

Cycle de vie, impacts et filières

des installations de production d'énergie renouvelable

ADEME Bourgogne-Franche-Comté
Bertrand Aucordonnier

Rappel et pourquoi parler autant d'électricité ?

Consommation d'énergie finale en France en 2020 :

Produits pétroliers : 692 TWh – 48%

Gaz naturel : 325 TWh – 23%

Electricité : 410 TWh – 29%

Rappel et pourquoi parler autant d'électricité ?

Exercices prospectifs 2050 : Scénario Négawatt / ADEME Transition(s) 2050 / RTE futurs énergétiques 2050

→ Comment atteindre la neutralité carbone en 2050

Rappel et pourquoi parler autant d'électricité ?

Evolution de l'électricité dans les scénarios prospectifs à 2050

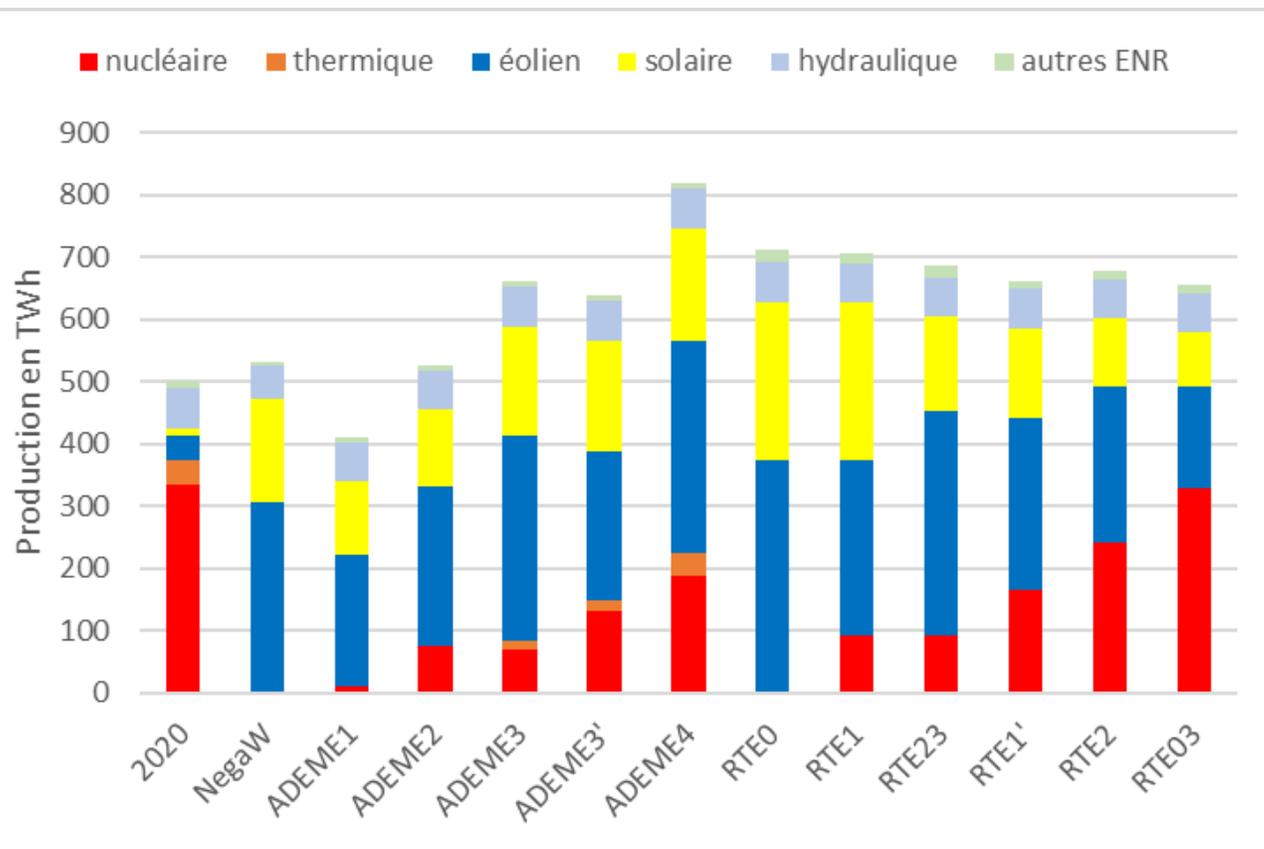
	2020	NegaW	ADEME S1	ADEME S2	ADEME S3	ADEME S4
Consommation finale en TWh	1 633	925	790	833	1 074	1 360
Electricité en TWh	410	459	408	537	656	839
Electricité en %	25%	50%	52%	64%	61%	62%

Ne pas oublier :

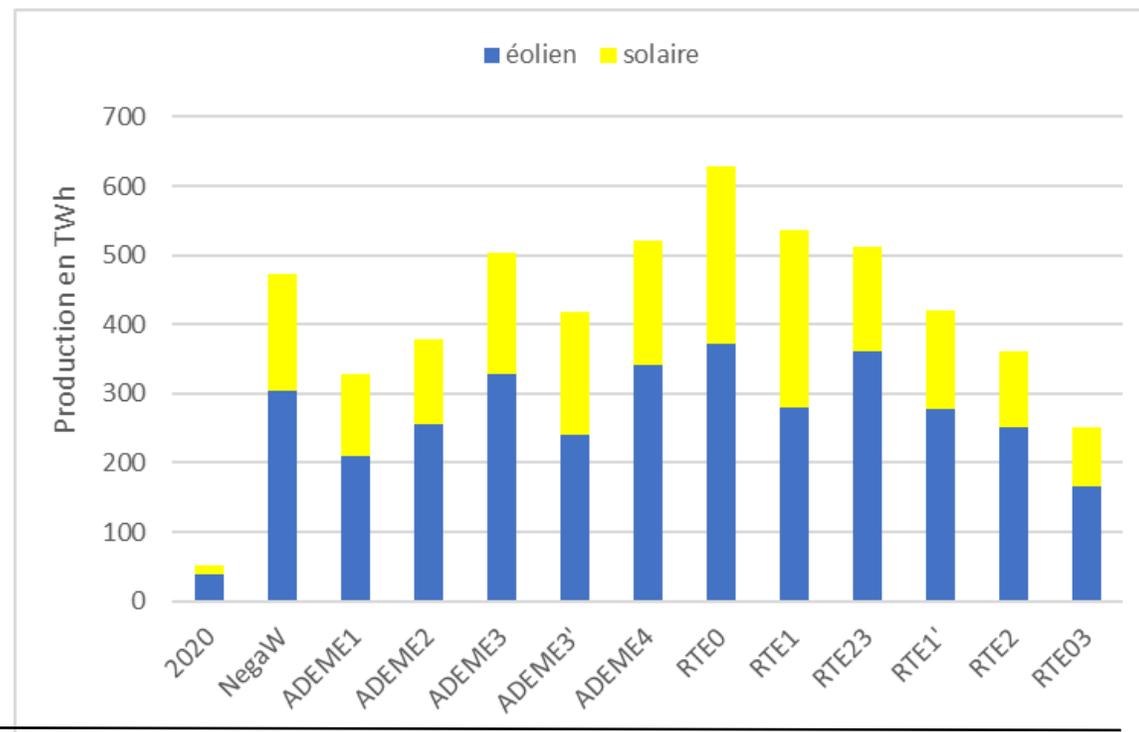
- La nécessaire diminution de nos consommations et la sobriété énergétique
- Les autres sources d'énergie renouvelable à développer (biomasse, biogaz...)

Un peu de prospective décarbonnée...

Mix électrique des différents scénarios en 2050



Evolution de l'éolien et du PV



Source: année 2020 - SDES, Chiffres clés de l'énergie Édition 2021 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2021>

Scénario Negawatt 2022 : <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>

Scénario ADEME Transition(s) 2050 : <https://transitions2050.ademe.fr/>

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

Quels impacts des ENR – cas de l'éolien et du PV

Quel impact des ENR – cas de l'éolien et du PV

Production de béton en France en 2018 : 140 000 000 tonnes

Une éolienne terrestre : entre 800 et 1500 tonnes de béton

Aujourd'hui : 8 000 éoliennes en France soit théoriquement 12 000 000 tonnes

→ Sur ces 20 dernières années : 0,4% de la production

→ 12 000 éoliennes terrestre supplémentaire d'ici 2050 : entre 1 et 2% de la consommation de béton par an d'ici 2050.

Le secteur de bâtiment est le premier consommateur de béton.

Par comparaison : un EPR = 768 000 t soit 1 250 éoliennes

Stockage des déchets radioactifs de Bure = 11 520 000 tonnes soit 14 000 éoliennes

Quel impact des ENR – cas de l'éolien et du PV

Seules 30% environ des éoliennes terrestres utilisent aujourd'hui des terres rares mais 100% des éoliennes en mer.

Les ressources en terres rares ne sont pas rares mais les réserves sont situées uniquement dans quelques pays (dont la Chine).

Terres rares (néodyme et dysprosium) = 0,01% du poids d'une éolienne

Il existe d'autres types d'aimant d'éolienne sans terres rares mais un peu moins performant pour l'instant donc des solutions existent pour s'en passer.

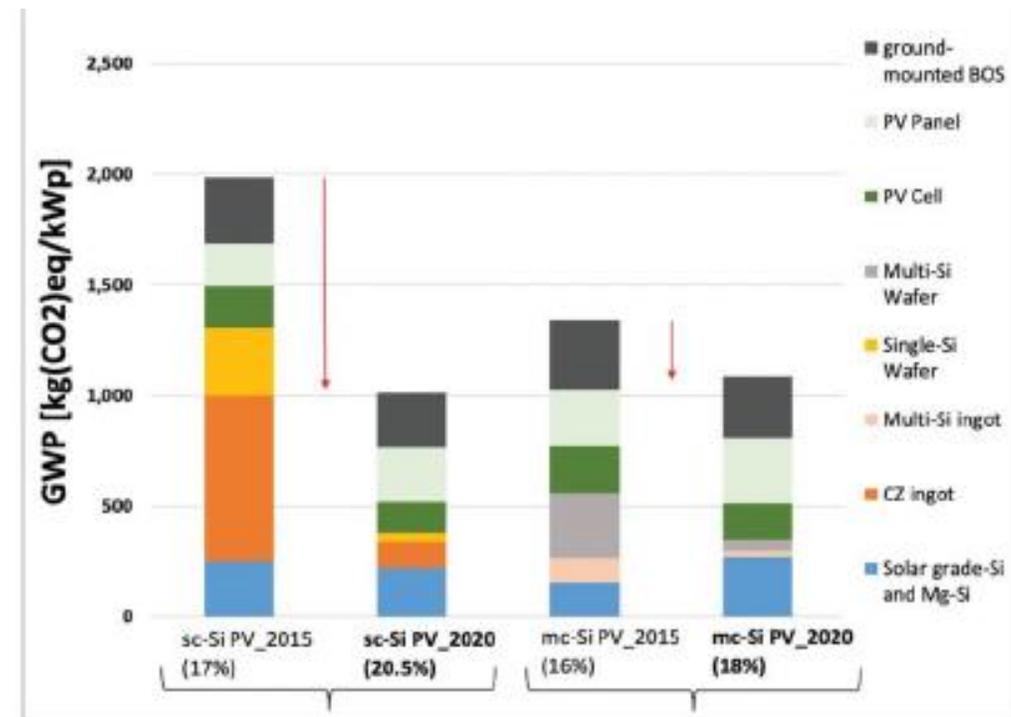
À noter, il n'y a pas de terres rares dans les panneaux photovoltaïques que l'on pose sur les toits ou les sols.

Quel impact des ENR – cas de l'éolien et du PV

Forte amélioration du bilan des panneaux PV :

Dans tous les cas, le bilan GES global est largement favorable par rapport aux fossiles :

- Charbon : 1058 gCO₂/kWh
- Gaz : 418 g
- Photovoltaïque : 32 g
- Eolien : 14 g
- Nucléaire : 6 et 32 g selon le périmètre pris en compte



Source :Fthenakis , Vasilis & Leccisi , Enrica. (2021). Updated sustainability status of crystalline silicon-based photovoltaic systems : Life-cycle energy and environmental impact reduction trends . Progress in Photovoltaics : Research and Applications. 10.1002/pip.3441.

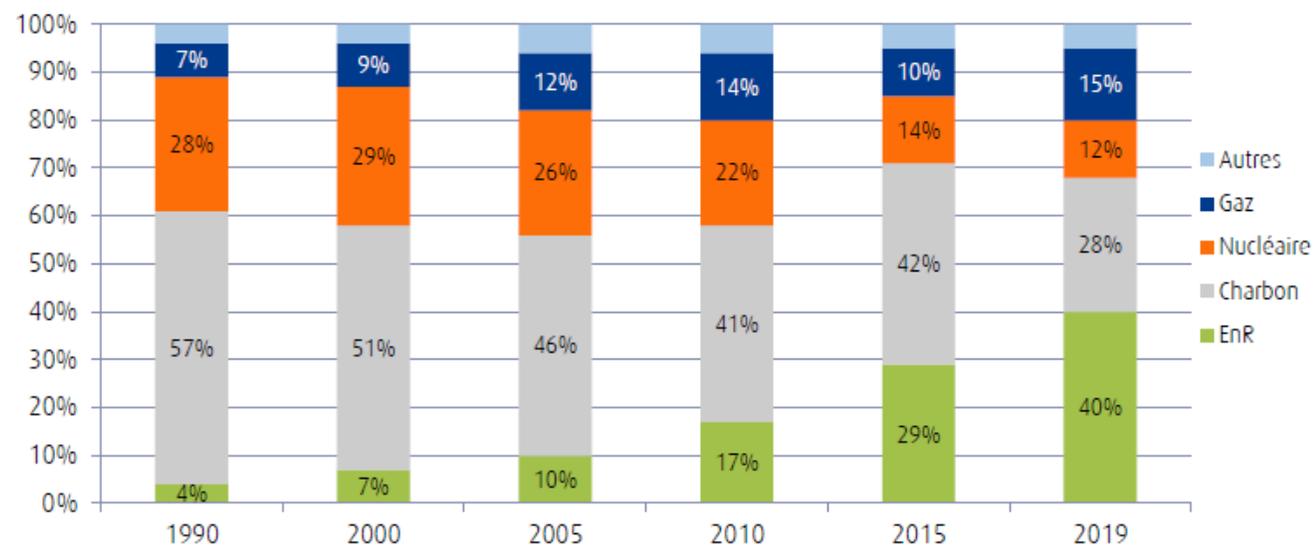
Quel impact des ENR – cas de l'éolien et du PV

Entre 1990 et 2019, les ENR sont passés de 4 à 40% dans le mix électrique allemand
le gaz de 7 à 15%
mais le charbon de 57 à 28% et le nucléaire de 28 à 12%

→ Diminution de 54% des émissions de GES du secteur énergétique

Un développement important des ENR variables
ne nécessite pas un recours accru
aux énergies fossiles en parallèle.

Evolution du mix électrique en Allemagne



Fabrication, filière et recyclage

Eolien et PV

Fabrication, filière et recyclage des ENR - éolien

- Une dizaine de constructeurs de turbines en France qui représente plus de 80 % de la puissance totale installée. Les constructeurs de machines présents sur le marché français appartiennent exclusivement à l'Union européenne.
- Activité locale lors de l'implantation d'éoliennes : terrassement, VRD, fourniture de béton, raccordement au réseau public, etc.
- En 2020 : 20 200 emplois directs et indirects en augmentation de plus de 25 % depuis 2016
- Des matériaux principalement français et européens en tonnage

1 éolienne = 1 200 tonnes modèle Vestas V110 de 2 MW	
76%	béton pour fondation
19%	acier les fondations et mâts
2,3%	matériaux polymère pour pâle et nacelle
0,6%	aluminium et alliages
1,2%	fibres de verre (pâles)
0,3%	cuivre et alliage
0,15%	électronique
0,12%	huile et liquide de refroidissement
0,01%	aimants

Fabrication, filière et recyclage des ENR - éolien

Recyclage de l'éolien :

- Plus de 90% d'une éolienne est recyclable avec des filières en place : béton, acier, cuivre, aluminium
 - Seules les pâles sont difficilement recyclées aujourd'hui car composées de matériaux composites (fibre de verre ou de carbone)
- Déchets non dangereux utilisés comme combustible solide de récupération aujourd'hui

A noter :

- Règlementation de plus en plus exigeante
- Peu d'éoliennes en fin de vie aujourd'hui
- Des avancés technologiques importantes et rapides pour arriver à des éoliennes 100% recyclables

Fabrication, filière et recyclage des ENR - éolien



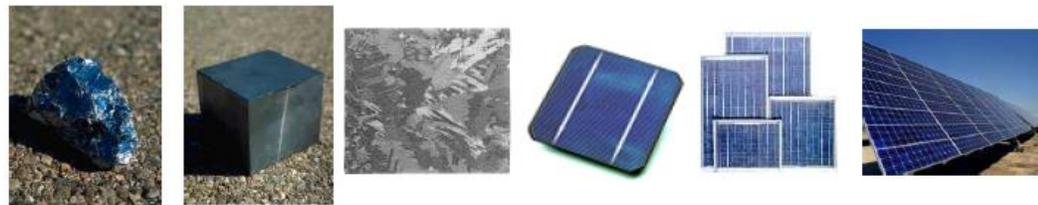
Eolienne avec mât en bois à Essey-les-Ponts (52) , société Innovent
<https://innovent.fr/2021/08/30/innovent-monte-son-2e-mat-en-bois/>



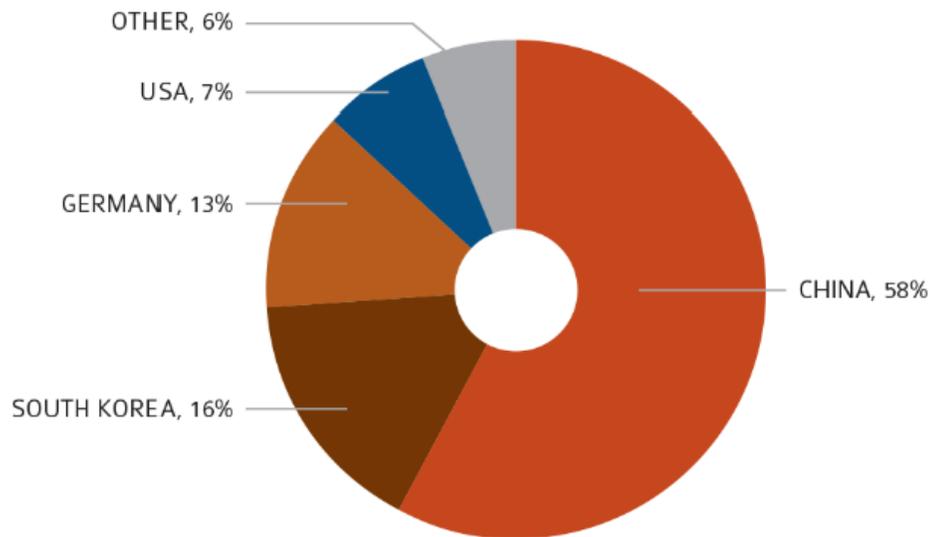
Prototype de pôle 100% recyclable – projet Zebra, fabricant LM
Le journal de l'éolien, 2021

Fabrication, filière et recyclage des ENR - PV

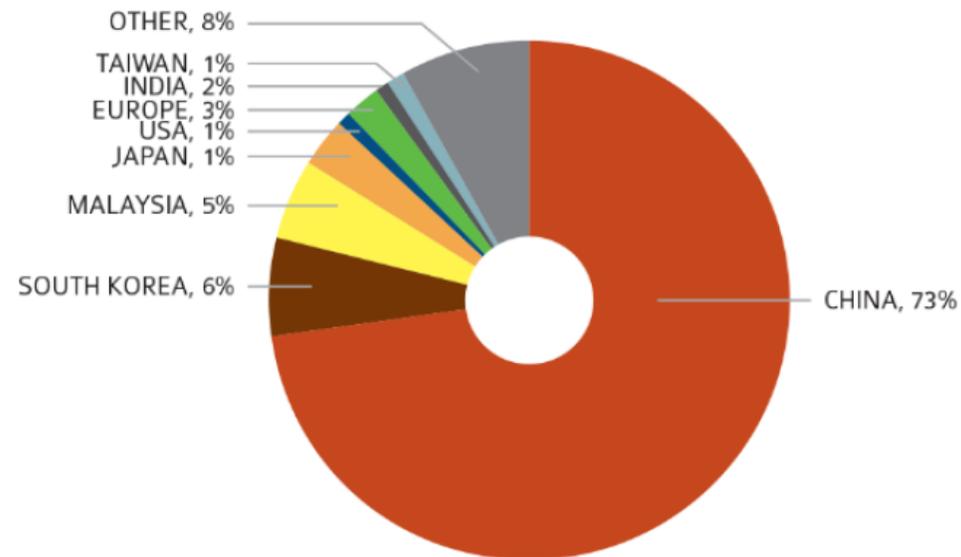
Photovoltaïque :



Production de silicium purifié :



Production de module PV :

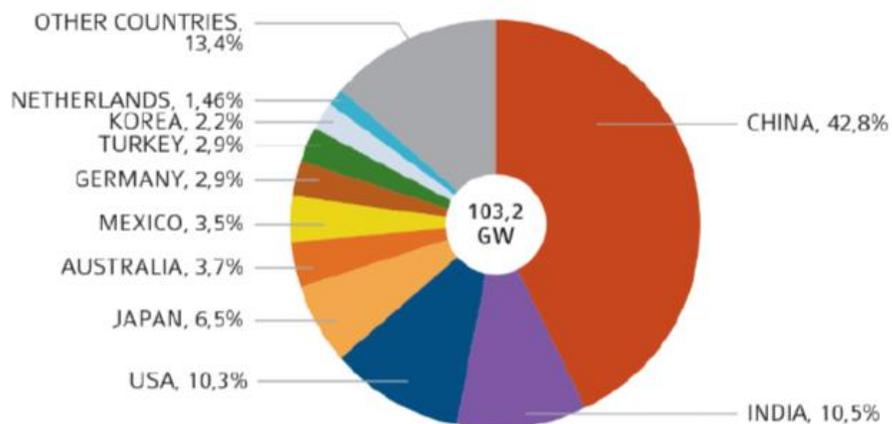


Fabrication, filière et recyclage des ENR - PV

Mais :

- La valeur ajoutée en terme d'emploi est sur le développement de projet et l'installation
- Des entreprises existent en Europe
- Plusieurs usines à venir en France et en Europe

Marché mondial du photovoltaïque en 2018



SOURCE IEA PVPS & OTHERS.

Source : IAE PVPS & others

le journal du photovoltaïque 2021 d'après Fraunhofer ISE

Industrie photovoltaïque en Europe

Segment de la chaîne de valeur

- Silicium (MG-Si, Poly-Si)
- Lingot / wafer
- Cellule
- Module

Taille des usines

- > 500 MWc
- 100 - 500 MWc
- 50 - 100 MWc



Fabrication, filière et recyclage des ENR - PV

Recyclage :

Plus de 90% d'un panneau photovoltaïque est recyclable et est recyclé actuellement en France.

Pour les systèmes silicium cristallin, les plus utilisés, la composition d'un panneau est de :

- 75% de verre, recyclable à l'infini
- 12% pour le cadre en aluminium, recyclable à l'infini
- 1% de cuivre et/ou en argent, réutilisé après traitement
- 4% de silicium, de type cristallin, réutilisé jusqu'à quatre fois
- 8% de plastiques, non recyclé en matière

Organisation de la filière de recyclage : Eco-organisme agréé SAS PV CYCLE France créée dès 2014.

Usine de recyclage se trouve à Rousset (13) - <https://pvcycle.fr/>

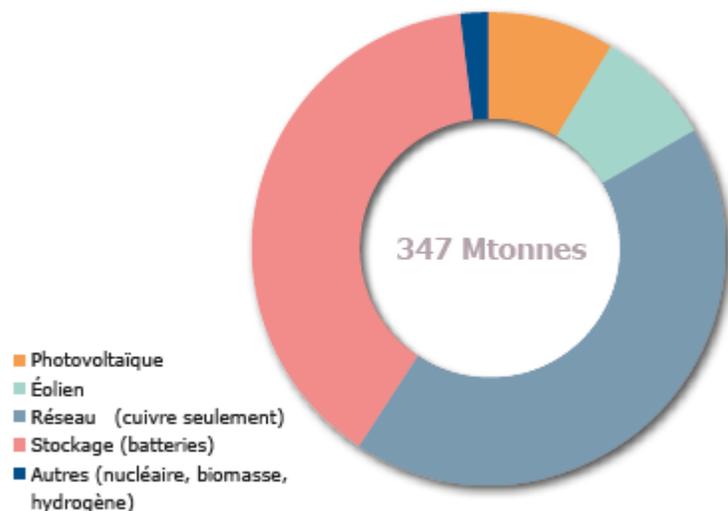
Synthèse et perspective

- Un fort développement des ENR est tout à fait viable au niveau des ressources et largement positif au niveau GES.
- Une modification des pratiques dans les autres domaines (bâtiment notamment) et plus de sobriété dans nos usages pourront compenser les besoins supplémentaires de la production ENR.
- Le recyclage des matières notamment des métaux permettra de diminuer encore la pression sur les matières premières.
- Pour autant, il existe un enjeu important d'améliorer les pratiques environnementales et sociales de l'industrie minière.

Synthèse et perspective

- Des interrogations plus préoccupantes concernant les véhicules électriques ressources en lithium et cobalt notamment et pour le cuivre (véhicules et réseau électrique)

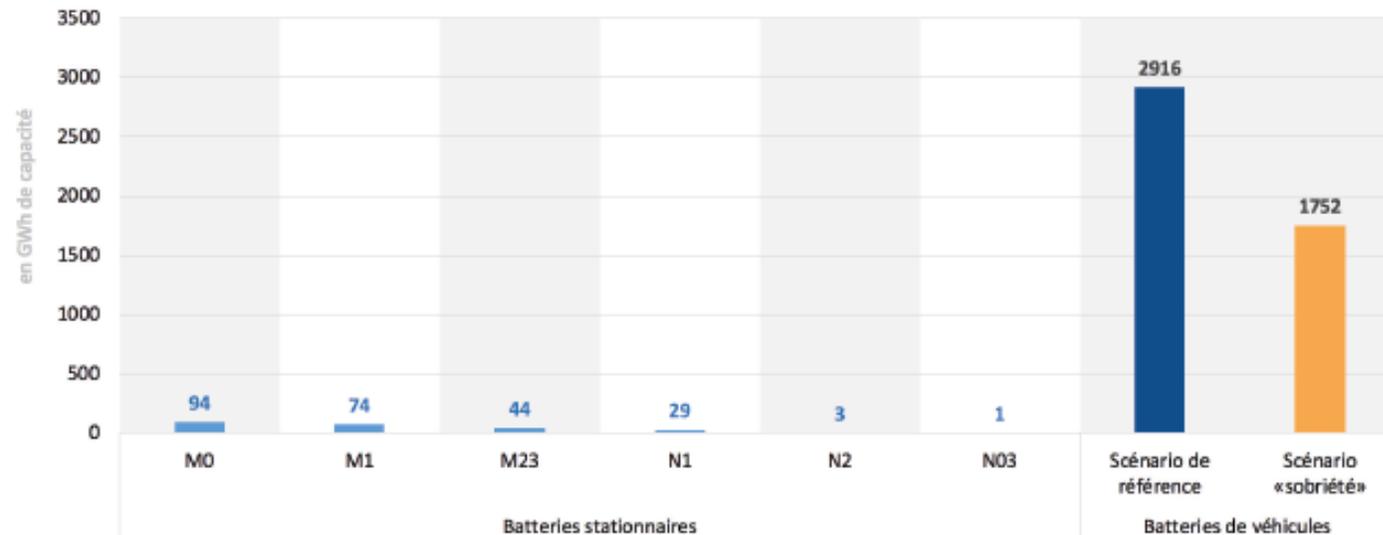
Consommation cumulée de ressources minérales entre 2020 et 2040 (scénario SDS de l'AIE)



Source : IEA, 2021, "The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions"

Capacité des batteries stationnaires et pour véhicules électriques

En GWh de capacité - Scénarios RTE

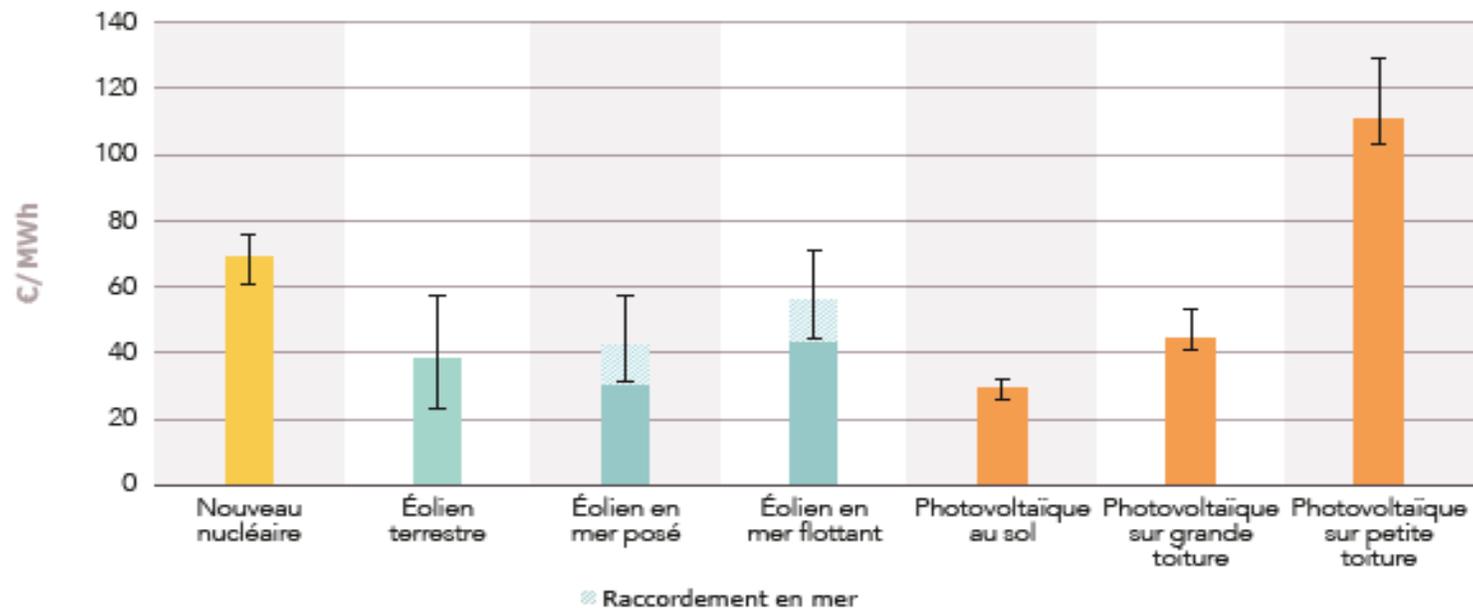


Synthèse et perspective

- Les enjeux économiques : coût par énergie

Coût des principales énergies mises en service à l'horizon 2050

En euros par MWh produit – RTE



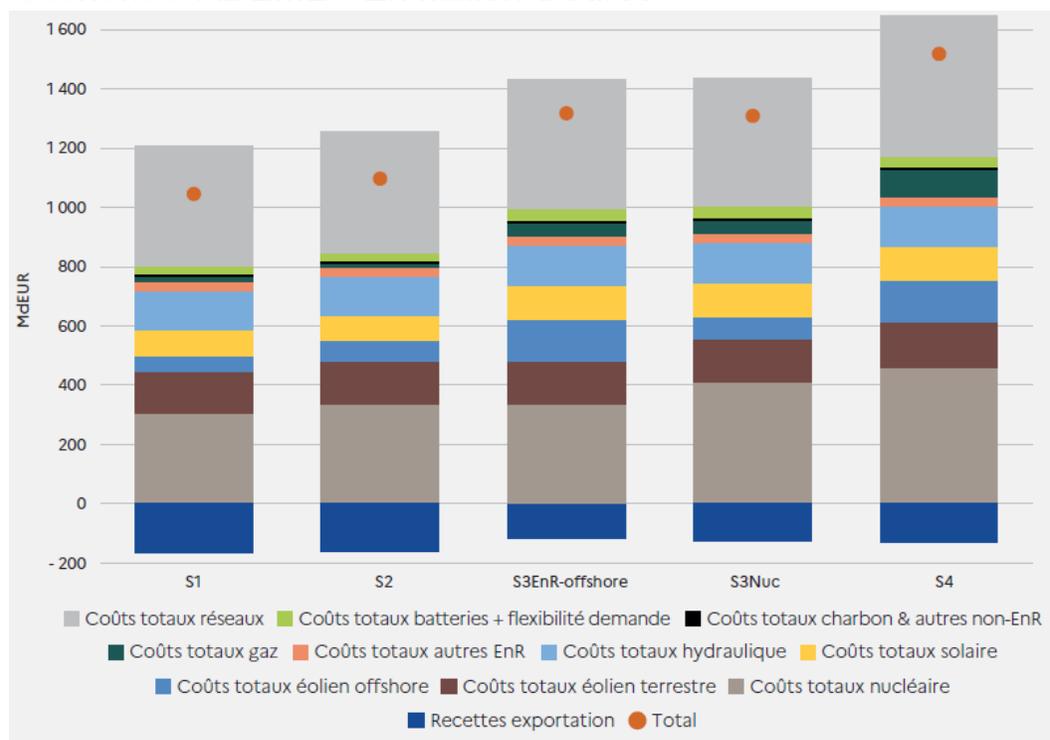
Coûts de production (dont coût de raccordement pour l'éolien en mer), variantes sur les hypothèses de coûts d'investissement et d'opération et maintenance, avec taux d'actualisation fixe à 4% pour toutes les technologies

Synthèse et perspective

- Les enjeux économiques : coût global du système

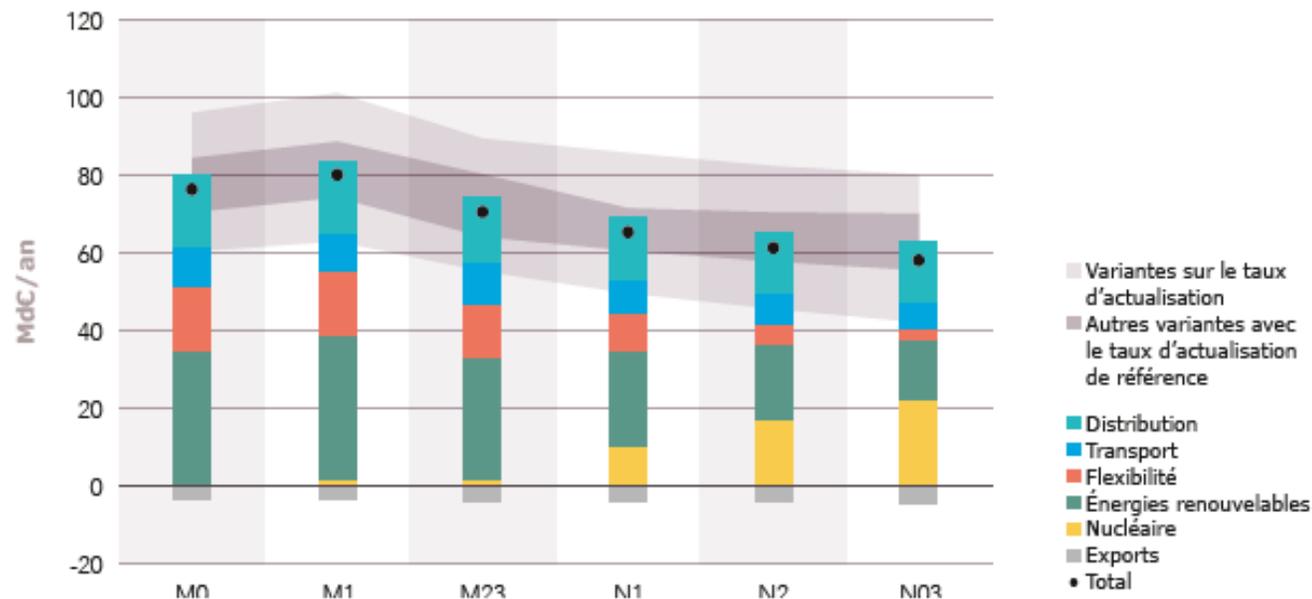
Coûts complets actualisés du système électrique 2020-2060

Scénarios ADEME - En million d'euros



Coûts complets annualisés du système électrique 2020-2060

Scénarios RTE - En million d'euros



Synthèse et perspective

- Enjeux nouveaux :

Comment se réapproprier les questions énergétiques ?

Comment informer, impliquer et faire participer les acteurs des territoires ?

Comment maximiser les bénéfices pour les territoires ?