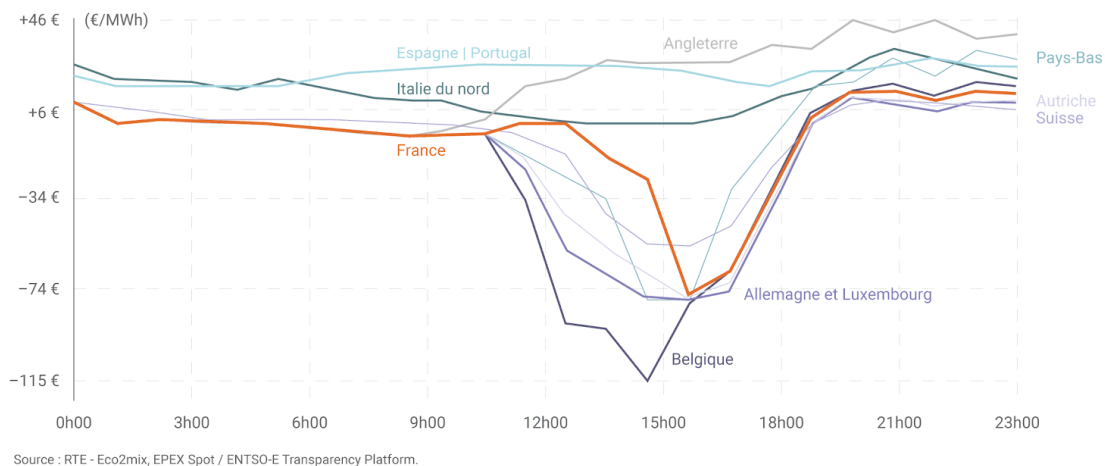


## En introduction

Quel est le coût de l'électricité ? Question à laquelle beaucoup adorent répondre avec un chiffre ; ce qui est complètement stupide si on ne regarde pas la myriade d'hypothèses qui vont avec. Vous avez sans doute déjà vu passer des tas de chiffrages différents qui racontent tous des tas de choses contradictoires avec des estimations pour les différentes sources d'électricité qui vont au moins du simple au quintuple. Probablement pas si simple d'y voir clair et comprendre qui a raison. Alors pourquoi est-ce que personne ne tombe d'accord sur le prix du nucléaire, du charbon ou de l'éolien ?

Pour continuer dans le cliché, certains d'entre vous ont sans doute déjà entendu dire que le soleil et le vent sont gratuits. Et c'est totalement vrai. L'un et l'autre sont disponibles en quantité illimitée et n'appartiennent à personne. Pourquoi ne pas se servir d'une énergie gratuite et illimitée ? Vous savez faire mieux que gratuit vous ? Certains ont fait mieux que gratuit. Grâce aux énergies renouvelables, le prix de l'électricité devient négatif de temps en temps.

### Électricité Prix spot sur les marchés de gros le 13 avril 2020 (lundi de Pâques)



Oui, des gens sont prêts à payer pour qu'on leur prenne leur électricité ce qui n'arriverait pas si on n'avait que du fossile ou du nucléaire. C'est dire si les renouvelables sont bon marché. Mais alors, pourquoi le prix n'est pas stable ? On installe ou n'enlève pas si vite de nouveaux moyens de production sur le réseau. Alors si le nombre d'unités de production reste constant d'une heure à l'autre, c'est qu'il y a d'autres paramètres qui doivent varier. Toute cette introduction pour vous dire que c'est normal si vous ne comprenez rien au marché de l'électricité, il y a trop d'éléments bizarres et trop de déclarations contradictoires pour qu'on puisse s'y retrouver. Noter que je vais ici parler des coûts du réseau électrique. Ce n'est pas le prix payé par le consommateur. Je ne vais pas ici expliquer les fluctuations du marché de l'électricité qui peuvent faire erratiquement grimper ou baisser la facture. Le marché n'obéit pas que à des logiques de coûts des infrastructures et de marges commerciales, il y a aussi des règles dictées par le gouvernement qui viennent changer le résultat. La situation des prix de l'hiver 2021, qui pourra encore se reproduire à l'avenir aurait besoin d'explications supplémentaires à part.

## Les pièges

Pour commencer les explications, la première chose dont il faut se méfier, c'est l'unité choisie. Vous verrez régulièrement passer des chiffrages estimés en fonction de la puissance installée. Les politiques sont de grands spécialistes là-dedans pour pouvoir faire semblant de dire quelque chose de pertinent sans littéralement mentir.

€/Mw 

€/MwH 

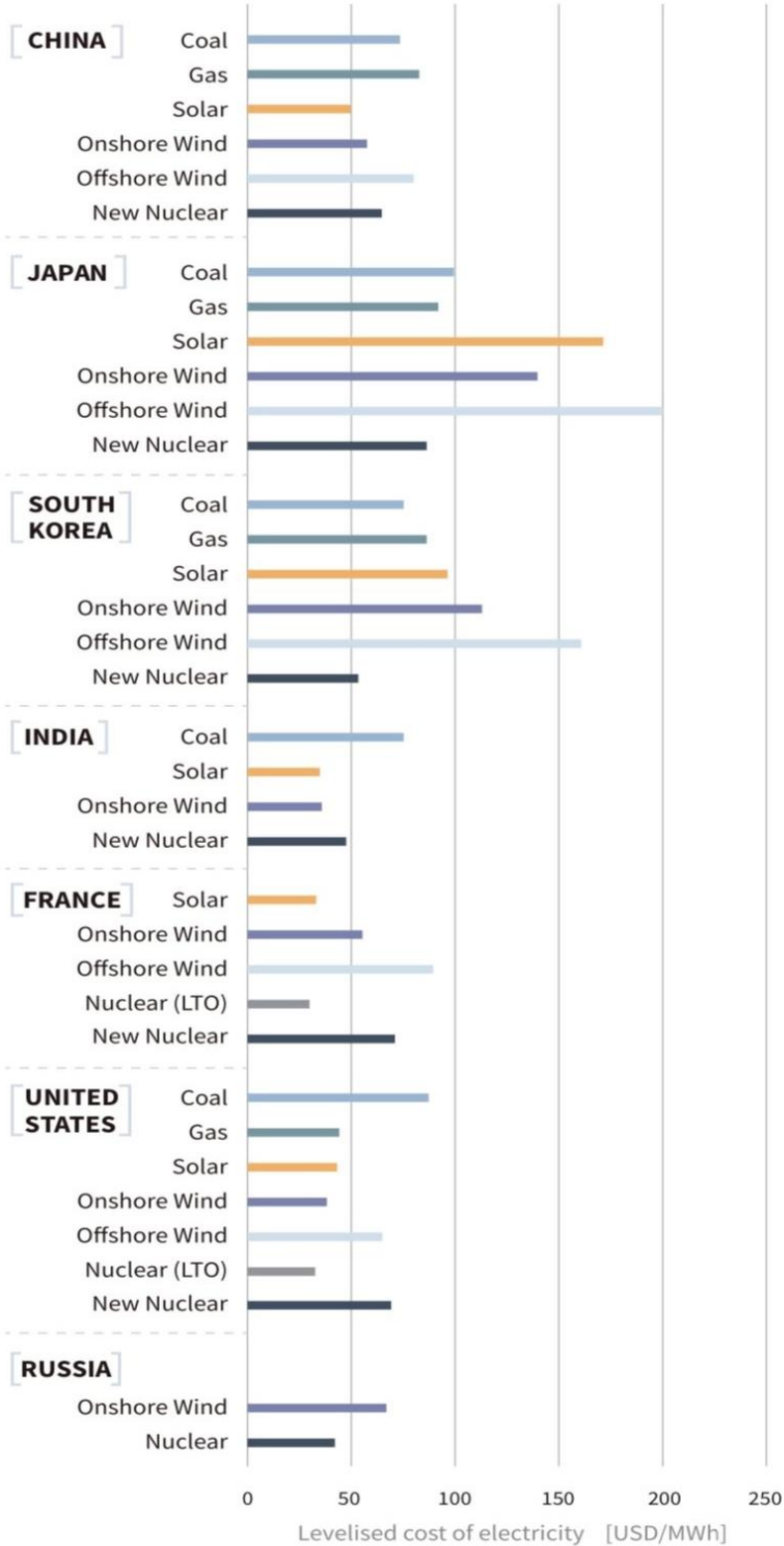
C'est une chose qu'il ne faut jamais faire. On ne compare pas les modes de production en fonction de la puissance installée mais en fonction de la production réelle. La raison, c'est qu'ils n'ont pas le même facteur de charge. Une éolienne fonctionne en moyenne à 25% de sa pleine puissance, une centrale à gaz peut fonctionner en moyenne à 80% de sa pleine puissance. Deux centrales de même puissance peuvent avoir une production d'énergie complètement différente. Pour avoir une comparaison pertinente, on compare les MWh, pas les Mw.

Parfois, certains font encore pire et donnent des prix sans aucun contexte. Si je vous disais que le prix des noisettes est de 100000€ vous trouveriez ça cher vous ? Aucune idée. 100000€ pour combien de noisettes ? Si on ne rapporte pas le prix au kilo, on a aucune information. Pareil pour l'électricité. Apparemment, ça ne dérange pas certains de donner des chiffrages énormes pour le démantèlement du parc nucléaire sans rapporter ça à la quantité d'électricité produite. On sait combien de milliards ça va coûter mais on ne sait pas combien d'électricité aura été produite grâce à la centrale dans toute sa durée de vie. La seule information qu'il y faut en retirer, c'est que la personne qui fait ce genre de déclaration cherche à vous manipuler. Je ne veux viser personne en particulier, alors je ne vous dirais pas que c'est le genre d'argument que l'on entend à la France insoumise. En évitant ces deux pièges, vous êtes déjà mieux préparé que la plupart des citoyens.

Alors si on veut faire correctement le travail, ce qu'il faut regarder, c'est le prix moyen du système dans son entier. Oubliez tous ceux qui vous présentent le prix à un instant donné pour en faire une généralité, soit ils ont rien compris, soit ils veulent vous embobiner. Et là ça commence déjà à se compliquer. Il faut regarder le prix moyen certes, mais pas au niveau mondial. Le prix moyen mondial d'un mode de production n'a aucune importance et ne signifie rien. Ça reviendrait à regrouper

ensemble des choses qui n'ont pas grand-chose à voir. Si vous voulez vraiment avoir un prix, il faut regarder à un niveau national et ça donne ça.

**Figure 16** Levelised cost of electricity in different countries



Source: IEA and OECD-NEA, 2020, Projected Costs of Generating Electricity 2020 edition

Il n'y a donc pas le prix de l'hydroélectrique ou le prix du solaire. Il y a de nombreux prix possibles et ce qui vous intéresse vous, c'est le prix que vous allez payer dans votre pays, pas le prix moyen mondial supposé.

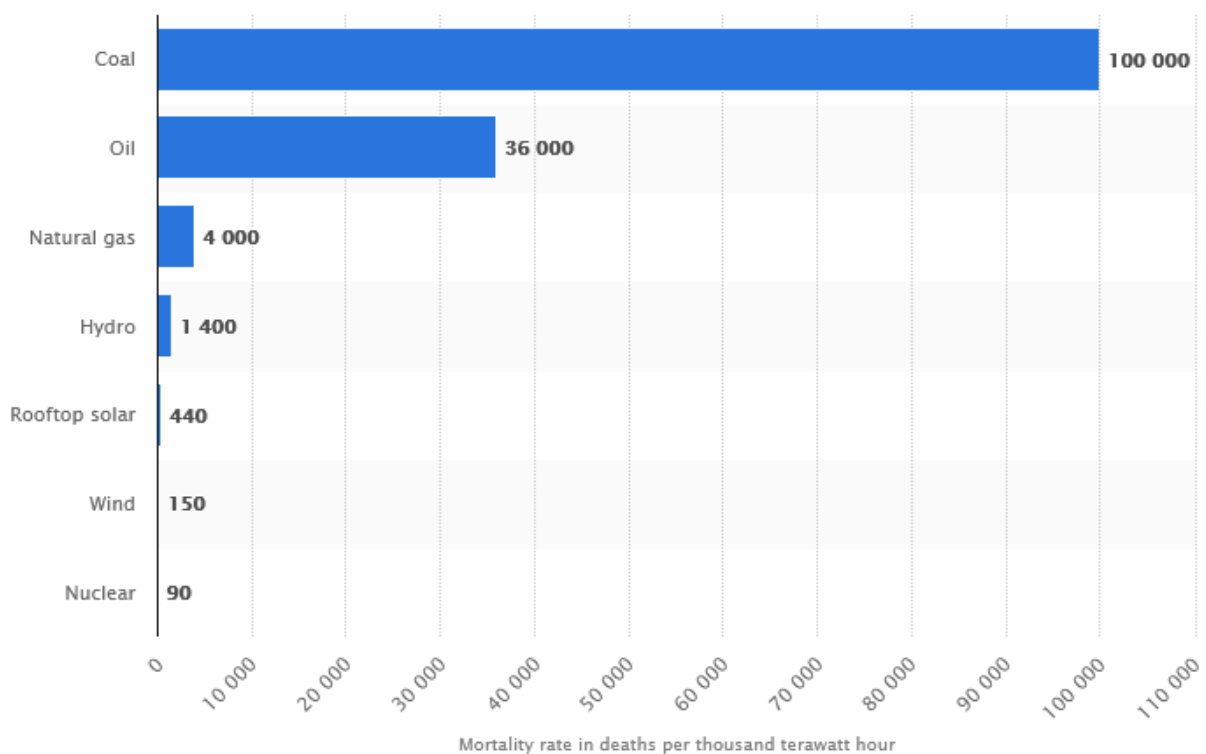
Autre chose intéressante à noter avec ce graphique, aucune source d'électricité n'est gratuite, même pas le vent et le soleil qui sont supposé l'être. C'est vrai que personne ne paie le soleil pour briller ou le vent pour souffler, mais le gaz ou le charbon sont tout autant gratuits. Personne n'a payé la Terre pour avoir créé des ressources fossiles et personne ne l'a payé pour qu'elle accepte de nous les céder. Toutes les sources d'énergies sont gratuites. Ce qui fait qu'elles ont un quand même un coût. C'est parce qu'il faut construire des machines qui vont nous permettre d'extraire ces sources d'énergies, de les transformer en quelque chose d'utilisable et de les transporter. C'est ça que l'on paye. Que ce soit biomasse ou nucléaire, il faut rémunérer la main-d'œuvre qui rend possible leur utilisation. Alors oubliez les slogans sur l'énergie gratuite.

## Qu'est-ce qu'on compte ?

Mais au moins maintenant, on a un prix pour les différents moyens de production par pays. Il serait intéressant de savoir pourquoi ce prix varie. Comment on fait le calcul ? Il faut pour commencer savoir ce qu'on ne compte pas. Chaque centrale a un impact plus ou moins élevé sur la santé ce qui se traduit entre autres par des morts.

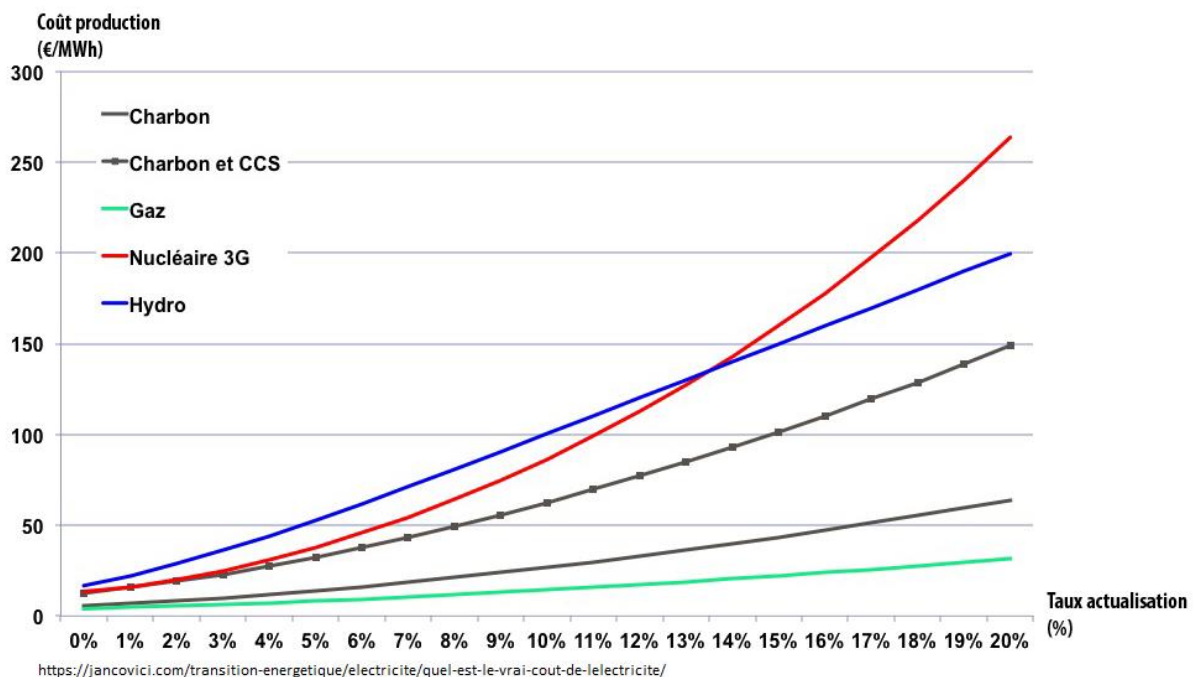
## Mortality rate worldwide in 2012, by energy source

*(in deaths per thousand terawatt hour)*



Eh bien, ça n'a aucune importance, le nombre de morts compte pour 0. Même si le coût santé n'est pas nul pour la société, on ne saurait pas trop comment le comptabiliser alors on ne le comptabilise pas. De même pour le réchauffement climatique qui entraîne des coûts croissants pour la société. On ne sait pas trop comment le comptabiliser alors ça compte pour 0 dans le prix final, même si toutes les centrales n'ont pas le même niveau de responsabilité. Contrairement à ce que l'on croit, il y a une grosse part d'arbitraire dans le prix. C'est pour partiellement corriger ça qu'une taxe carbone a été inventé et le montant de cette taxe est lui-même arbitraire.

Alors qu'est-ce que l'on inclut dans le prix ? La construction, la maintenance, la sécurité, les opérateurs, le combustible, le démantèlement, les déchets et le coût du capital. Qu'est-ce que le coût du capital ? Parfois il vaut 0, parfois c'est ce qu'il y a de plus cher. Pour répondre, il faut savoir qui paye. Si c'est l'état qui construit les centrales électriques, il utilise une partie du budget qu'il a à sa disposition pour les financer. Si c'est une entreprise privée qui veut se lancer sur le marché, elle n'aura souvent pas la trésorerie pour financer de but en blanc. Elle va donc aller voir une banque qui aura la gentillesse de financer le projet. Nous savons tous que les banquiers sont des personnes philanthropiques qui ont à cœur d'aider leur prochain. Mais malgré ça, ils se doivent de demander des intérêts sur la somme empruntée. Intérêts qui représentent un surcoût qu'il va falloir répercuter dans le prix du MWh. Ce surcoût est très variable. Ici quelques exemples.

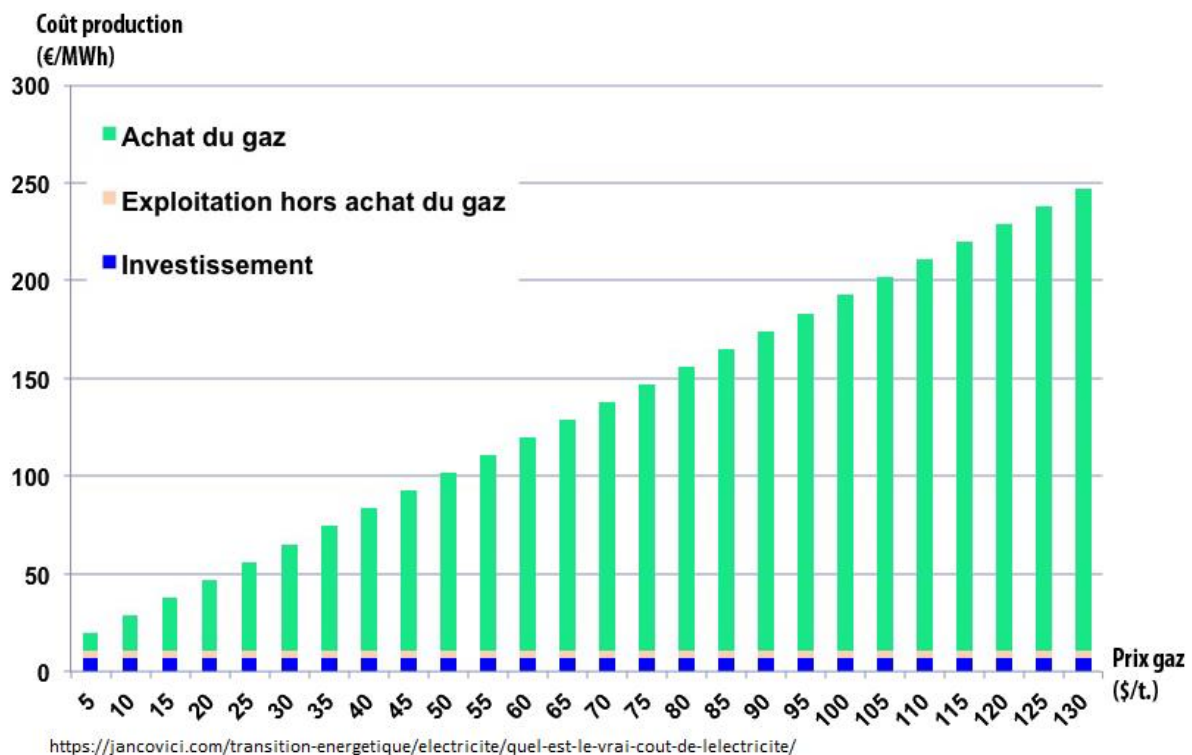


Apparemment, la concurrence libre et non faussée ne fonctionne pas dans ce secteur. Les centrales produisant l'électricité la moins chère sont celles qui n'ont pas besoin de passer par une banque pour être financé. Cas qui arrive bien plus souvent si c'est financé par le public.

Si la banque estime que le projet est peu risqué (comprendre « qui a de fortes chances d'être rentable »), le taux d'intérêt baisse. Si l'argent est emprunté à court terme et est remboursé rapidement, le taux d'intérêt baisse aussi. Ce fonctionnement est très au désavantage du nucléaire. Même si les coûts de fonctionnement sont faibles, l'investissement initial est élevé. Il faut emprunter beaucoup d'argent pour construire une centrale. Le temps d'attente pour rentabiliser la centrale est long aussi. Il faut des années pour la construire et attendre encore au moins 10 ou 20 ans pour rentrer dans ses frais. Et il est possible qu'un jour, un parti de gauche arrive au pouvoir et vous ordonne sans raison de fermer la centrale. Tout ça fait du nucléaire un investissement risqué pour

une entreprise, donc pour la banque. Et les banques n'aiment pas le risque. C'est pour ça qu'en Angleterre, Hinkley point fournit un MWh au double du prix moyen français. Dans le cas des sociétés privées, ce n'est parfois pas la banque qui fournit le capital de départ mais les investisseurs. Dans ce cas, il n'y a pas d'emprunt à rembourser mais des actionnaires à satisfaire avec des dividendes ce qui revient au même.

Le prix du combustible a une influence variable sur le prix final. Dans le cas du solaire, de l'hydroélectrique et de l'éolien, il est gratuit. Mais suivant l'abondance de celui-ci à l'endroit où sont placées les installations, la production totale et donc le prix final varient. Dans le cas du nucléaire, le combustible représente moins de 10% du coût final et varie très peu. Pour le charbon ou le gaz, ça dépend énormément du prix du marché.



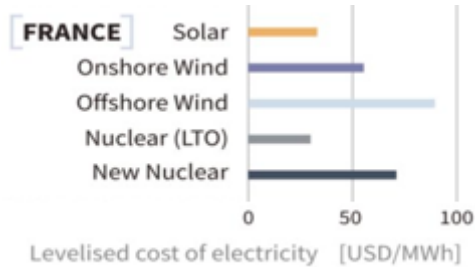
Evidemment, la construction de la centrale n'a pas non plus un coût bien défini. L'éolien offshore coûte beaucoup plus cher que l'éolien terrestre. L'EPR coûte plus cher que les centrales de 3<sup>ème</sup> génération et celui de Flamanville a en plus des surcoûts parce que c'est la tête de série. Un barrage hydroélectrique coûte plus que l'hydroélectrique au fil de l'eau.

Et le prix au MWh va encore dépendre d'autre chose, c'est la durée de vie de la centrale. Si vous la faite fonctionner 40 ou 60 ans, vous devrez démolir et reconstruire le parc plus ou moins souvent. La durée de vie est une variable importante sur le prix final si les coûts fixes de l'installation représentent une grosse part du coût total. C'est le cas pour le nucléaire, le solaire, l'éolien et l'hydroélectrique et ce n'est pas le cas pour le pétrole, le gaz et le charbon. Suivant le type de centrale que vous avez, votre intérêt économique peut tout à fait être de la faire fonctionner aussi longtemps que possible ou de la remplacer rapidement par un autre modèle plus performant.

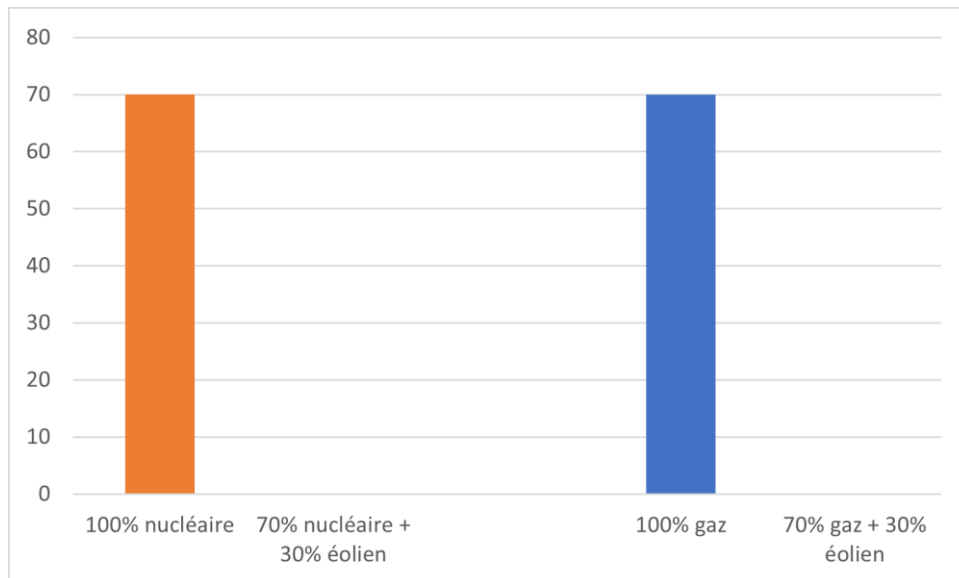
Alors avec tout ça, quand on vous annonce le prix estimé de tel ou tel type de centrale, demandez-vous quel sont les hypothèses derrière. C'est pour ces raisons qu'on obtient des tas de chiffrements très différents suivant les pays et beaucoup aiment bien choisir celui qui les arrange.

# C'est la même chose et pas pareil en même temps

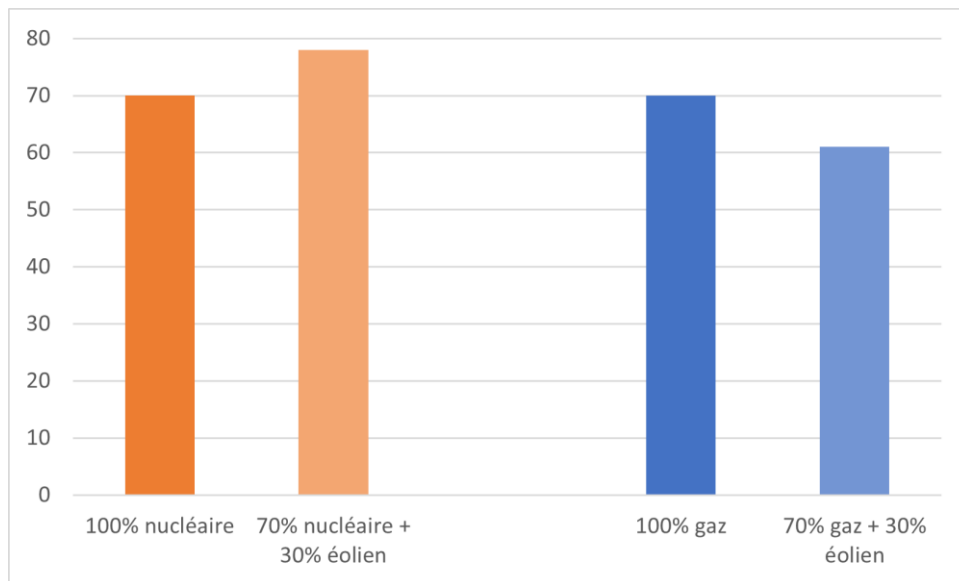
Avec tout ça en tête, dans le cas de la France, ça nous donne quoi ? On a plus ou moins ce résultat.



Visiblement, reconstruire des centrales nucléaires n'est pas l'option la plus compétitive. Plus on augmente la part des renouvelables dans le mix électrique, plus on baisse le prix de l'électricité n'est-ce pas ? Pour bien vérifier ça, je vous propose de comparer deux situations.

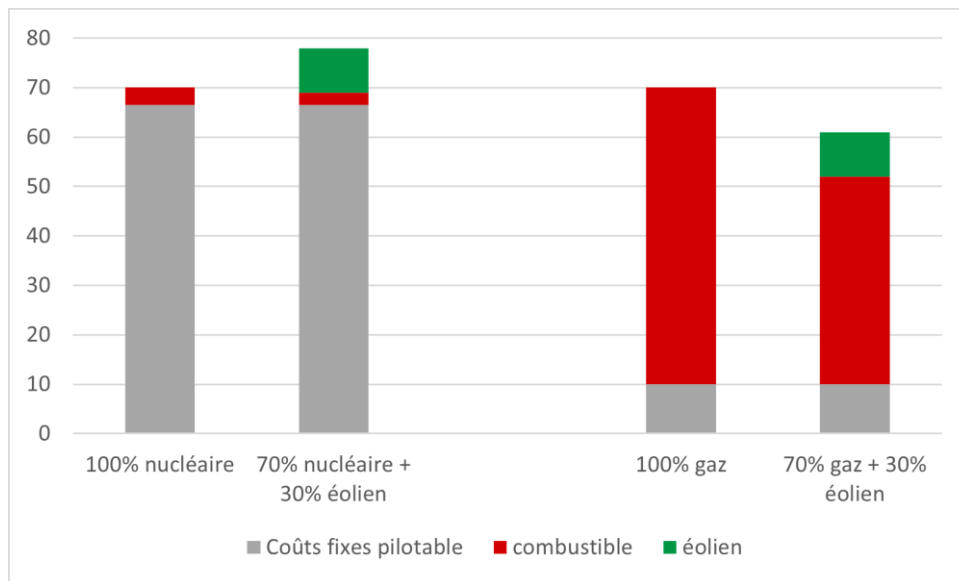


Nous avons un système fonctionnant uniquement avec du nucléaire et l'autre uniquement avec du gaz. Les deux fournissent une électricité à 70\$/MWh, hypothèse réaliste. À partir de ce point de départ, je vais les faire évoluer en mettant dans les deux cas 30% d'éolien avec un coût de 30\$ le MWh. Comment va évoluer la facture totale d'électricité ?



Etonnant non ? C'est pas une erreur. Les deux systèmes ont le même prix de départ, on y ajoute la même quantité d'éolien au même prix et pourtant, un système voit ses coûts augmenter, l'autre diminuer. Mais alors pourquoi ce comportement étrange ? A priori, rien de ce que je vous ai expliqué jusque-là n'explique ça. La clé pour comprendre est que l'on compare des choses incomparables. 1MWh nucléaire ou gaz, ce n'est pas la même chose que 1MWh éolien. L'éolien, tout comme le solaire, sont intermittents et ça change beaucoup de choses. Une règle très importante sur le réseau électrique est que la demande doit toujours être égale à l'offre. Toujours, à tout instant. La quantité d'électricité mise sur le réseau est toujours exactement la même que celle qui lui est prélevée. Il n'y a même pas la possibilité d'avoir une seconde ou deux de décalage. C'est un grand problème pour les sources intermittentes qui ne produisent pas quand on a besoin d'elles, mais quand elles en ont envie. La conséquence est que la puissance garantie à tout instant par les sources intermittentes est de 0. Ça veut dire qu'il est tout à fait possible qu'à un moment, vous ayez besoin d'électricité et que vos centrales intermittentes ne fournissent quand même rien. Dans ce cas de figure, il faut pouvoir compter à 100% sur vos centrales pilotables. La conséquence est que même si vous ajoutez beaucoup de solaire ou beaucoup d'éolien ou un mix des deux, vous ne pouvez pas retirer ne serait-ce qu'une seule centrale pilotable du réseau. Vous avez toujours besoin de toutes pour assurer la production les jours où la météo est contraignante. Vous aurez toujours autant de centrales à gaz ou nucléaire, mais elles fonctionneront juste moins souvent. Comment cela se répercute sur le prix ?





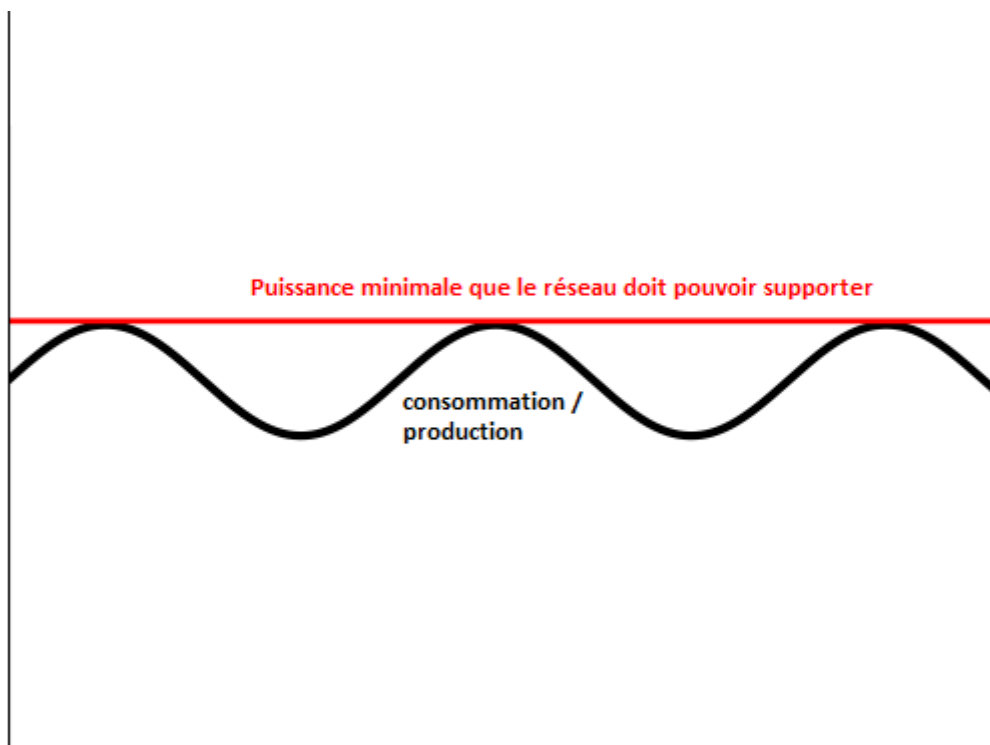
Dans le cas où vous n'avez que du gaz ou que du nucléaire, vous devez payer 100% du coût des centrales à gaz ou nucléaire. Dans le cas où vous rajoutez de l'éolien, vous devez toujours payer 100% du coût des centrales à gaz ou nucléaire plus 100% du coût de l'éolien moins le coût du combustible évité. Si on détaille le graphique des coûts, on comprend mieux ce qui se passe. Le prix du MWh éolien ne doit pas être comparé au MWh des modes pilotables. Il doit être comparé au coût du combustible. C'est comme ça qu'on obtient un résultat pertinent et qu'on peut savoir si le prix pour le consommateur va augmenter ou diminuer. Toutes les études comparent juste le prix des MWh sans prendre en compte l'intermittence et donnent tous les résultats sur le même graphique. Regardez le temps qu'il m'a fallu pour vous expliquer tout ça, en espérant avoir été clair, et vous comprendrez la confusion générale.

Mais on n'a pas fini de compliquer le sujet, il reste des choses à comprendre. Ce que j'ai dit sur la comparaison éolien/nucléaire ou éolien/gaz n'est vrai que jusqu'à un certain point. Il existe une deuxième façon de comparer le prix des enr avec celui des moyens pilotables. Tant que vous avez une petite portion de vos moyens de production qui sont intermittents, ce que j'ai dit est vrai. Mais si vous intégrez plus de 30% de modes intermittents dans votre réseau électrique, la situation change. En l'état actuel, au-delà de 30%, le réseau électrique devient trop instable et les modes pilotables commencent à avoir du mal à stabiliser le réseau. Il faut recourir à la solution que vous connaissez tous, le stockage. Quand il y a un surplus, on le met dans les batteries et quand on a un creux de production, on les décharge. Le stockage permet de rendre pilotable les modes de production intermittents, à condition de le dimensionner correctement. Dans ce cas, on ne fait plus la comparaison prix enr / prix combustible, mais on compare en 1 pour 1 sans oublier bien sûr d'inclure le coût du stockage dans le prix des enr. Et là ça devient délicat. La plupart des gens pensent aux batteries lithium-ion, comme on les trouve dans les smartphones, branchés en masse. Mais il existe aussi les steps, le stockage power to gas, power to hydrogène, air comprimé, volant d'inertie et encore d'autres méthodes plus exotiques. Toutes ont des coûts différents, ne s'utilisent pas sur les mêmes échelles de temps et n'ont pas les mêmes rendements. Alors chiffrer le coût du stockage devient très difficile et impose de poser encore plus d'hypothèses. De plus, la combinaison enr + stockage, tout le monde en parle mais personne ne l'a jamais fait. Il n'existe pas un seul pays qui ait mis en place un système de stockage à grande échelle pour compenser l'intermittence. Il n'y a aucun retour d'expérience et on se balade dans le théorique pur. Pour donner une idée des ordres de grandeur dont on parle, si on devait utiliser en France des batteries électrique pour stocker l'équivalent d'une seule journée de production, la facture serait de plus de 400 milliards d'euros,

juste pour les batteries. Si on voulait un système 100% solaire ou éolien, il faudrait être capable de stocker l'équivalent de plusieurs semaines de consommation. Alors le prix du Mwh enr + stockage, ce serait peut-être 5 fois le prix du Mwh gaz. Peut-être 20 fois, peut-être plus.

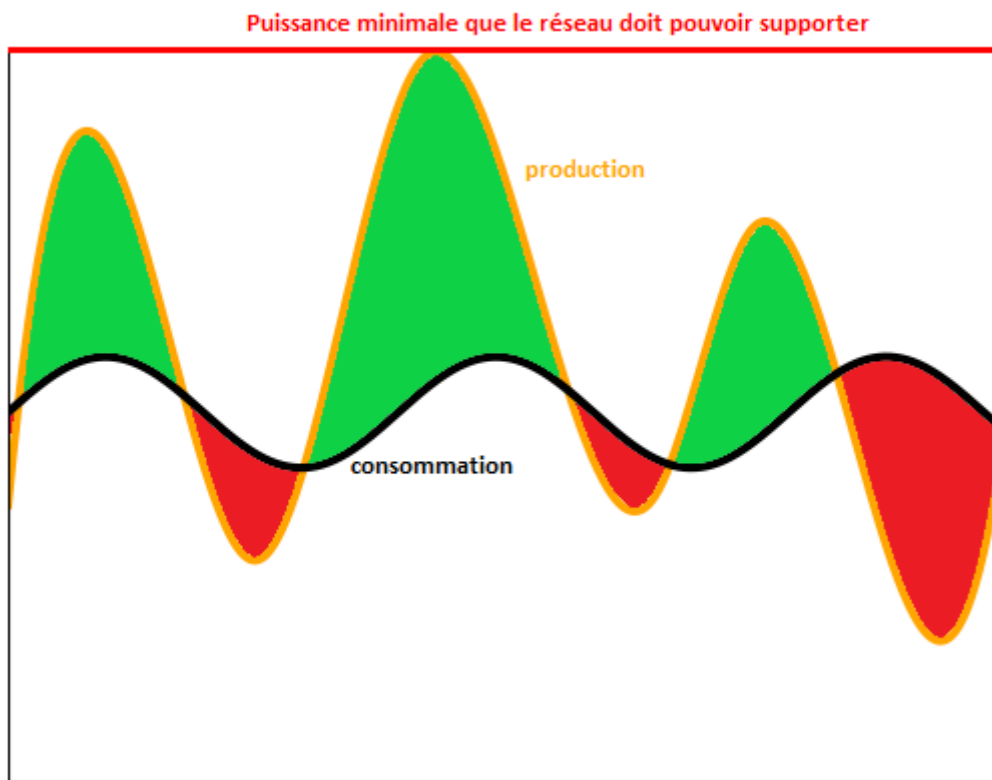
Mais on peut faire une objection à ce raisonnement. Il y a une troisième possibilité pour compter le coût des enr. On pourrait aussi se dire qu'on se base sur un système électrique sans centrale pilotable et sans stockage. Dans ce cas, soit il y a du courant et on s'en sert, soit il n'y en a pas et on fait autre chose en attendant. Riez pas, c'est en gros ce que propose le (dit-on) très sérieux scénario de l'ADEME qui est cité par tout le monde en permanence. Personne ne l'a lu visiblement car sinon, les gens se presseraient probablement moins pour le mettre en avant mais bref. Si on accepte d'avoir un réseau électrique instable au possible avec des coupures de courant au moins hebdomadaires, alors on peut se passer des systèmes de back-up. Il suffirait de flexibiliser la demande. Ça signifie que vous allumez votre lave-linge à 4h du matin si c'est à ce moment que le vent souffle, vous mangez vos repas suivant l'heure à laquelle vous pouvez utiliser votre four et les hôpitaux fonctionnent si la météo le permet. Dans un tel cas, il faudrait allouer le coût de l'effet qu'a l'intermittence sur la société. Je pense que personne n'a réellement fait d'étude sérieuse pour savoir de combien le PIB chuterait si les usines et les bureaux étaient conditionnés au rythme des caprices des centrales électriques. Sans doute une chute de plusieurs centaines de milliards en PIB annuel, allez savoir.

Et c'est pas fini. Il y a une chose dont on a pas du tout parlé pour l'instant, c'est la partie transport du réseau. Ça aussi faut bien le financer. Les lignes THT dans le pays doivent être dimensionnées pour pouvoir transporter à minima la puissance maximale que le réseau est susceptible de demander. En France, le réseau de transport est capable de supporter une puissance de 100 Gw parce qu'on suppose (et jusque là on a eu raison) que la demande ponctuelle ne dépasse pas cette valeur.



Qu'on utilise des centrales au fioul, au charbon, nucléaire, hydroélectrique, géothermique ou au gaz ne change rien, dans tous les cas, vous devrez construire le même réseau de transport. Autrement dit, vous devrez installer le même nombre de lignes THT. Sauf que ce n'est plus vrai si vous avez

beaucoup d'enr intermittentes. Au-delà d'un certain point, la production de pointe devient supérieure à ce que peut supporter le réseau. À ce moment, vous devez le renforcer.



C'est donc là aussi un coût qu'il faudrait allouer aux renouvelables, ce qui est rarement fait. On range plutôt ça dans une autre catégorie. Un réseau 100% éolien ou photovoltaïque en France obligerait à multiplier par 2,5 le dimensionnement et donc les coûts du réseau de transport.

## Et les emplois ?

Même si je vous ai sans doute déjà assommé avec toutes ces explications, je vais quand même parler d'un dernier paramètre, c'est la balance commerciale. Si la France veut faire son électricité avec des centrales à fioul, elle doit importer du pétrole ; si elle veut utiliser du nucléaire, elle doit importer de l'uranium ; si elle veut utiliser du solaire ou de l'éolien, elle doit importer divers métaux ; si elle veut utiliser du gaz, elle doit importer du gaz. Il n'y a que pour l'hydroélectricité ou la biomasse où il y a la possibilité de se passer du commerce international. C'est aussi une donnée importante. Là, la question n'est plus de savoir quel est le montant du chèque mais à qui l'adresser. Si vous achetez du matériel français à une société française qui le fabrique sur place, vous créez de l'emploi dans le pays et diminuez le chômage. Si vous achetez au même prix ce matériel à une société chinoise, vous favorisez l'emploi en Chine. Ce principe n'est pas valable que pour la production d'électricité, ça s'applique partout de la même façon. Certains vous parleront du nombre d'emplois que pourrait créer telle ou telle filière si on la développait. C'est tout simplement faux, ils ont tous tort. Il ne faut pas que s'intéresser au nombre d'emplois créé dans le secteur, mais au nombre d'emplois créé ou détruit au total dans le pays. Pour faire simple, si votre alternative creuse le déficit commercial, vous aurez plus de chômage dans le pays, si elle réduit le déficit commercial, vous aurez moins de chômage dans le pays. Pour faire 1 TWh, il vous faut au choix 300000t de charbon, 25t d'uranium, 110000t gaz ou quelques milliers de tonnes de cuivre, d'aluminium, de néodyme, d'acier, de

cadmium, de tellure et autres pour le solaire et l'éolien avec des variations suivant la technologie utilisée.

## Conclusion

Il y aurait encore d'autres aspects dont on pourrait parler et qui peuvent avoir une influence sur le coût des technologies, mais ce serait aller très loin dans le détail. Si vous avez réussi à retenir tout ça, vous comprenez déjà bien le sujet. Les points importants à en retirer sont que le prix dépend d'un grand nombre de variables dont certaines sont fixées de manière totalement arbitraire ; les MWh intermittents et pilotables ne sont pas équivalents ; il y a des répercussions sur d'autres secteurs ; et beaucoup de gens racontent n'importe quoi. C'est tout le souci de vouloir répondre à une question longue et complexe en donnant juste un chiffre.

Pour ceux qui veulent en savoir plus :

<https://www.quora.com/What-is-meant-by-the-term-value-adjusted-LCOE-How-will-this-impact-our-future-energy-mix-of-solar-and-wind-energy>

<https://jancovici.com/>

<https://www.iea.org/>

<https://www.youtube.com/channel/UC94tSeCPLV4Jja08tkRI7vA/featured>

<https://doseequivalentbanana.home.blog/>

<https://theshiftproject.org/>

<http://www.economiamatin.fr/news-energie-bouclier-tarifaire-depense-france-gouvernement-menages-cout>

<https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6906861062030041088/>

<https://www.youtube.com/watch?v=PeYNDhAexVc>

<https://youtu.be/ZXHDJkxWrfk>

<https://www.enedis.fr/liste-des-fournisseurs-deelectricite>

<https://descartes-blog.fr/2021/10/23/chere-energie/>

<https://www.francetransactions.com/actus/news-finances/cout-du-bouclier-tarifaire-energetique-24-milliards-d-euros-sur-un-an.html>

<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>