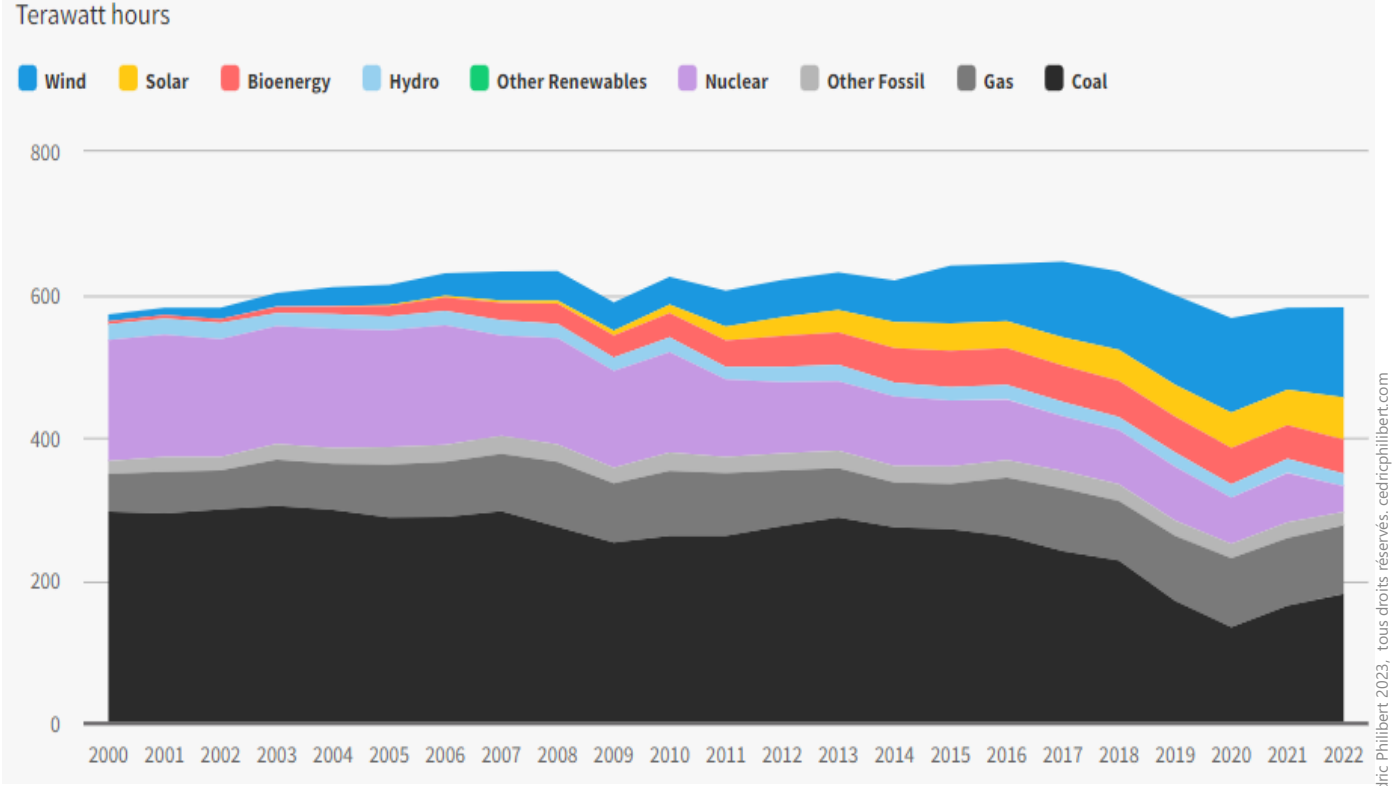
La baisse du charbon dans la production d'électricité en Allemagne

La désinformation habituelle sur la transition énergétique allemande prétend que l'Allemagne rouvre des centrales au charbon pour compenser « l'intermittence » de l'éolien.

La réalité est très différente : la consommation de charbon pour la production d'électricité a baissé de 35% entre 2000 et 2019 grâce aux énergies renouvelables.

La production nucléaire a baissé de moitié et celle de gaz fossile a varié, mais n'était pas plus élevée en 2019 qu'au début des années 2000.

Les trois années qui suivent – confinements, guerre - sont peu représentatives des tendances à long terme.



Source: ember climate

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

La baisse mondiale des coûts de l'électricité éolienne et solaire, et des batteries

Chapitre 1

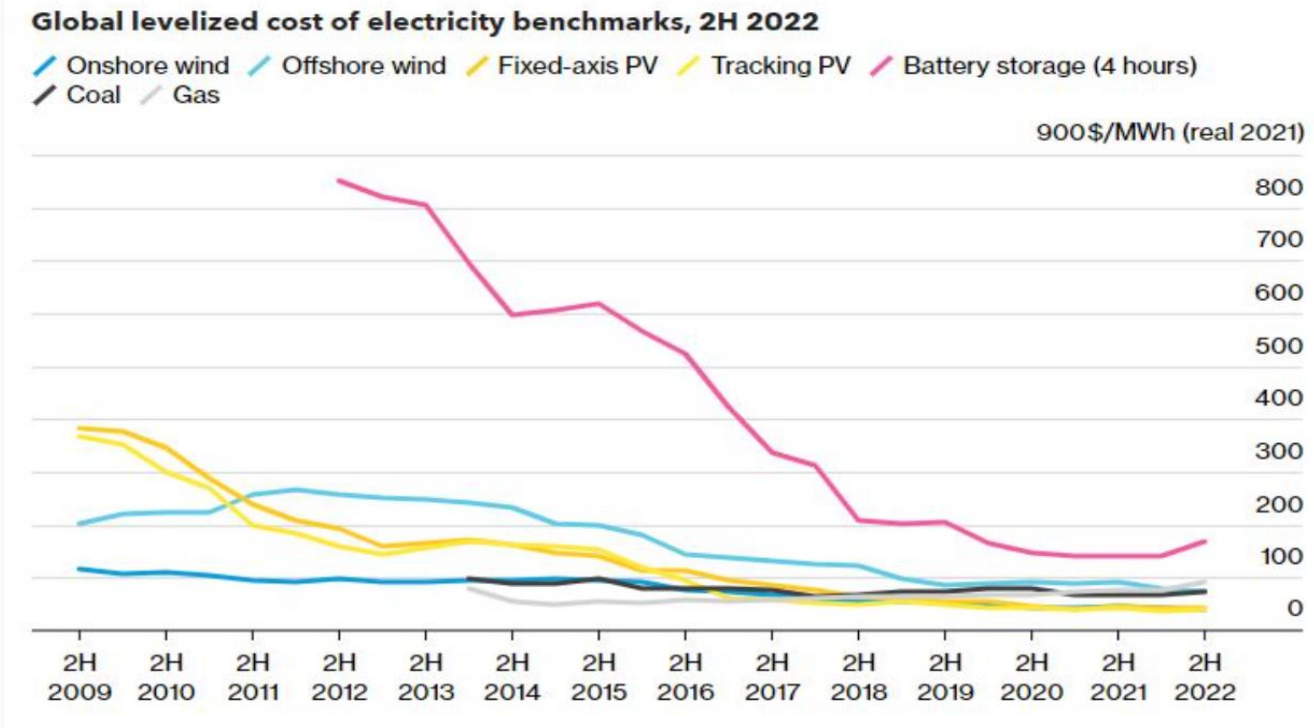
Ce graphique montre l'évolution du coût de l'électricité de l'électricité, en dollars constants par mégawattheure, pour toute installation nouvelle, selon la date de l'installation.

Ce coût inclus le coût de l'investissement, les frais financiers, les dépenses de maintenance et d'exploitation (incluant les éventuels coûts de combustible).

Il s'agit de moyennes mondiales, qui ne représentent pas avec exactitude la situation particulière de chaque projet ou de chaque pays.

L'énergie solaire, la plus chère voici treize ans, est devenue la moins chère, suivie de près par l'énergie éolienne terrestre.

Source: Bloomberg NEF



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

L'évolution technique des éoliennes aux Etats-Unis

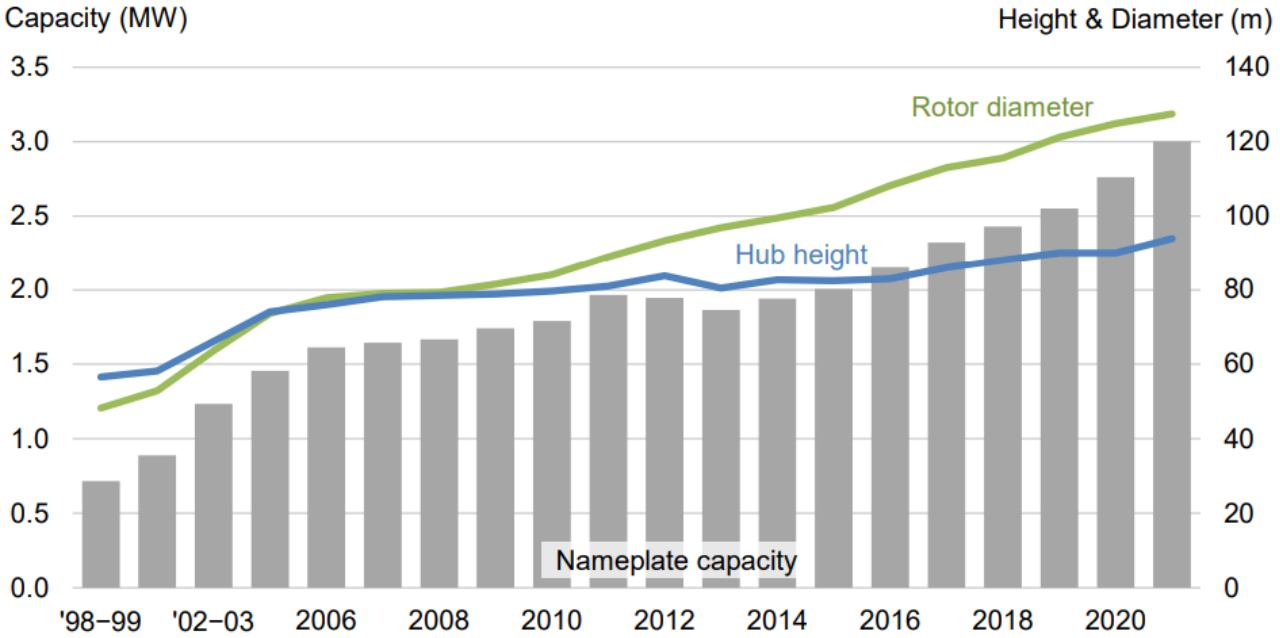
Chapitre 1 et 4

Les barres indiquent la puissance électrique en mégawatts (*Capacity,* échelle de gauche), les lignes continues la hauteur du moyeu (*Hub* height, en bleu) et le diamètre des rotors (*Rotor diameter*, en vert).

L'augmentation de la surface des rotors (qui croît comme le carré du diamètre), est plus rapide que l'augmentation des puissances, ce qui conduit à augmenter le facteur de charge.

Celui-ci est de 35% en moyenne (aux USA), et de 39% pour les éoliennes terrestres les plus récentes.

Source: Wiser et al., Land-based wind market report, 2022 Edition, US DOE.



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Le déploiement des renouvelables accélère dans le monde entier

Chapitre 1

Le graphique montre les installations nouvelles, essentiellement éoliennes et photovoltaïques, déployées par périodes de cinq ans.

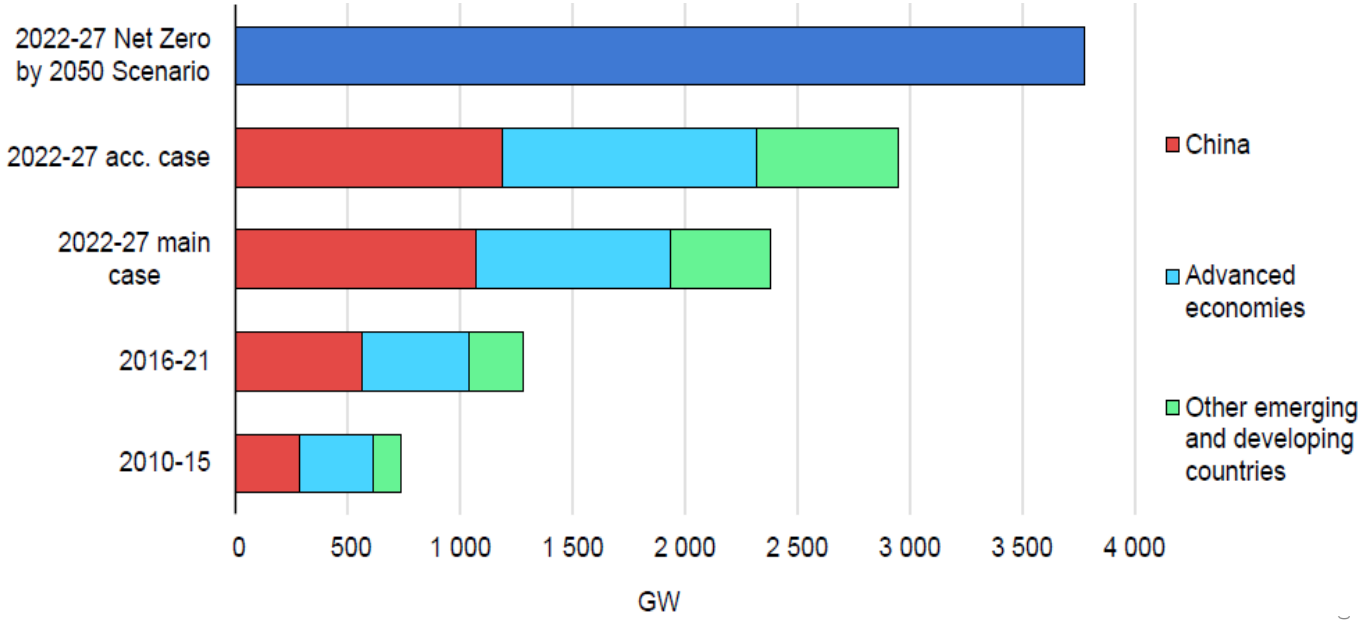
Le rythme de déploiement a doublé pendant la période 2016-2021 par rapport à la période 2010-2015.

L'AIE s'attend à un nouveau doublement dans les cinq ans à venir (*main case)*, voire plus (*accelerated case).*

Ces progrès sont encourageants, mais encore insuffisants pour mettre le monde sur une trajectoire compatible avec un scénario *Zéro émissions nettes* en 2050.

On n'est pas encore tout à fait ZEN!

Source: IEA, Renewables 2022



Cédric Philibert 2(

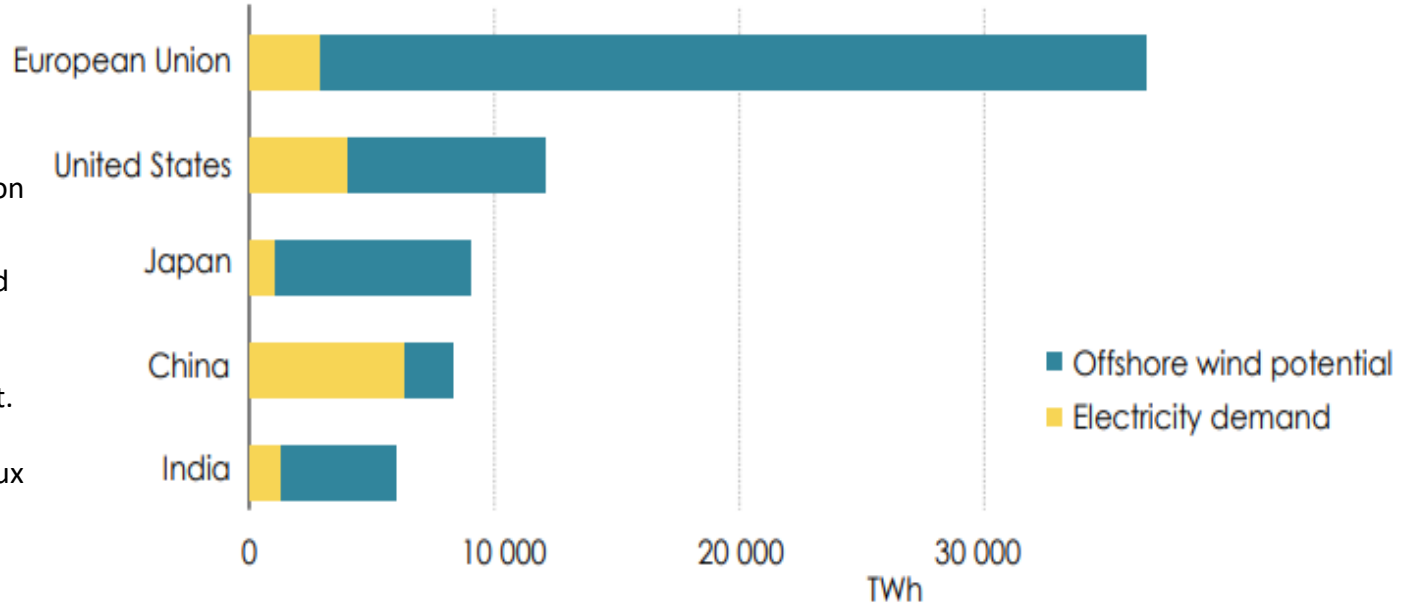
L'éolien maritime, un potentiel considérable en Europe

Potentiel éolien des zones économiques exclusives vs. demande d'électricité

L'éolien maritime dans les mers territoriales (jusqu'à 22 km du rivage) et les zones économiques exclusives (jusqu'à 370 km du rivage) offre un potentiel exceptionnel, notamment à l'Union européenne.

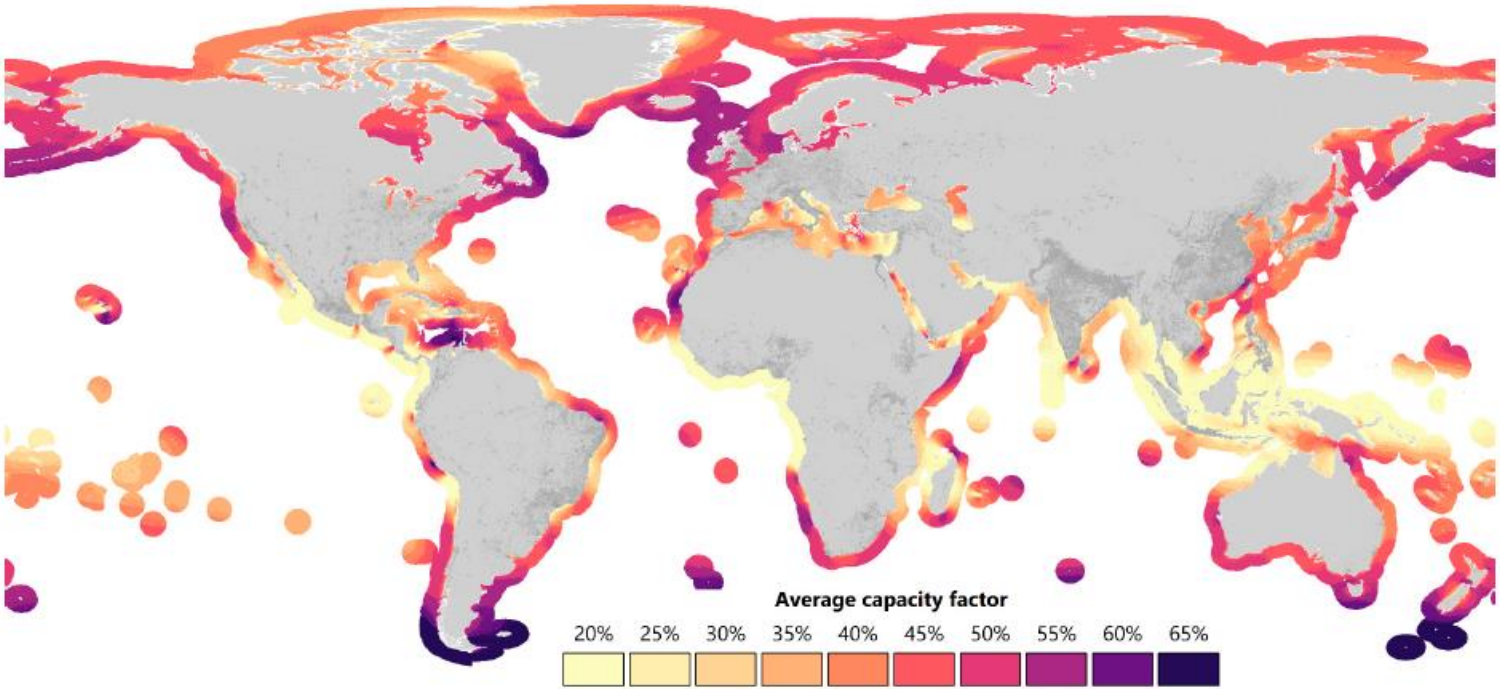
Les hauts fonds de la mer du Nord permettent l'éolien posé, plus économique. La Méditerranée ne permet guère que l'éolien flottant. La façade atlantique, selon la distance au rivage, permet les deux options.

Source: AIE 2019, Offshore Wind Outlook



Cédric Philibert

L'éolien maritime offre d'excellents facteurs de charge



Source: AIE 2019, Offshore Wind Outlook

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Production d'électricité dans le scénario *Net Zéro en 2050* de l'AIE

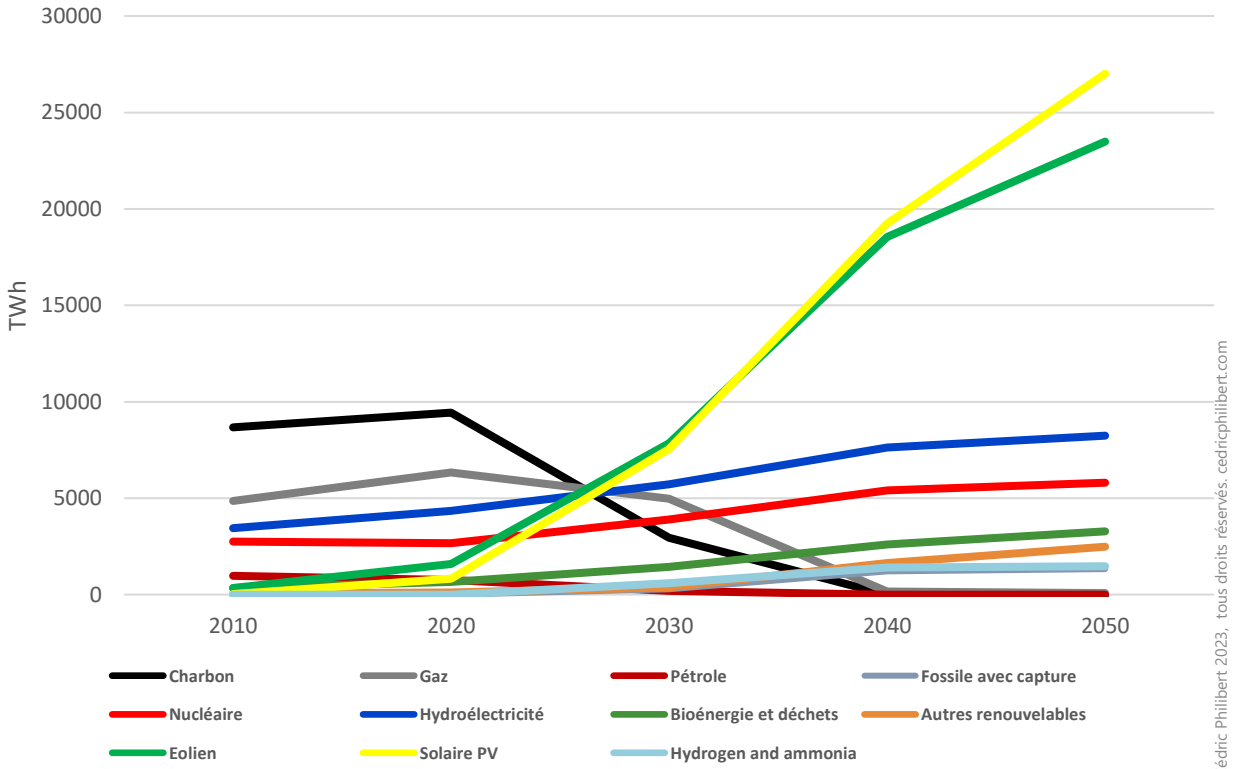
Chapitre 2

Le graphique montre la progression très rapide du solaire (en jaune, 37% de la production électrique totale en 2050) et de l'éolien (en vert clair, 32%), nécessaire à la décarbonation de l'économie mondiale en 2050.

L'hydroélectricité (en bleu, 11%), le nucléaire (en rouge, 8%), la bioélectricité (en vert foncé, 4,5%) et les autres renouvelables électriques (en marron, 3,4%) progressent plus lentement, ainsi que les fossiles avec capture et stockage du carbone (2%), l'hydrogène et l'ammoniac (en tant qu'énergie pour la production d'électricité, 1,8%).

Le pétrole, le gaz et le charbon sans capture du CO_2 disparaissent presque entièrement du paysage dès 2040.

L'électricité fournit alors la moitié de l'énergie finale, et les deux tiers de l'énergie utile. Source: *Données de l'AIE, World Energy Outlook 2022.*



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Consommation d'énergie finale en 2050 (Stratégie nationale bas-carbone)

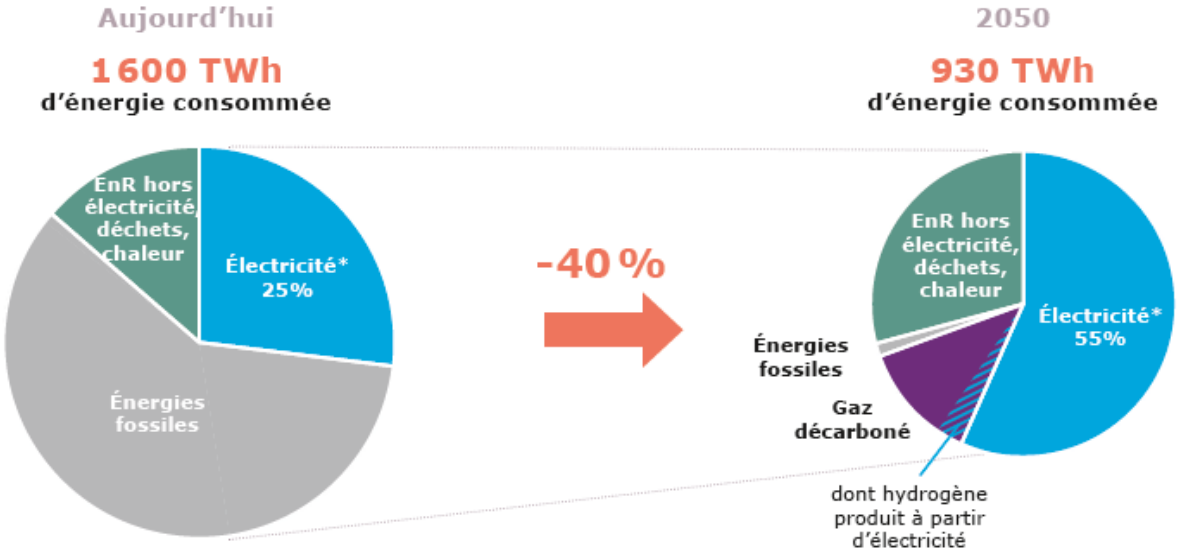
Chapitre 2

La consommation finale d'énergie en France diminue de 40% d'ici 2050 dans la stratégie nationale bas-carbone.

Dans le même temps, la consommation d'électricité passe de 475 TWh en moyenne à 645 TWh*.

Ce n'est pas contradictoire, car l'électrification des bâtiments, de l'industrie et des transports est en elle-même source d'économies d'énergie importantes.

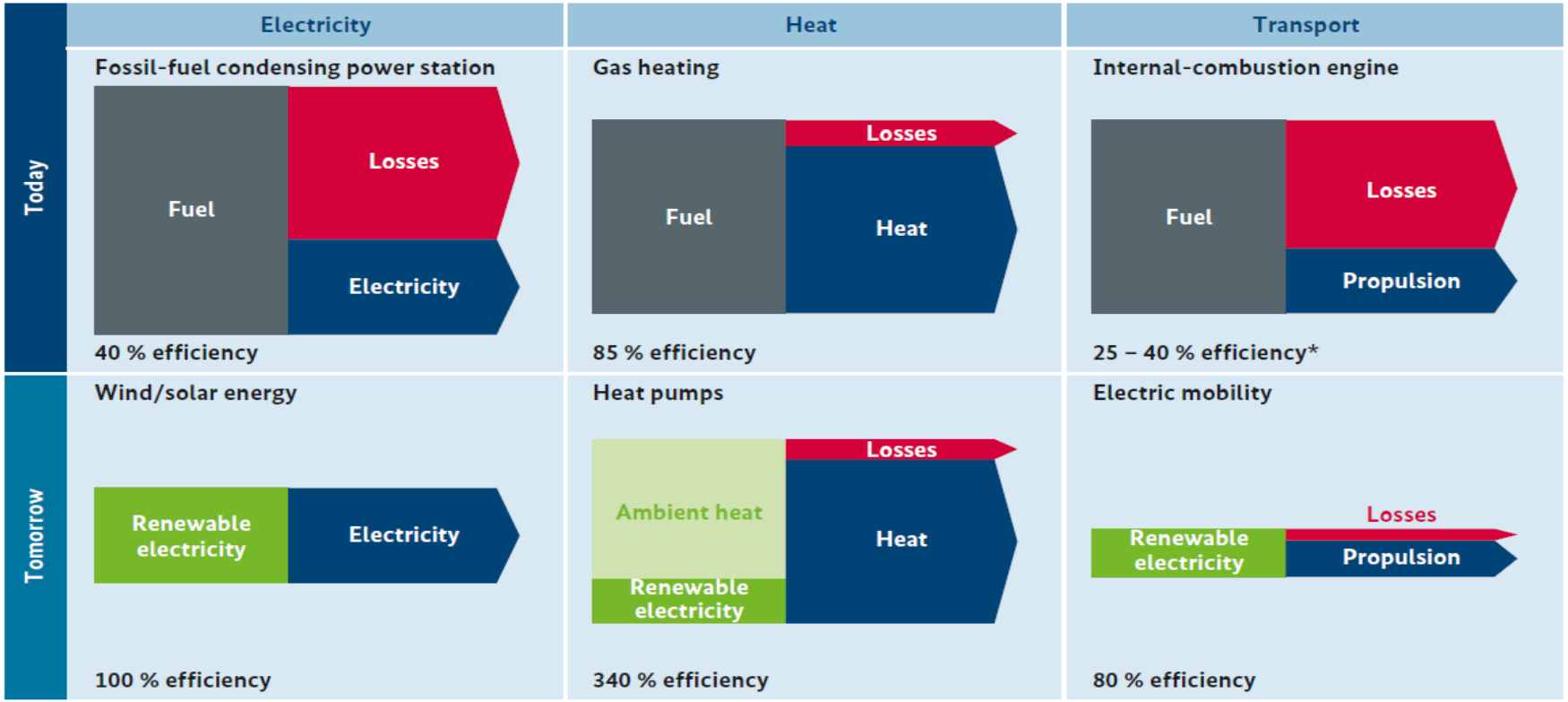
* hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

L'électrification, source d'importantes économies d'énergie



*Dans d'autres applications (transport maritime, générateurs), l'efficacité approche 50%

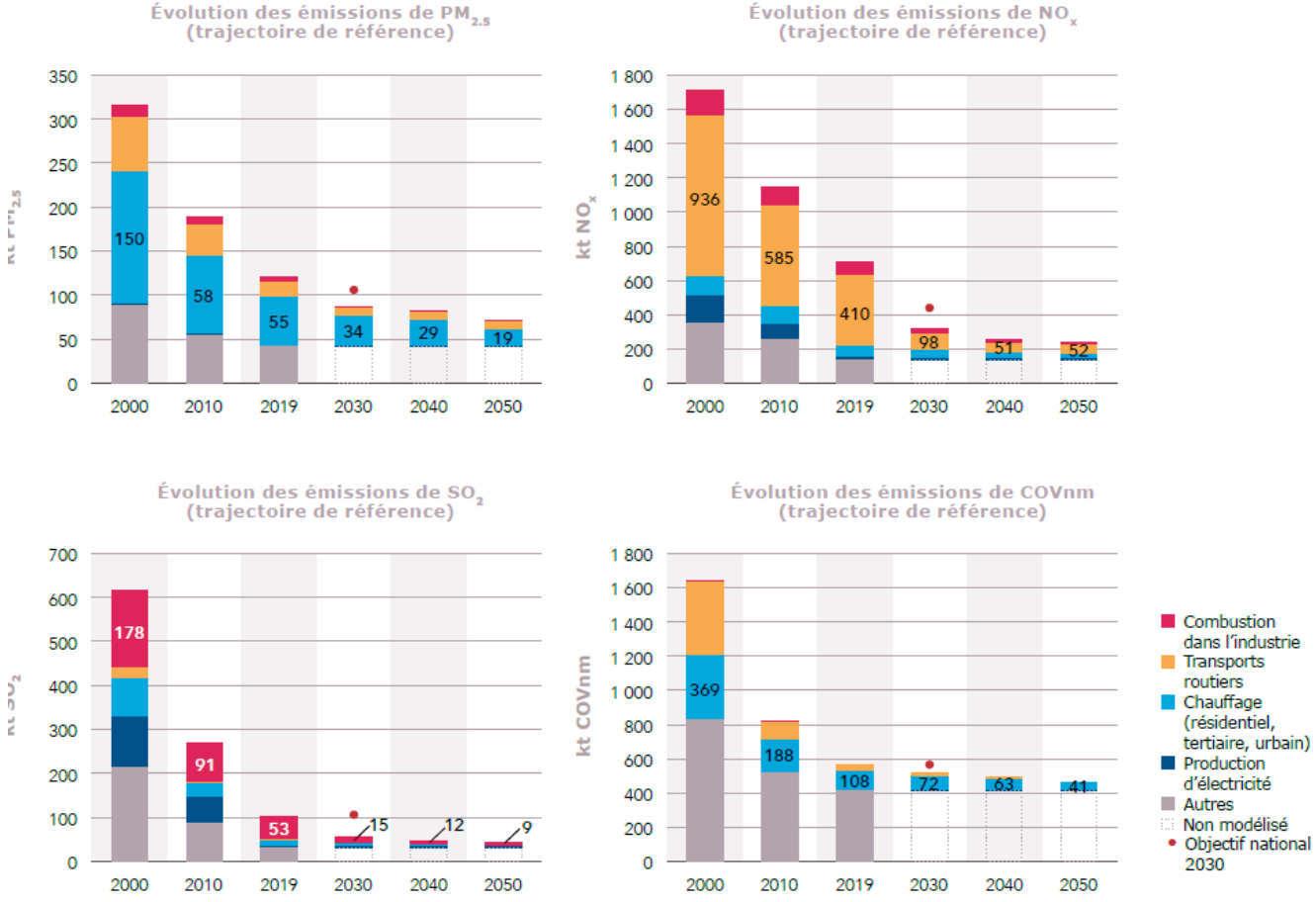
Source: Ministère fédéral de l'économie et de l'énergie, 2015, *An electricity market for Germany's energy transition*, *White Paper*.

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

L'électrification réduira aussi la pollution atmosphérique

Le remplacement des combustibles fossiles par l'électricité principalement renouvelable et nucléaire dans les bâtiments, l'industrie et les transports, réduira considérablement d'ici 2050 les émissions des principaux polluants atmosphériques: particules fines ($PM_{2,5}$), oxydes d'azote (NO_x), oxydes de soufre (SO_2), Composés organiques volatiles non méthaniques (COVnm).

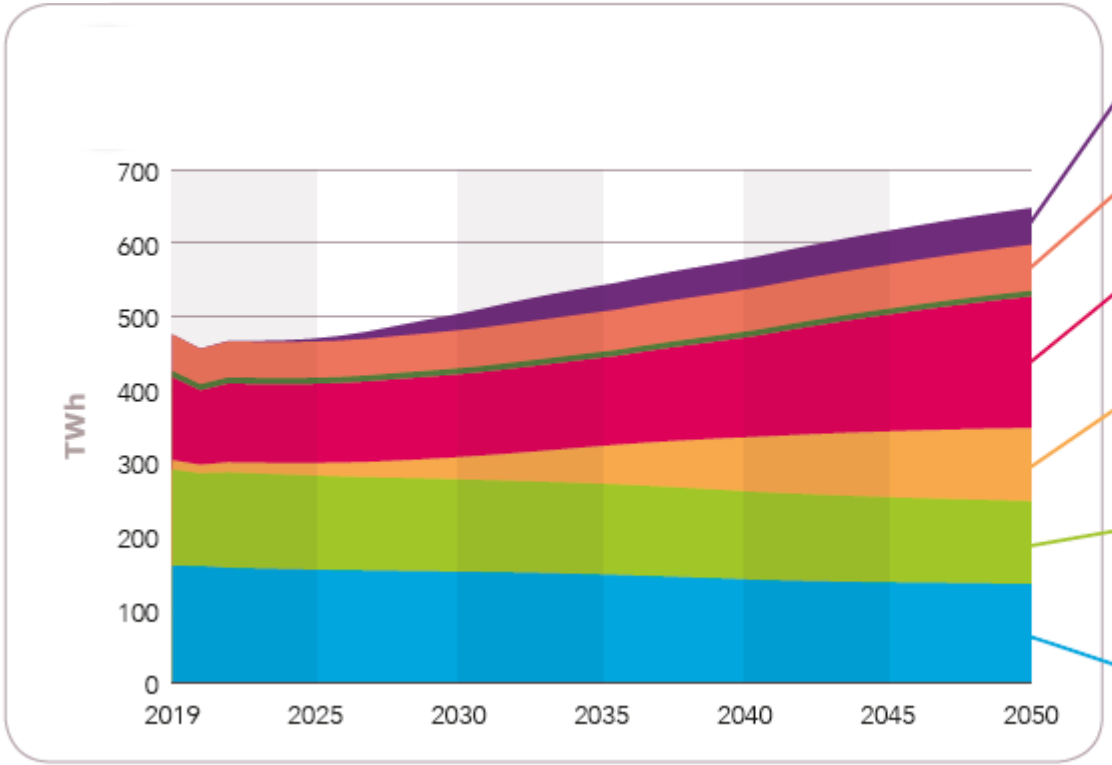
Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Projection de la consommation totale d'électricité par usages

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050, trajectoire de référence



Hydrogène bas-carbone (0 → 50 TWh) :
produit par électrolyse (besoins industriels et transport lourd)

Énergie et pertes (50 → 60 TWh) :
corrélé à la demande d'électricité

Industrie (115 → 180 TWh) :
électrification et croissance de la valeur ajoutée

Transports (15 → 100 TWh) :
fin des ventes des véhicules thermiques en 2040 : en 2050, 94% des véhicules légers et 21% de camions sont électriques

Tertiaire (130 → 110 TWh) :
croissance de la consommation des data centers (~x3), compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique dans d'autres usages

Résidentiel (160 → 135 TWh) :
développement du chauffage électrique par pompes à chaleur, compensé par la rénovation des bâtiments et des équipements électriques plus efficaces

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Les six scénarios de production d'électricité de RTE (consommation: référence)

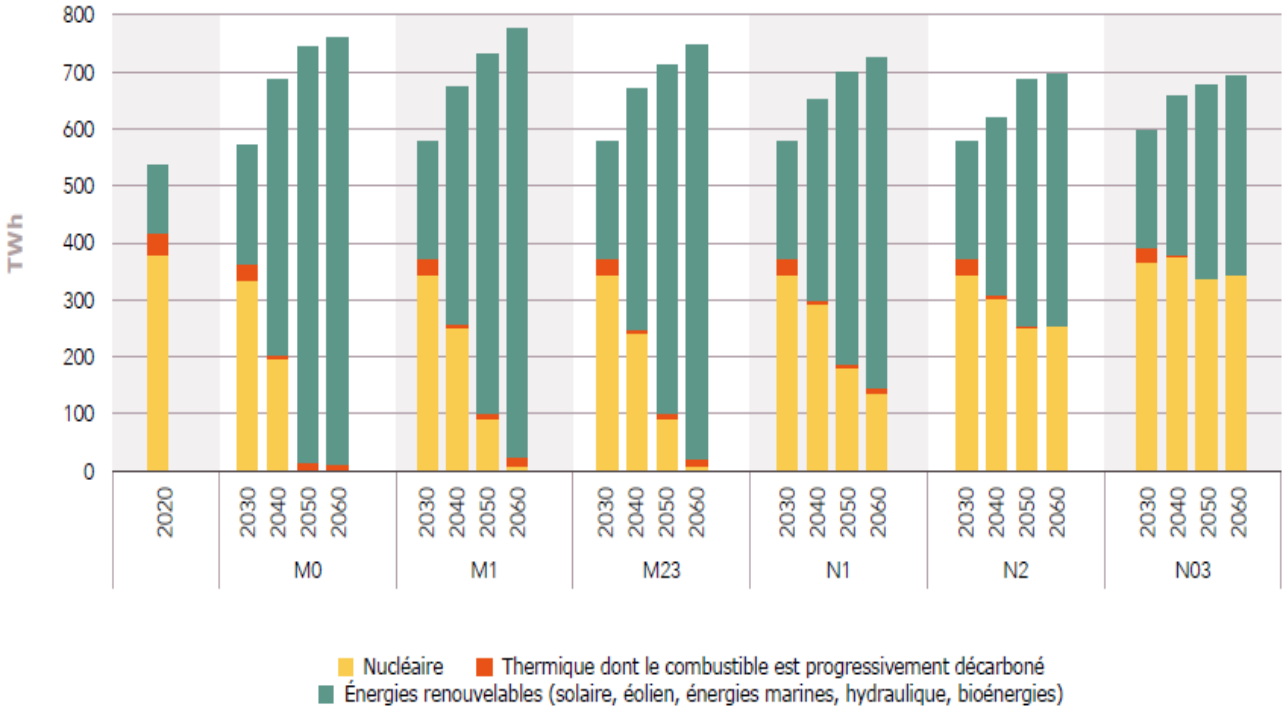
Chapitre 2

RTE a étudié six scénarios possibles jusqu'en 2060.

Trois scénarios, M0, M1 et M23 sont essentiellement basés sur les renouvelables. Le scénario M0 vise une sortie rapide du nucléaire. Le scénario M1 fait largement appel au photovoltaïque diffus sur tout le territoire. Le scénario M23 fait davantage appel aux grands parcs solaires, à l'éolien terrestre et à l'éolien maritime « posé ».

Trois autres scénarios font appel à de nouveaux réacteurs nucléaires: huit EPR2 pour le scénario N1, 14 EPR2 pour le scénario N2, 14 EPR2 et des SMR pour le scénario N03, qui conserve aussi plus de nucléaire « historique », au-delà de 60 ans, que tous les autres.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Les six scénarios de production d'électricité de RTE (consommation: référence)

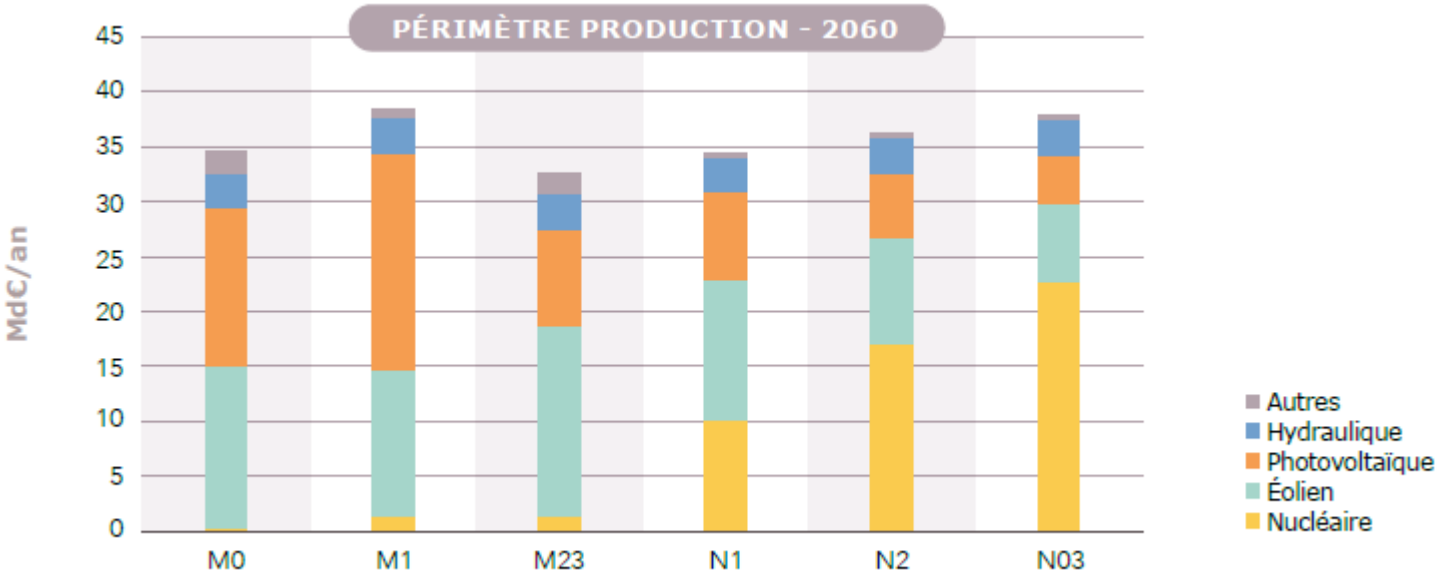
Chapitre 2

L'électricité renouvelable, notamment celle des grands parcs solaires au sol, de l'éolien terrestre et de l'éolien maritime posé, est déjà aujourd'hui moins coûteuse à produire que l'électricité du nouveau nucléaire.

Ce sera aussi le cas dans quelques années de l'éolien maritime flottant et du photovoltaïques en grandes toitures.

Et ça se voit dans les scénarios…

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

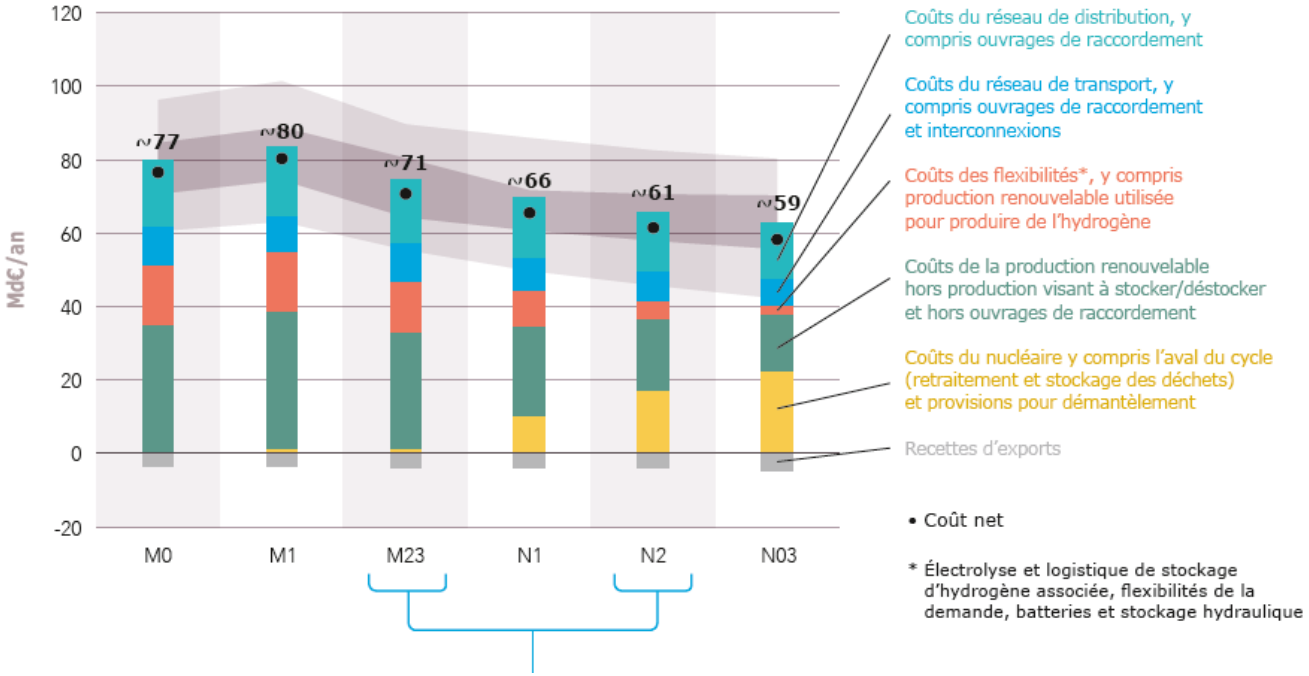
L'analyse économique des scénarios: flexibilités vs. faible coût des renouvelables

Cependant, la variabilité du soleil et du vent impliquent de développer davantage les réseaux et surtout les flexibilités*.

De ce fait, les scénarios sans nucléaire neuf, comme le M23, coûteraient plus cher que les scénarios qui, comme le N1, comptent 8 EPR2 neufs (26% de la production électrique) ou le N2 avec 14 EPR2 (36% de la production d'électricité). Au-delà, l'avantage économique devient très mince, puis disparaît.

Mais ces hypothèses économiques sont fragiles. Les réacteurs récents ont *tous* explosé leurs budgets et connu d'importants délais de construction.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050, trajectoire de référence



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Les centrales nucléaires ne sont pas éternelles

Chapitre 3

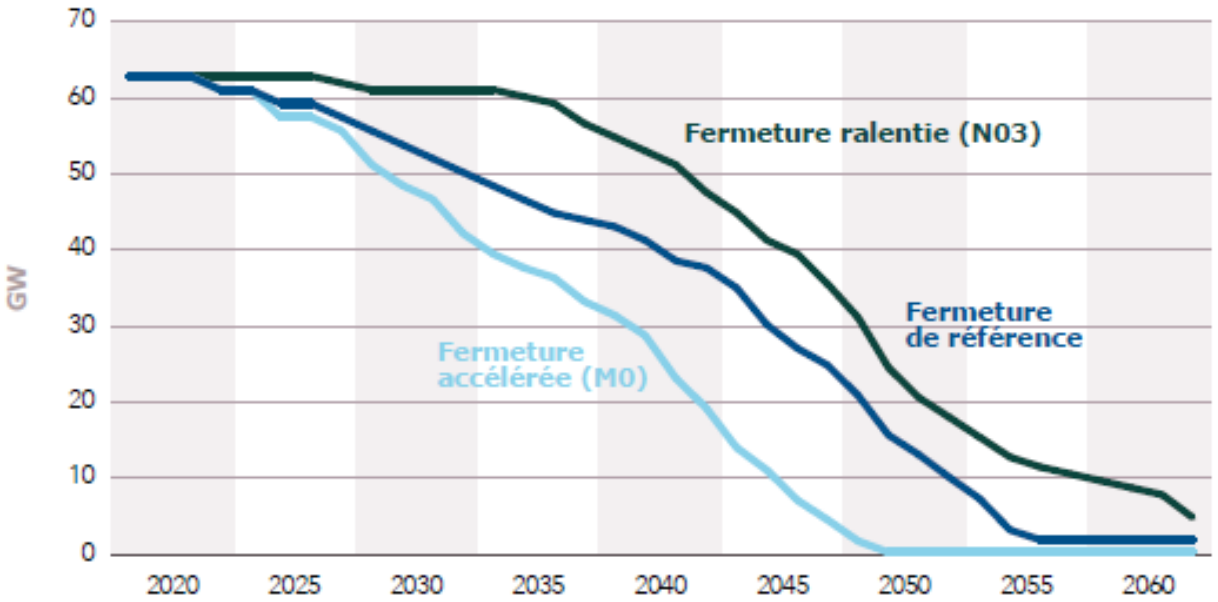
Les réacteurs nucléaires français ont été mis en service entre 1977 et 1999. Ils auront une moyenne d'âg de plus de 40 ans en 2030.

Leur prolongation au-delà de 40 ans, voire de 50 ans, fait désormais consensus, mais reste tributaire de leur sécurité. La garantir suppose des inspections détaillée, et des travaux plus ou moins importants.

Leur disponibilité et leur durée de vie sont incertaines aujourd'hui.

Leur part très élevée dans le mix électrique français a imposé de « moduler » leur puissance, ce qui peut accélérer leur vieillissement. Une prolongation au-delà de 60 an reste fortement hypothétique.

En 2060, l'EPR de Flamanville, qui n'est pas encore démarré, pourrait être le seul encore en service.



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 2023, t

Le coût du nouveau nucléaire dépend de son mode de financement

Chapitre 3

Le coût du capital est le facteur clé.

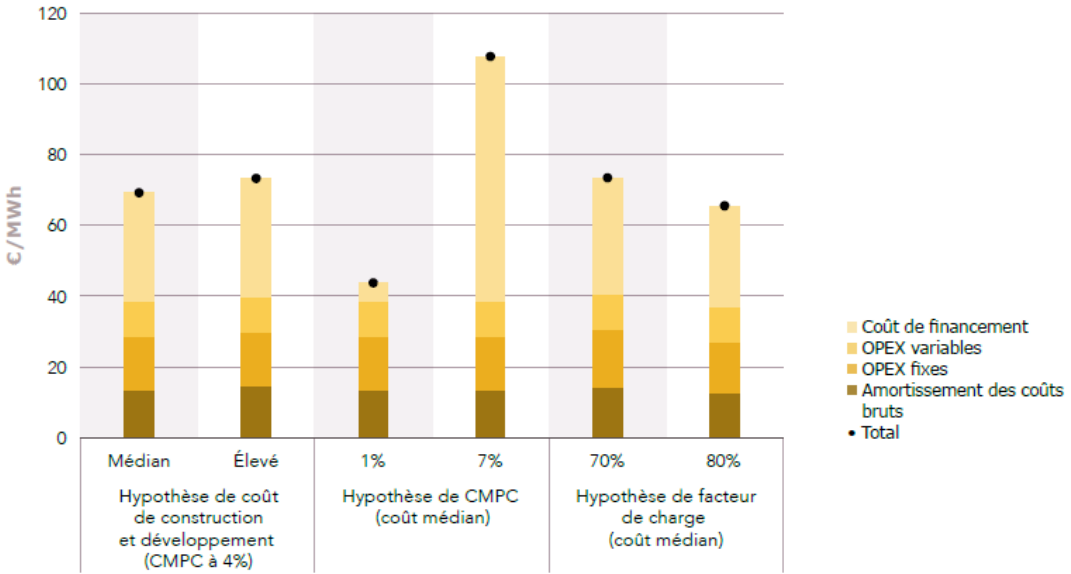
Si les centrales nucléaires devaient être financées par le privé, leur coût exploserait. Le risque de délais ou de non-achèvement est trop élevé pour le privé, qui réclamerait en échange des taux de rendement exorbitants.

Il faut donc faire l'hypothèse, pour justifier qu'un système avec du nucléaire neuf serait moins cher, que les nouveaux réacteurs seront essentiellement financés par de l'argent public.

Par contraste, les énergies éolienne et solaire, qui bénéficient de contrats d'achat à long terme par EDF, sont financés par des fonds privés. C'est moins de dette publique…

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

1.7 Coût complet de production du nouveau nucléaire selon l'hypothèse de coût d'investissement, de coût moyen pondéré du capital ou de facteur de charge



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

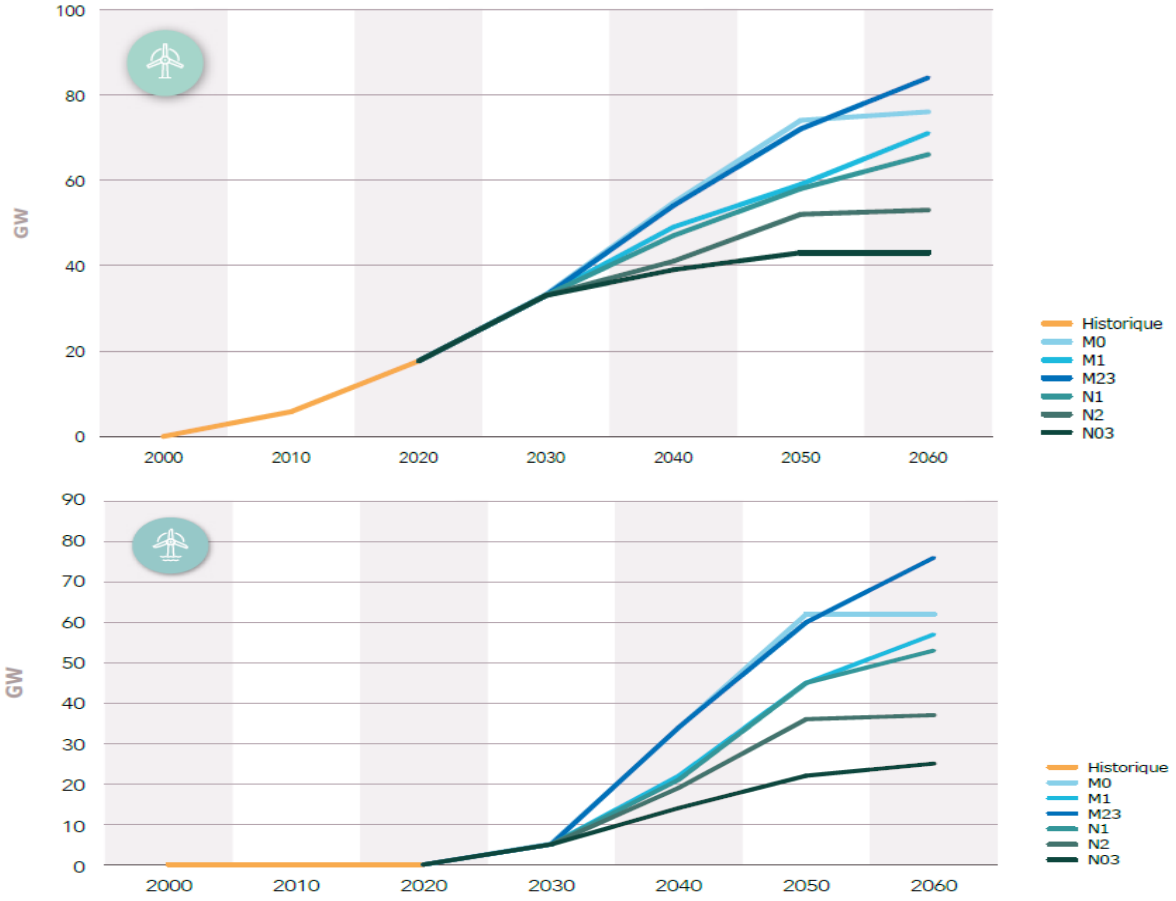
L'éolien terrestre selon les scénarios: entre 40 et 80 GW, soit x2 et x4

Tous les scénarios de RTE reposent sur une augmentation de la capacité éolienne à terre.

Une multiplication par trois et demi ou quatre pour les scénarios sans nucléaire neuf et le scénario N1, par deux et demi pour le scénario N2, par deux pour le scénario N03.

Si on ajoute les capacités éoliennes en mer, on voit que la capacité éolienne totale doit être multipliée par quatre au minimum, et jusqu'à sept ou plus, selon les scénarios

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Répartition des éoliennes terrestres et maritimes selon les scénarios

Si le Grand Est et les Hauts de France restent des terres d'élection pour l'éolien terrestre, toutes les régions contribueront.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Capacités éoliennes installées par région

M0 (75 GW terr. + 62 GW en mer)

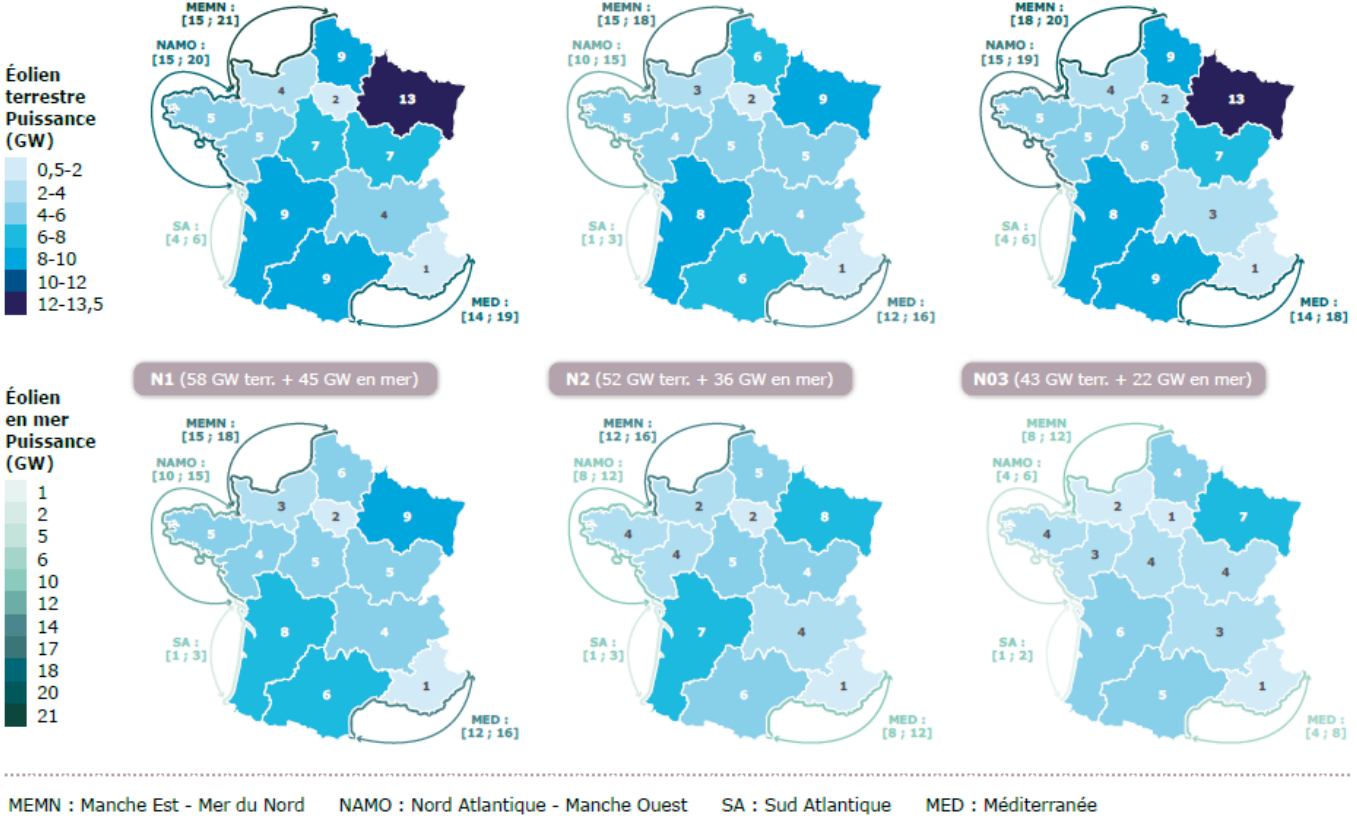
M1 (59 GW terr. + 45 GW en mer)

M23 (72 GW terr. + 60 GW en mer)

N1 (58 GW terr. + 45 GW en mer)

N2 (52 GW terr. + 36 GW en mer)

N03 (43 GW terr. + 22 GW en mer)



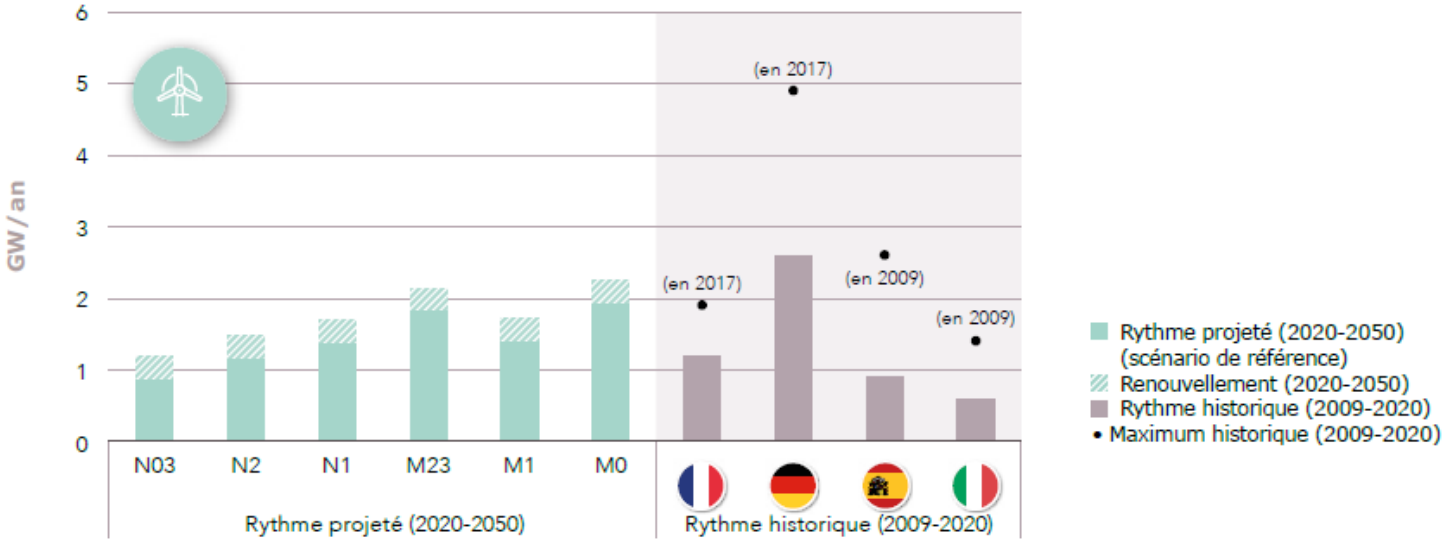
Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Le rythme du développement de l'éolien dans les six scénarios

Le rythme nécessaire de construction de l'éolien terrestre n'a rien d'extrême – 2 GW par an dans les scénarios M0 et M23, comme en 2017 en France… ou sur la période 2009-2020 en Allemagne.

Il n'y a surtout aucune bonne raison de ralentir, aux prix actuels de l'électricité en Europe, et alors que d'éventuels nouveaux réacteurs nucléaires ne produiront rien avant 2035 au plus tôt.

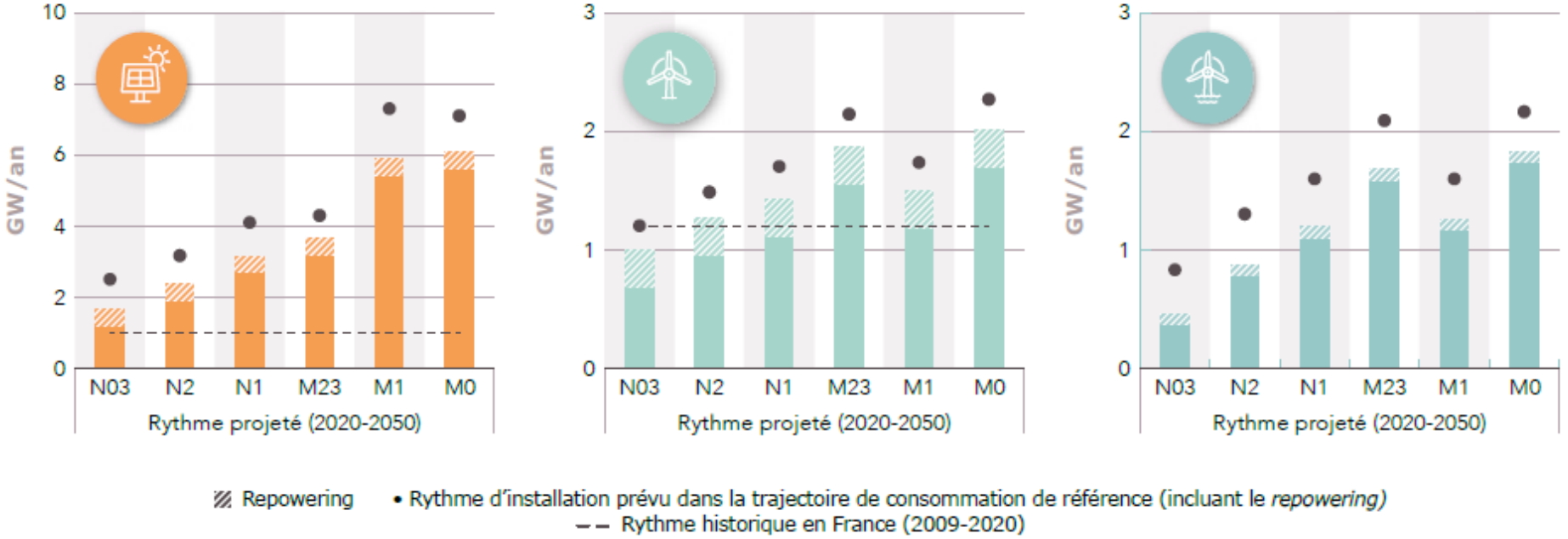
Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 20

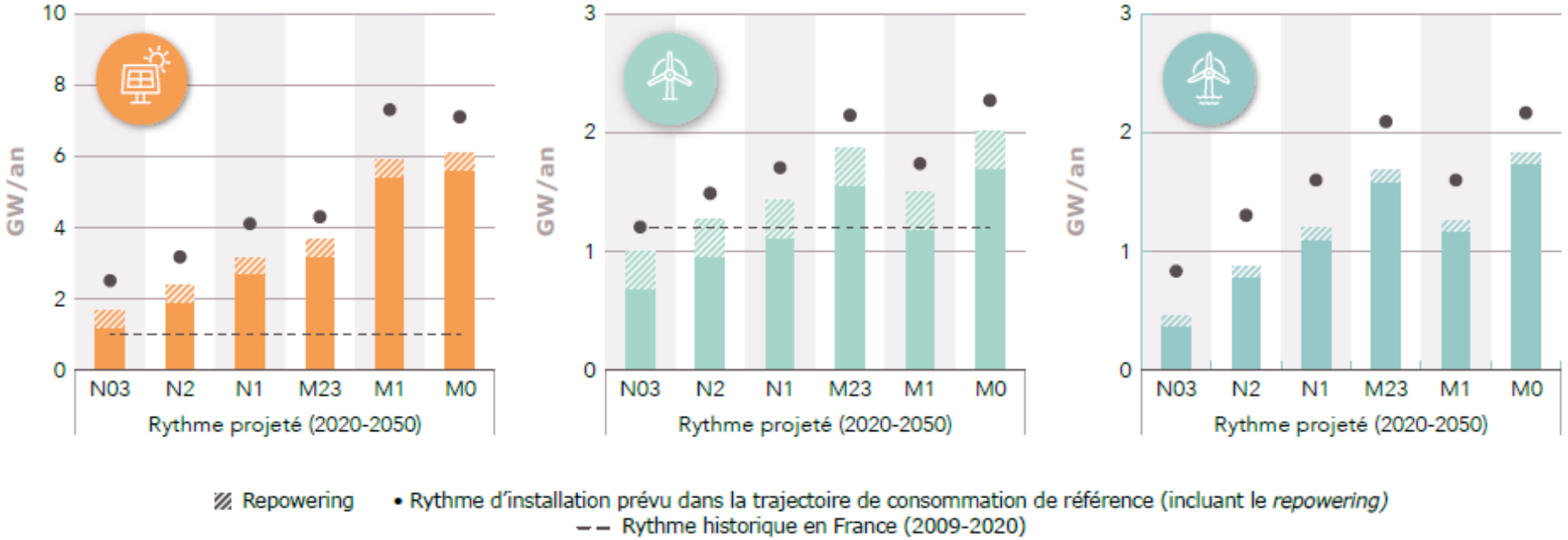
Même dans un scénario plus sobre, il faut accélérer le rythme



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert 2

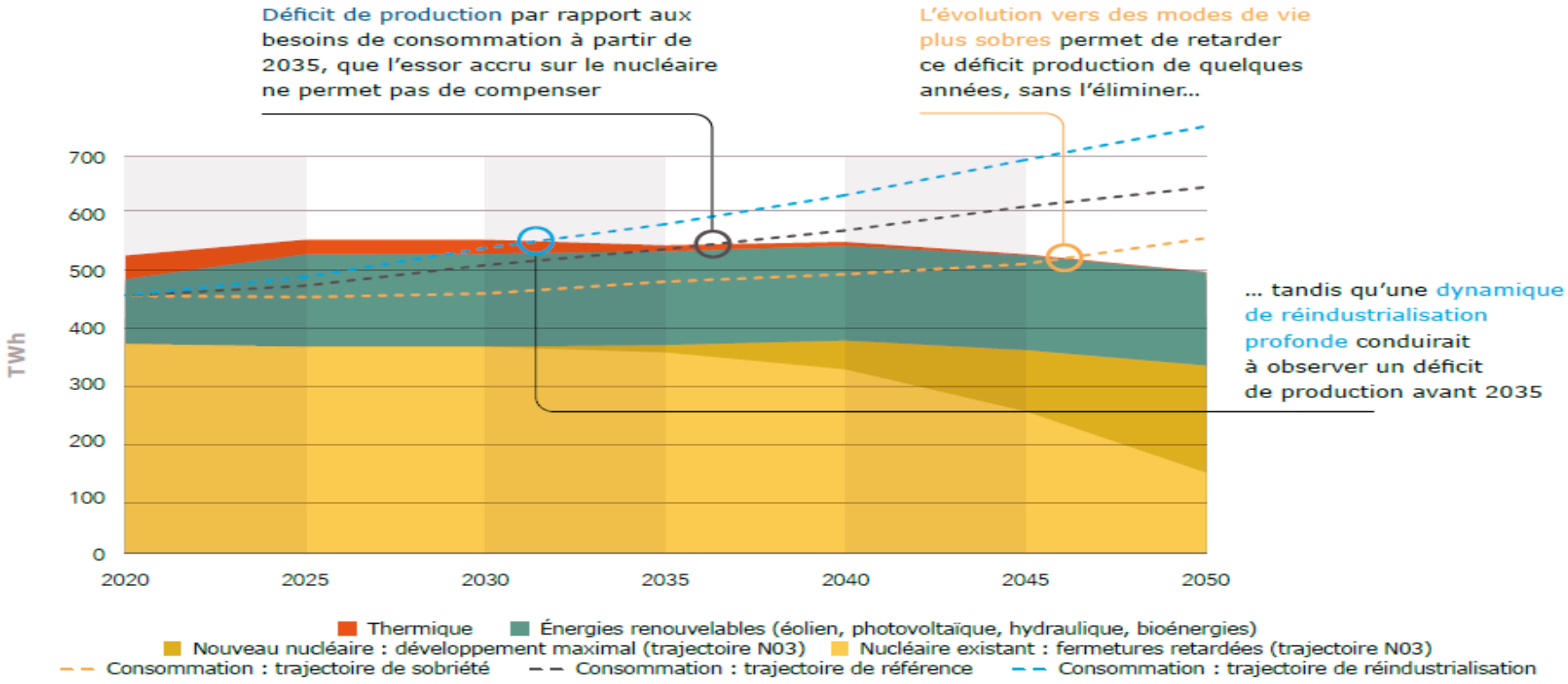
Si on vise la réindustrialisation, il faut accélérer encore plus



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibe

Arrêter le développement des renouvelables conduit à l'impasse



Il y a (presque) toujours du vent quelque part

Chapitre 4

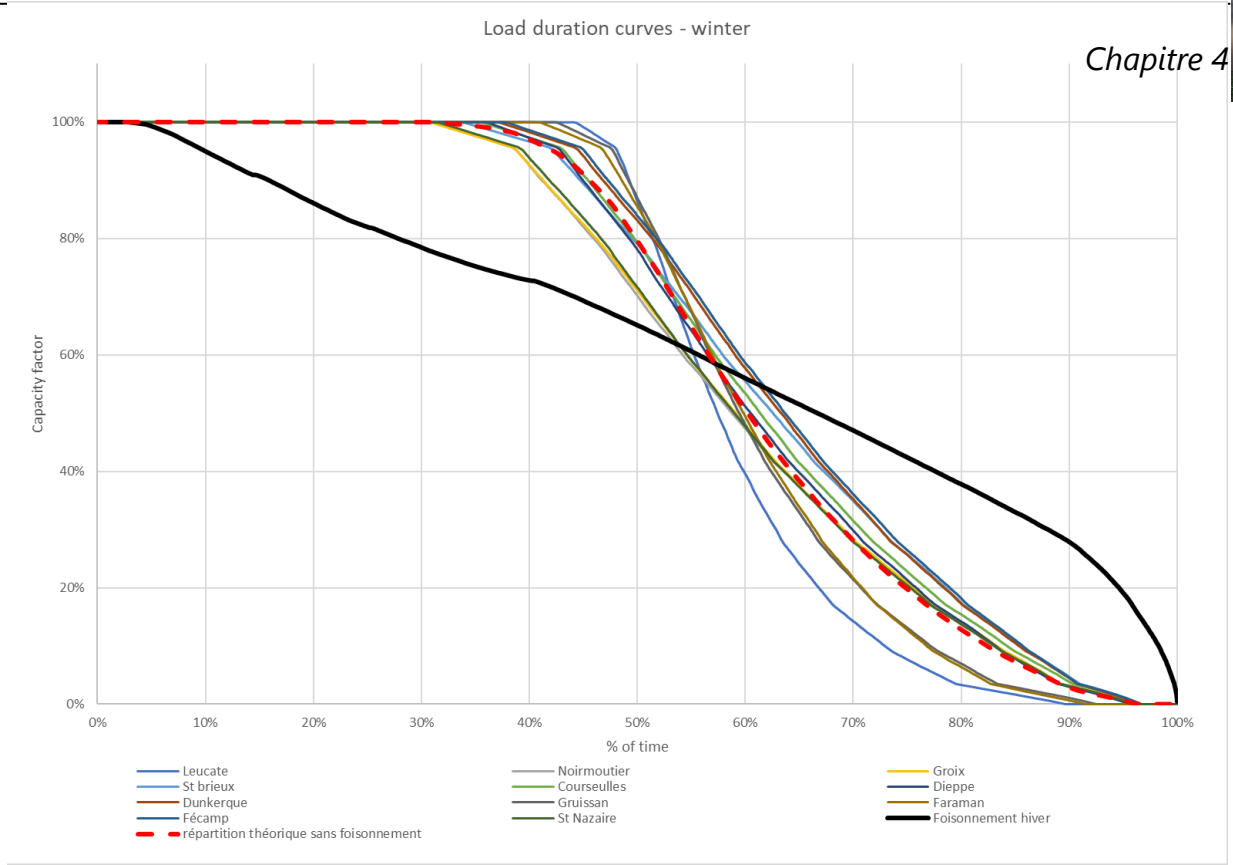
A l'échelle des 3 façades françaises (Manche, Atlantique, Méditerranée), les régimes de vent sont complémentaires au niveau temporel, entrainant un foisonnement de la production éolienne.

Ainsi, sur l'année, les statistiques montrent qu'un parc éolien réparti entre les façades produirait plus de 20% de sa puissance installée durant 90% du temps, ce ratio montant à près de 30% en période hivernale.

Plus la zone considérée est grande, plus le foisonnement est important: c'est tout l'intérêt des interconnections avec nos voisins européens.

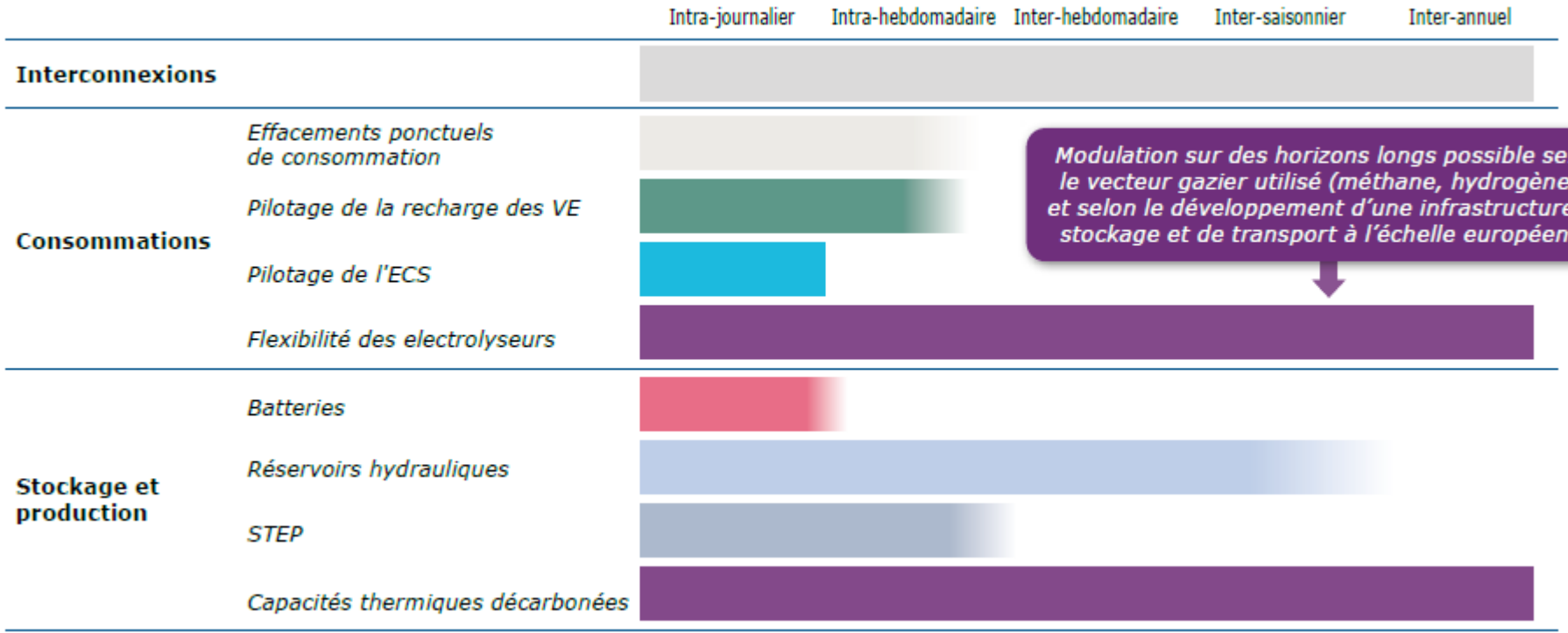
Par ailleurs, le solaire et le vent sont assez complémentaires.

Source: Engie Green, 2020



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

La variabilité de l'éolien et du solaire nécessite des flexibilités



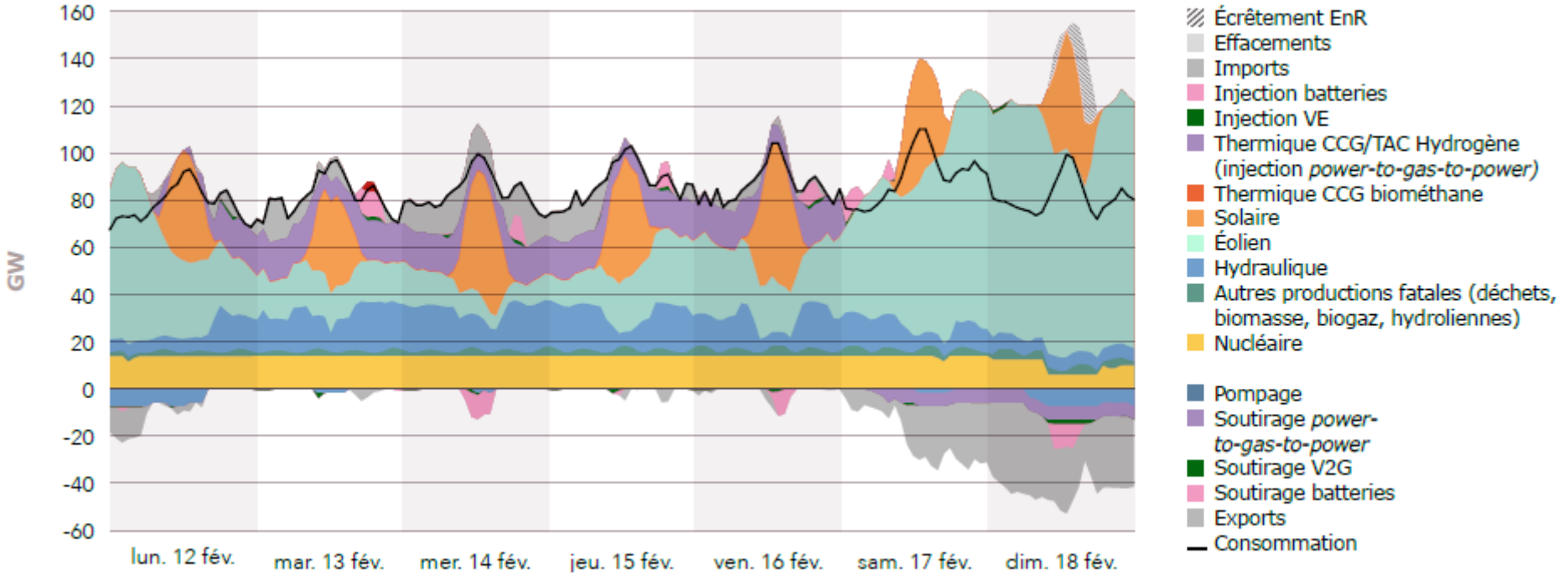
Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philib

La variabilité de l'éolien et du solaire nécessite des flexibilités

Chapitre 4

Configuration avec peu de vent pendant la deuxième semaine de février, dans le scénario M23 en 2050



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric Philibert

Il faudra des centrales thermiques, fonctionnant peu souvent

Chapitre 4

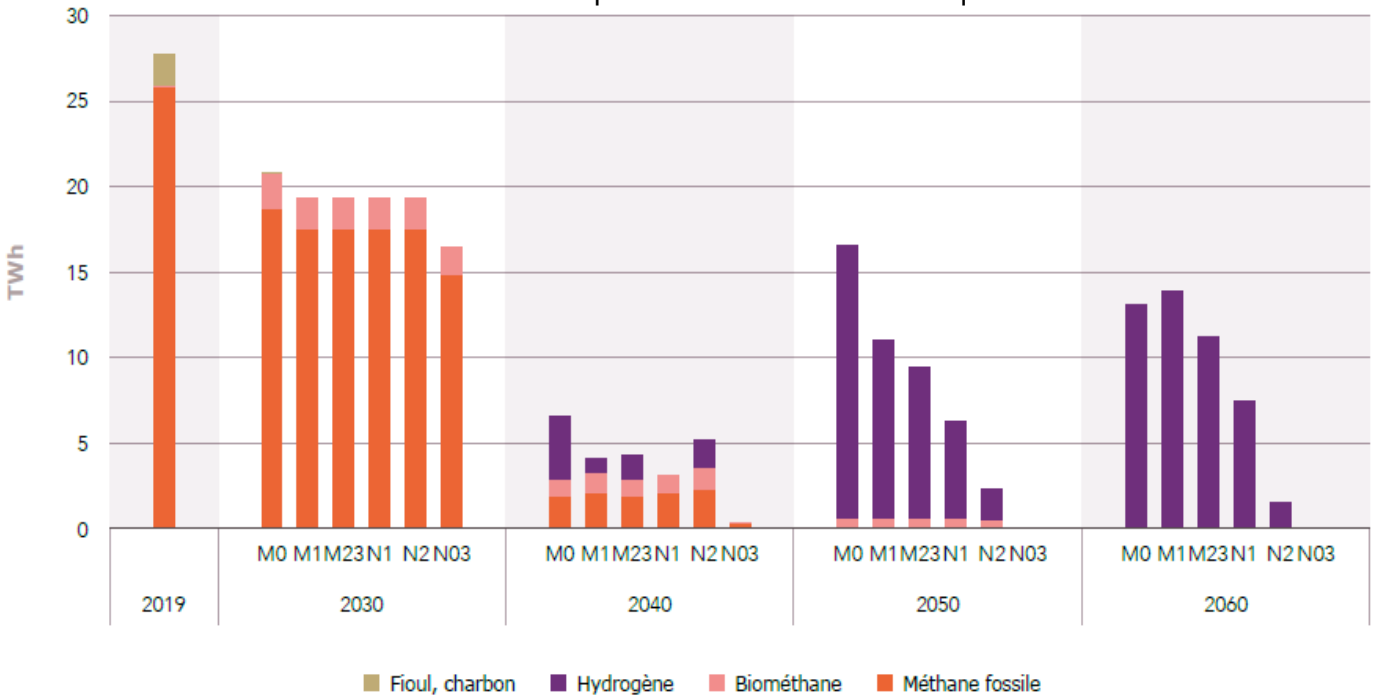
Les flexibilités de « court terme » ne suffiront pas dans toutes les situations.

Des périodes hivernales avec peu de vent et de soleil pendant plusieurs jours amèneront à utiliser des centrales thermiques, à gaz fossile dans un premier temps (mais déjà moins qu'aujourd'hui…), et brûlant de l'hydrogène bas-carbone (renouvelable dans les scénarios M) ensuite.

Elles fourniront au total jusqu'à 17 TWh, pour une consommation de 645 TWh, soit 2,5% de la consommation.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Production d'électricité à partir de centrales thermiques à flamme



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Un système 100% renouvelables est possible

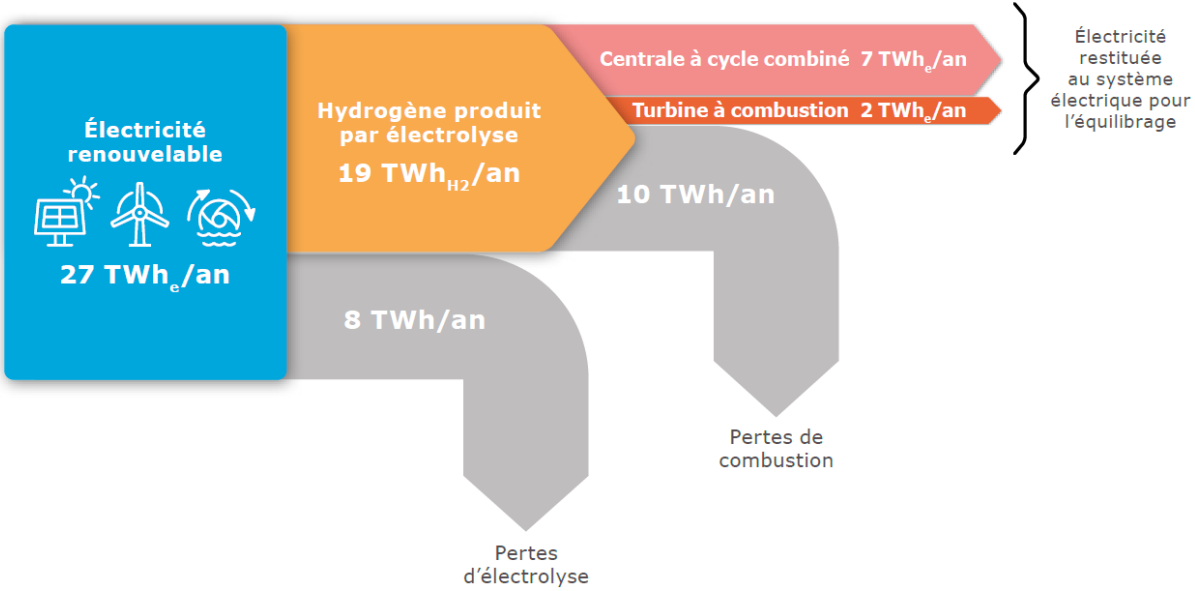
Chapitre 4

Ce diagramme illustre le fonctionnement de la production d'électricité thermique à partir d'hydrogène

(les valeurs correspondent au scénario M23 2050 dans une configuration de système hydrogène flexible).

Dans un système approchant de 100% d'électricité renouvelable, provenant en bonne part de sources variables comme l'éolien et le solaire, des surplus non négligeables d'énergie deviennent disponibles à certaines périodes (en général l'été), des déficits apparaissent à d'autres moments (en général l'hiver).

Le rendement de ce stockage n'est pas très élevé – mais il ne s'agit que de quantités minimes.



Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

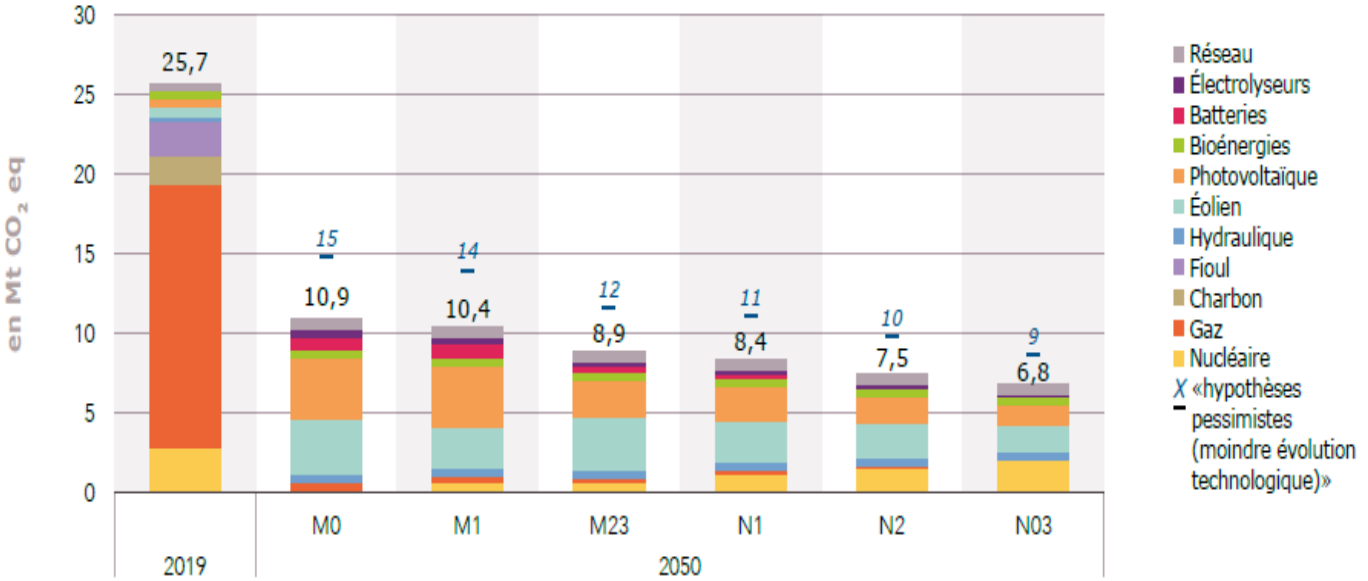
Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Emissions de CO_2 du cycle de vie des divers scénarios en 2050

Chapitre 5

Si les émissions directes de CO_2 de la production électrique sont les mêmes dans tous les scénarios à l'horizon 2050, ce n'est plus tout à fait vrai pour les émissions liées au cycle de vie: les scénarios avec nucléaire font très légèrement mieux. Mais les différences entre scénarios sont extrêmement faibles, non seulement par comparaison avec les émissions actuelles, mais bien plus encore à l'échelle des émissions de l'économie tout entière, et aux réductions permises par l'électrification des bâtiments, de l'industrie et des transports.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

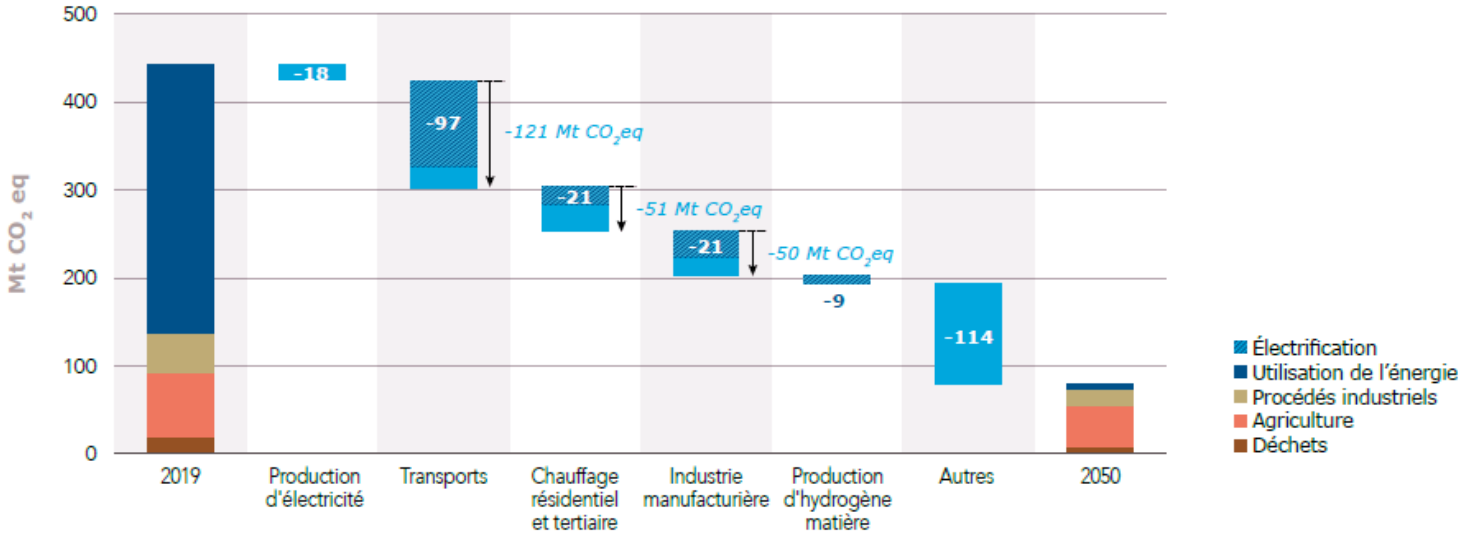


Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Évolution des émissions de gaz à effet de serre territoriales de la France

A elle seule, l'électrification réduit les émissions du pays de près de 140 millions de tonnes de CO_2.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



VB : la catégorie «Autres» regroupe la baisse des émissions liées à l'agriculture, au traitement des déchets, aux procédés industriels et le reste des émissions iées à l'énergie dans le secteur du bâtiment (équipements domestiques, cuisson, etc.) et le secteur de la construction

Cédric Philibert

Les besoins matériels de la transition énergétique

Chapitre 5

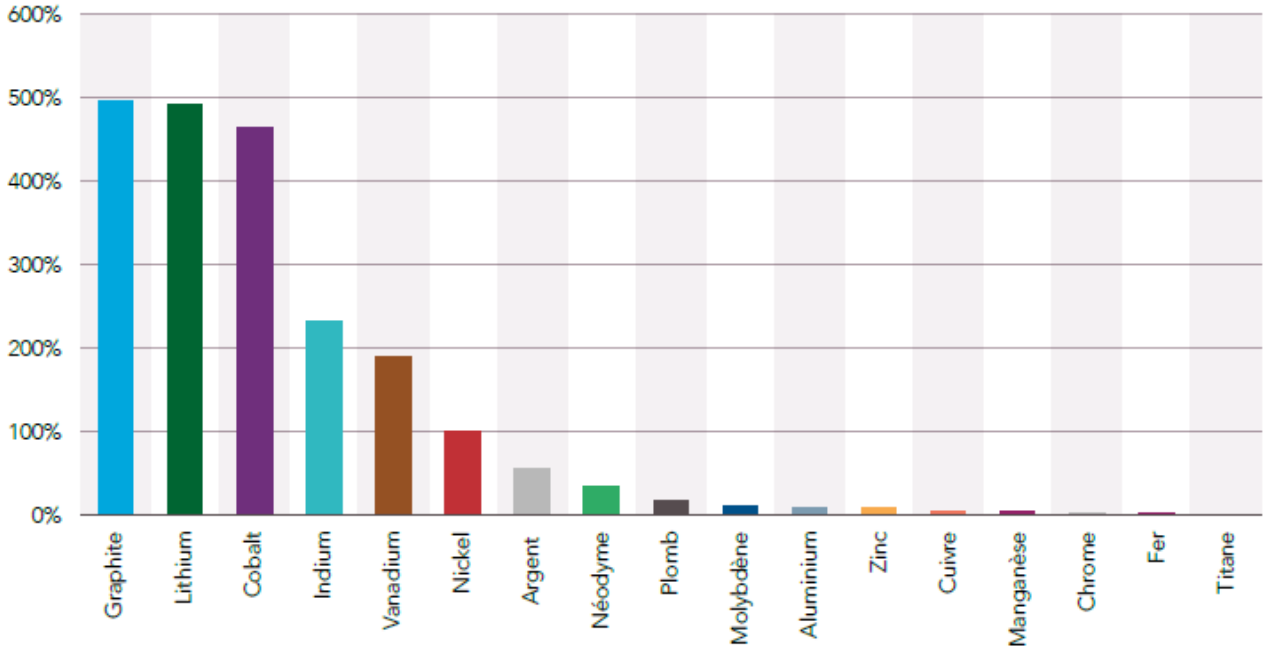
On entend beaucoup d'affirmations excessives quant aux besoins en matériaux, plus ou moins « critiques », de la transition énergétique.

Ces besoins viennent de l'électrification des véhicules bien davantage que de la production d'électricité.

La demande de graphite, lithium, cobalt, indium, vanadium et nickel va considérablement augmenter.

Il y a là un risque géopolitique: – la Chine ne contrôle pas ces ressources mais une large fraction de leur raffinage.

Demande annuelle en 2050 pour la production d'électricité et le stockage en pourcentage de la production de 2018 (scénario « 2° » de l'AIE)



Source: «Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition», World Bank group (2020)

Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Dans la transition énergétique, l'extraction minière diminue

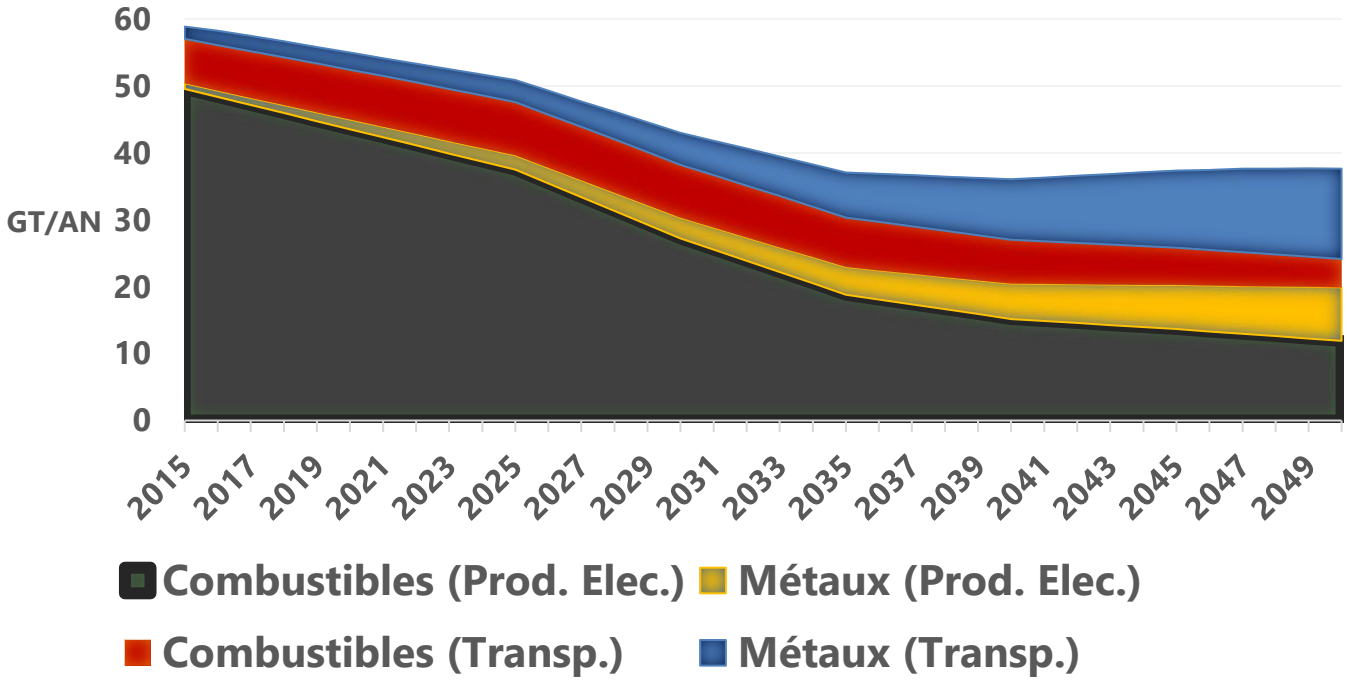
Chapitre 5

Contrairement à une idée reçue, les quantités totales de matériaux extraits n'augmentent pas dans la transition énergétique, mais diminuent.

C'est dû essentiellement à la formidable baisse de la consommation de charbon, dont on extrait encore 40 milliards de tonnes par an.

Les consommations de métaux sont bien moins importantes, et se mesurent en millions de tonnes – surtout pour les véhicules électriques. Même s'il faut extraire beaucoup de roches pour isoler ces métaux, au total l'extraction minière diminuera.

Source: Watari et al., 2021.

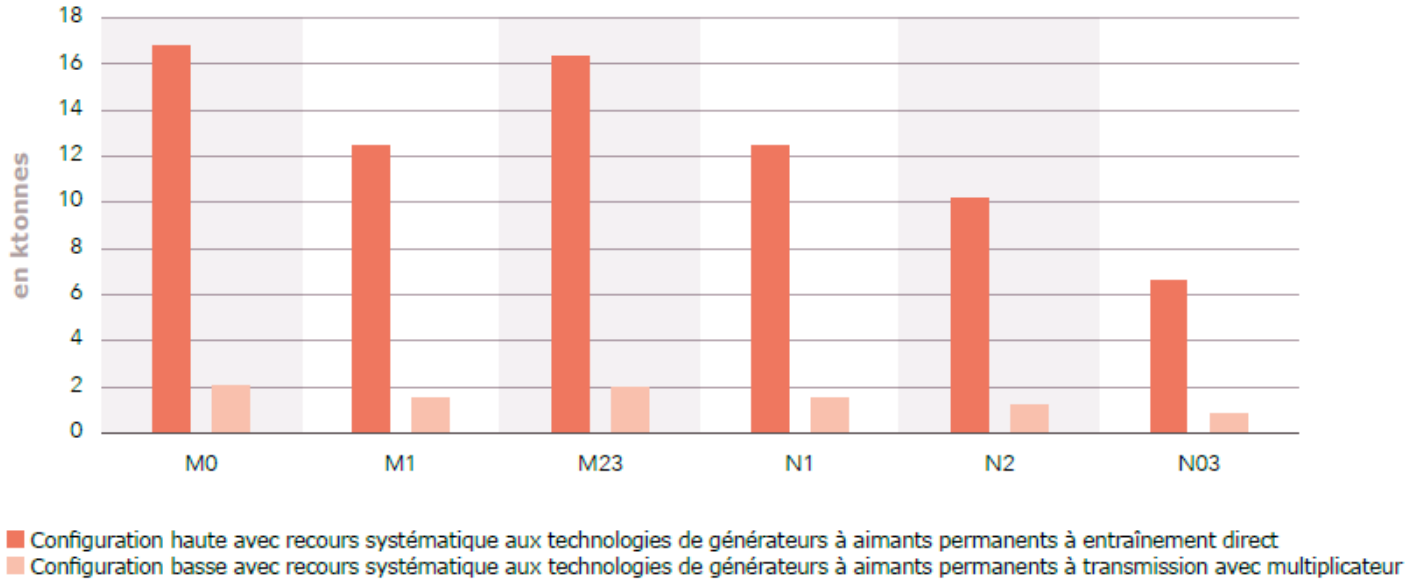


Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Consommation cumulée de terres rares (2020-2050) dans les éoliennes en mer

Chapitre 5

Les terres rares permettent de fabriquer des aimants permanents plus léger. On les trouve surtout dans les éoliennes en mer, où elles réduisent le risque de pannes en évitant le recours à des engrenages. Mais l'utilisation de terres rares n'est pas une nécessité absolue. On trouve des terres dans de très nombreuses autres applications industrielles, à commencer par le raffinage des produits pétroliers et les pots catalytiques des voitures…



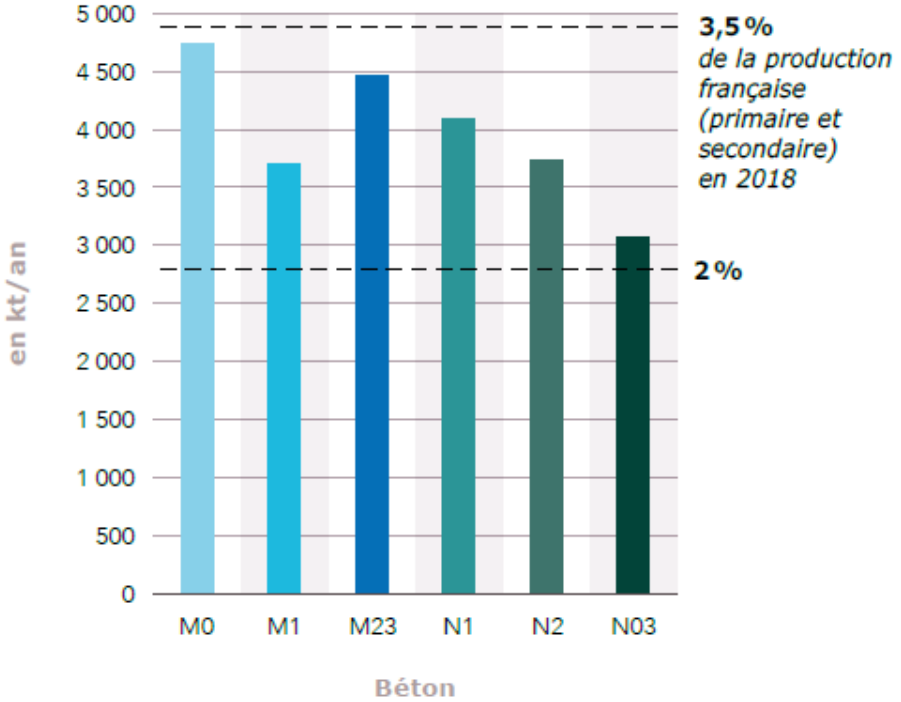
Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

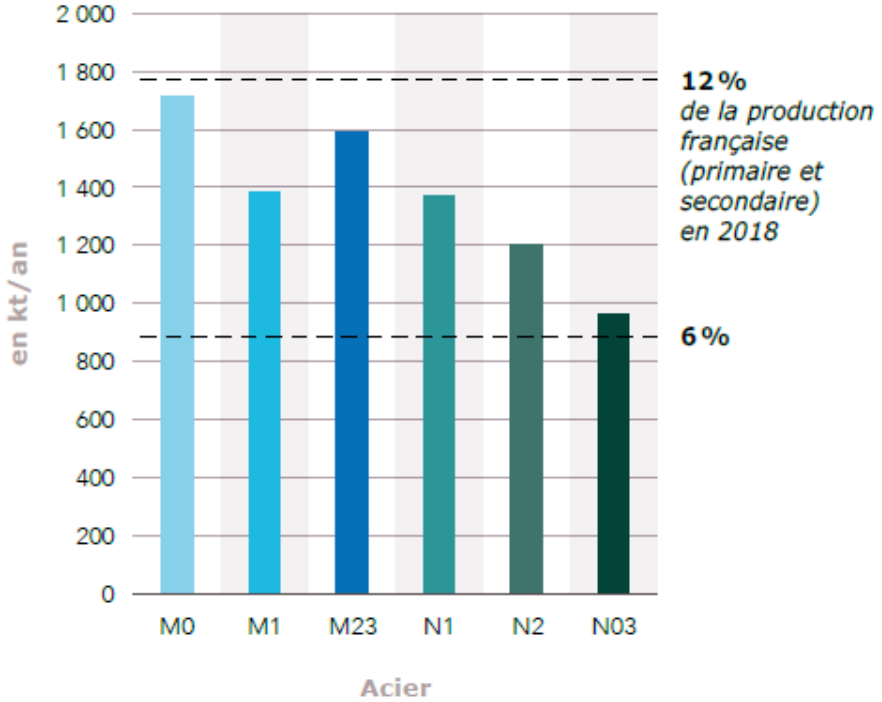
Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Le système électrique ne consomme qu'une fraction du béton et de l'acier

Chapitre 5

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



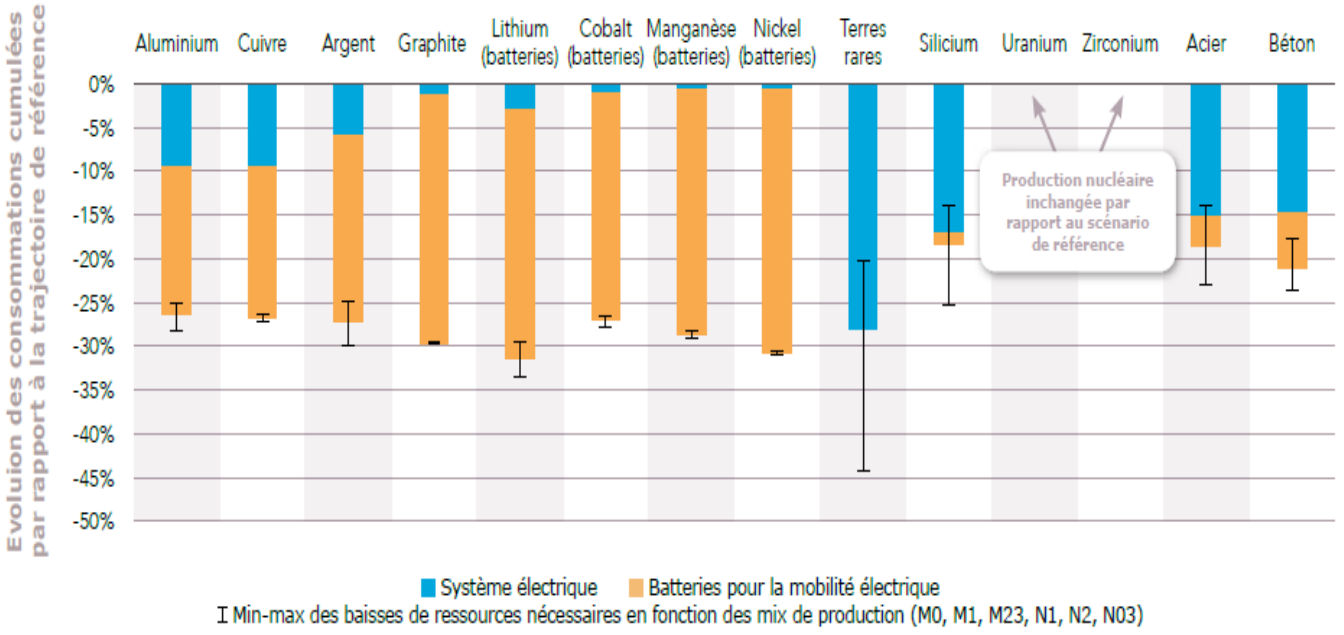


Les atouts de la sobriété

Chapitre 5

Un scénario plus sobre permet de consommer moins de ressources minérales. Pour les plus critiques, c'est l'électrification des transports qui en est la cause, davantage que la transformation de la production d'électricité.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



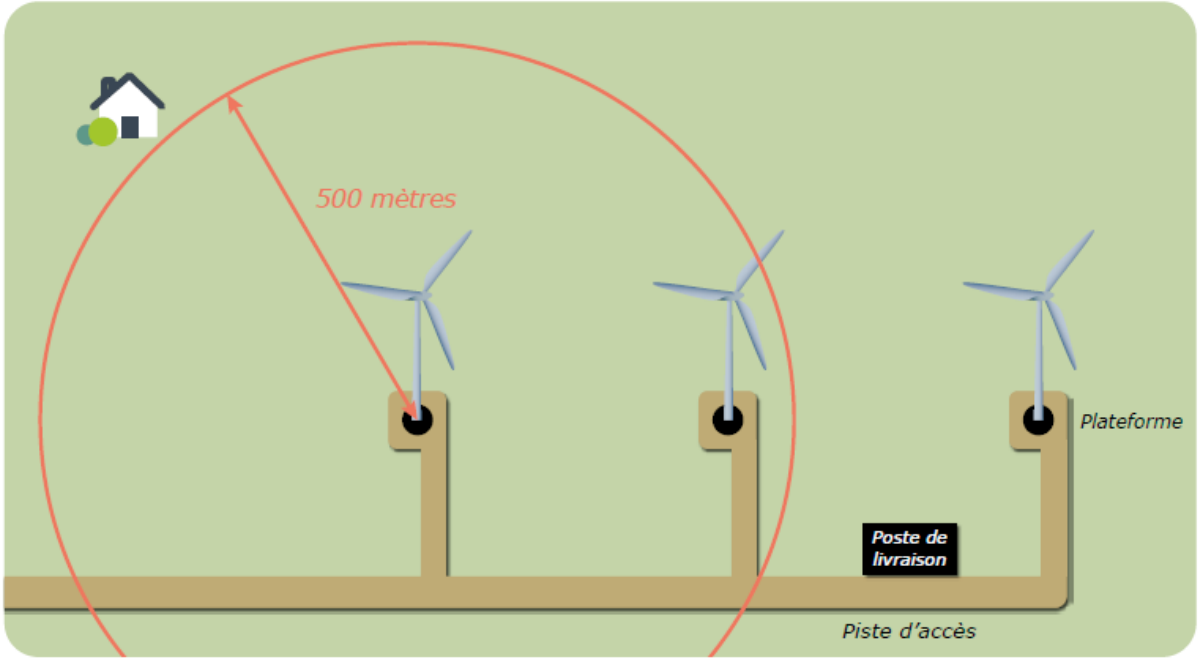
I Min-max des baisses de ressources nécessaires en fonction des mix de production (M0, M1, M23, N1, N2, N03)

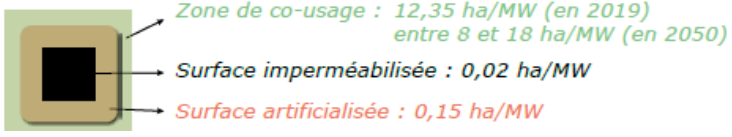
Clé de lecture : *les économies d'aluminium dans le scénario «sobriété» sont d'environ -25%. La baisse des besoins pour le système électrique permettent un baisse d'environ 10% tandis que la mobilité sobre permet d'éviter environ 15%. Selon les scénarios les économies d'aluminium, pour le système électrique et les batteries de la mobilité électrique, varient entre -25% et -28%*

Verticales, les éoliennes artificialisent très peu les sols

Chapitre 5

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050



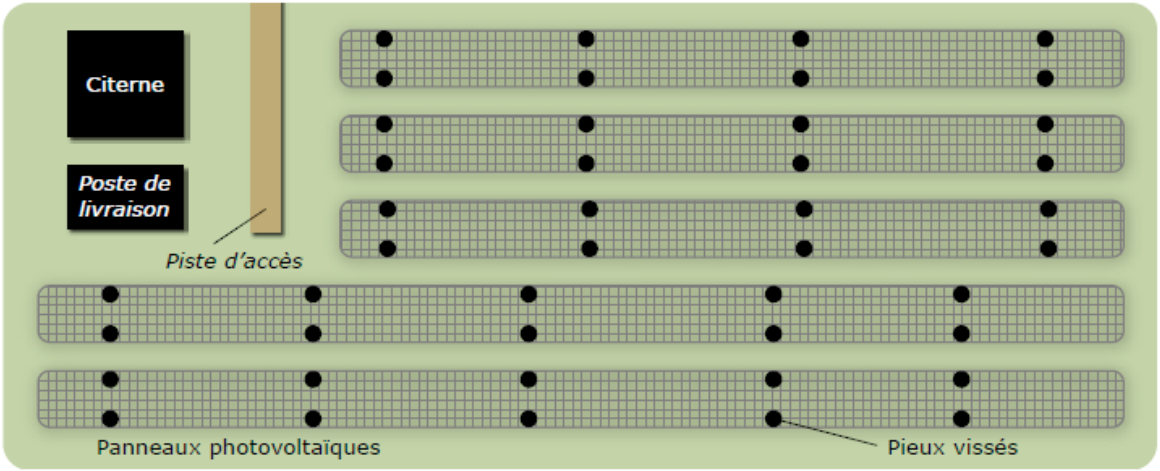


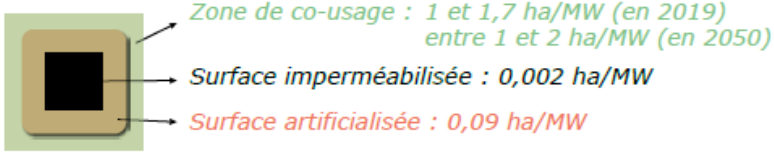
Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Les centrales solaires artificialisent encore moins les sols que les éoliennes

Chapitre 5

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050





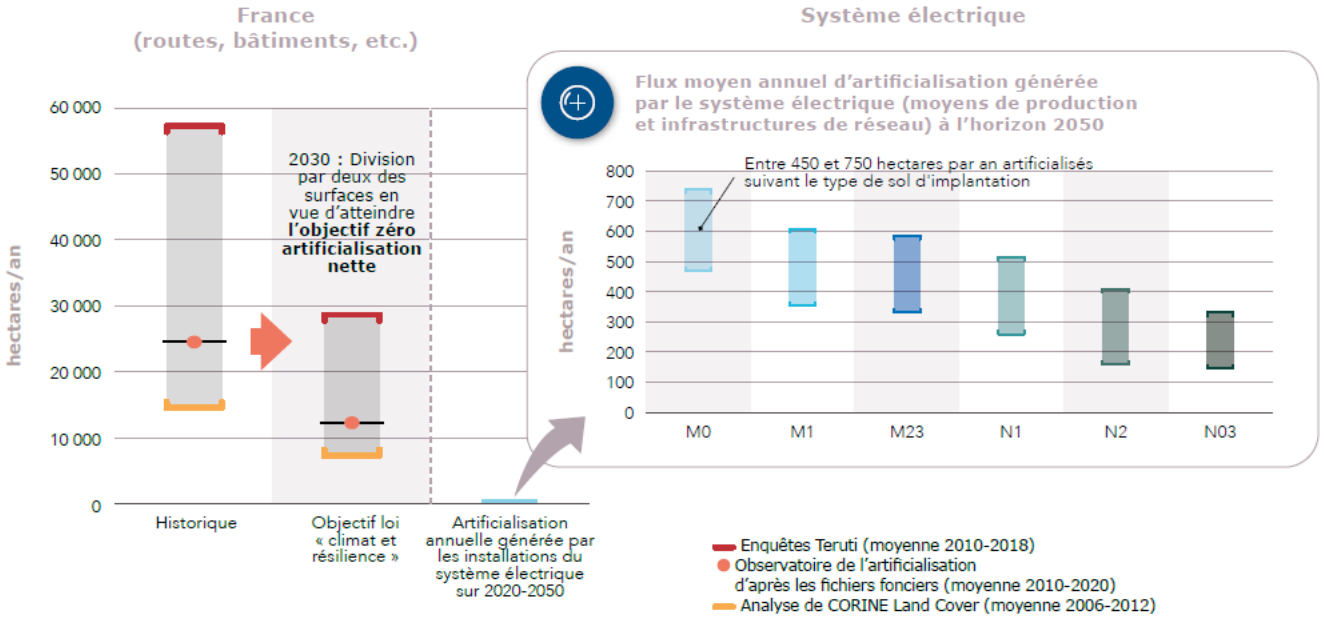
Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com

Le mythe de l'artificialisation

Chapitre 5

Les éoliennes et panneaux photovoltaïques ne constituent qu'une source tout à fait mineure d'artificialisation et d'imperméabilisation des sols, par comparaison avec les routes et autoroutes ou les bâtiments. Ceci est vrai même dans le scénario le plus ambitieux pour les renouvelables.

La désinformation grossit démesurément les inconvénients « environnementaux » des énergies renouvelables, qu'il s'agisse de la consommation de matériaux, de l'occupation des sols ou de la biodiversité.



Source : CEREMA, 2021, «Les déterminants de la consommation d'espaces».
Nota bene : le volume d'artificialisation varie selon la méthode d'évaluation (fichiers fonciers, enquêtes par sondage).
Conformément à la convention prévue par la loi «climat et résilience», la surface sous les panneaux photovoltaïques n'est ici pas comptabilisée dans les surfaces artificialisées.

Source: RTE, Futurs énergétiques 2050

Cédric

En 2022, l'éolien et le solaire ont produit en Europe plus d'électricité que le gaz

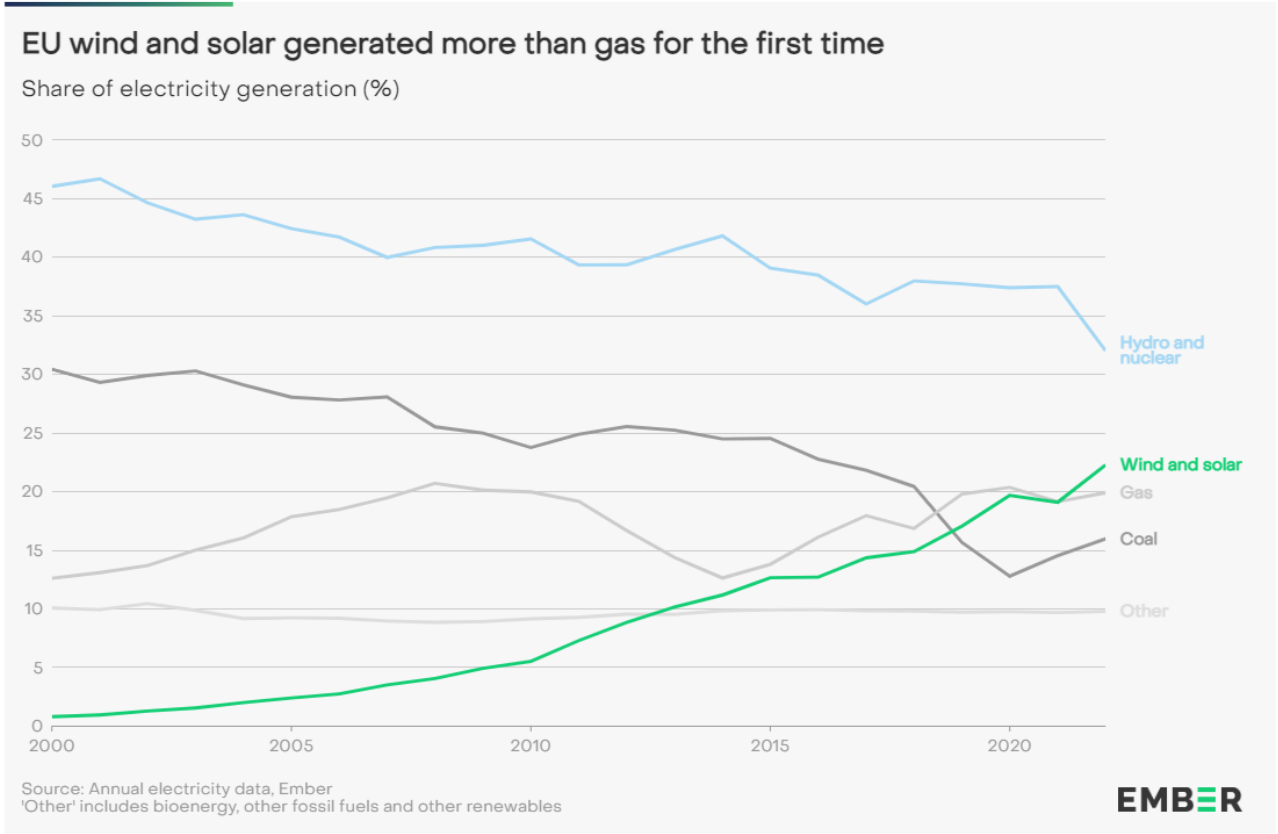
Conclusion

Grâce à un record d'installation de 41 GW en 2022, la production solaire a augmenté de 39 TWh cette année, contribuant à réduire de 10 milliards d'euros les achats de gaz.

Pour la première fois, le solaire et l'éolien ont produit plus d'un cinquième de la consommation d'électricité en Europe, advantage que le gaz.

L'Europe et le monde entier accélèrent fortement: l'AIE a révisé ses projections d'il y a deux ans de plus de 70%!

La France, pendant ce temps, se partage entre ceux qui ne rêvent que de nouveaux réacteurs, et ceux qui estiment que la sobriété répondra à tous nos besoins…



Cédric Philibert 2023, tous droits réservés. cedricphilibert.com