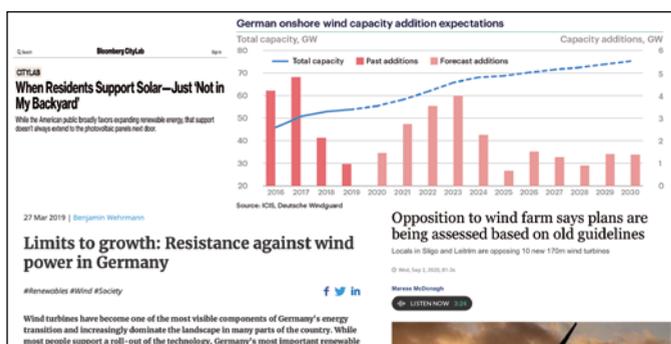


Figure 34

Résistance de la population allemande au développement de l'éolien sur son territoire ; titres d'articles de journaux et graphe de la capacité énergétique délivrée par les éoliennes en Allemagne entre 2016 et 2030.



Figure 35

Articles liés à la transition énergétique.

76. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics

Conclusion

Pour conclure, une citation de Bill Gates, résumant assez bien ce qui nous attend dans les trente ans à venir (*Figure 36*), et qui, comme nous l'avons vu, n'a pas encore vraiment commencé.

« *Mais ce que nous nous demandons de faire ici est un changement d'énergie – et cela inclut tous les transports, toute l'électricité, tous les usages ménagers et tous les usages industriels. Et ce sont tous des domaines énormes* ». Changer radicalement l'infrastructure énergétique pour limiter le changement climatique implique de tourner le dos aux combustibles (fossiles) qui nous ont permis de développer la société industrielle telle que nous la connaissons. Notre dépendance à ces combustibles fossiles n'a fait qu'augmenter au cours du temps, et ce qui est nécessaire de réaliser n'a pas de précédent dans l'histoire.



Figure 36

Bill Gates à propos de la transition énergétique : « *Mais ce que nous nous demandons de faire ici est un changement d'énergie – et cela inclut tous les transports, toute l'électricité, tous les usages ménagers et tous les usages industriels. Et ce sont tous des domaines d'usage énormes* ».