



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

La transition énergétique: Les bonnes questions

Marc FONTECAVE

*Professeur au Collège de France
Président du Comité de Prospective en Energie
(Académie des Sciences)*





- ✓ La **transition énergétique** est engagée (Etats, entreprises, individus)
- ✓ Une partie de la solution est dans la **connaissance**, la **recherche**, la **technologie** et l'**innovation** pour:
 - *Nouvelles énergies bas-carbone*
 - *efficacité énergétique/économies d'énergie*
 - *Électrification transport/industrie/habitat*
 - *Technologies de récupération/recyclage***CROISSANCE VERTE vs DECROISSANCE**
- ✓ Il faudra du **temps** pour remplacer les fossiles par les énergies/technologies bas-carbone, en raison de contraintes physiques, économiques, sociales,...
- ✓ La **catastrophe** ? Imminente ?
- ✓ Afficher des objectifs irréalistes et inatteignables est une **erreur politique**
- ✓ **Adaptation** à des $T > 2-3^{\circ}\text{C}$! (GIEC février 2022)



Marc FONTECAVE

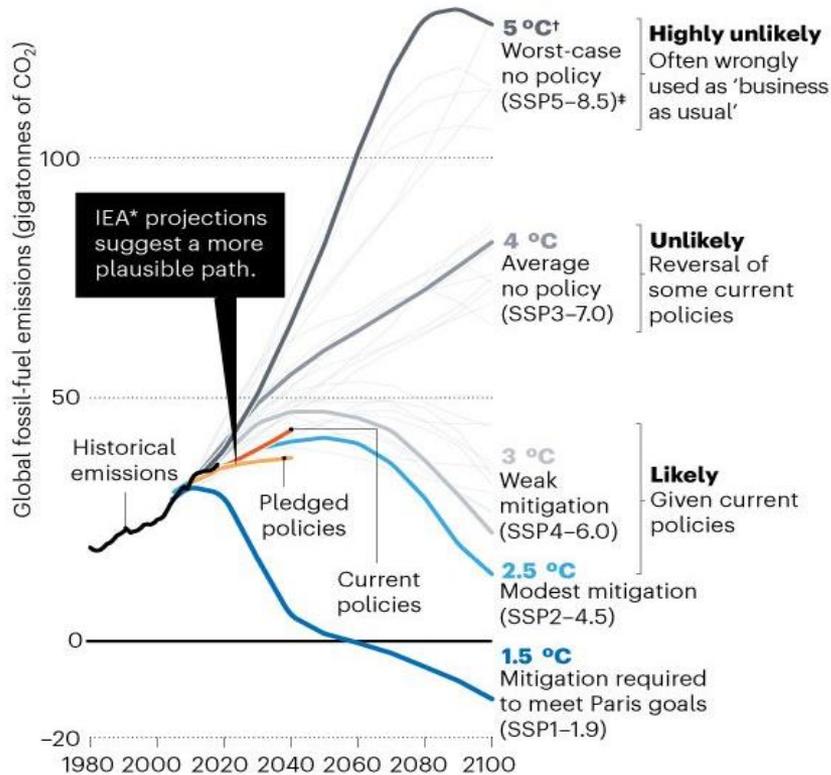
CHAIRE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

La transition énergétique : aujourd'hui et demain

5 avril > 24 mai 2023

Net Zero (2050) et + 1,5°C (2100): vraiment ?

• Plutôt 2,5-3 °C



• Adaptation !

- Rénovation de l'habitat
- Climatisation (énergie bas-carbone)
- Protection des infrastructures (usines, services publics,...)
- Aménagement du territoire (littoral, zones inondables, à risque)
- Adaptation du service hospitalier (réponses aux crises-nouvelles maladies)
- Systèmes de prévision météorologiques
- Gestion de l'eau (eau potable/irrigation)
- Gestion des forêts
- Optimisation des forces d'intervention (pompiers,..)

Net Zero (2050) et + 1,5°C (2100): vraiment ?

- Il sera difficile de se passer des fossiles si vite
- De nombreux pays continueront à les utiliser
- La population mondiale va augmenter (> 9 milliards en 2050)
- Tous les véhicules ne seront pas électriques (+ transport aérien, maritime, ..)
- Nous aurons des besoins massifs de carbone (biomasse ?). Tout ne sera pas électrique.
- La construction massive de nouvelles centrales nucléaires, de parcs éoliens et solaires , etc.. demandera des quantités massives d'énergie et de matériaux émetteurs (ciment, acier, etc..)
- 100 % de notre électricité ne sera pas renouvelable (nécessité de ressources pilotables et de stockage à grande échelle et rares sot les pays capables d'utiliser l'énergie nucléaire).
- Tout le CO2 ne sera pas capturé et séquestré

Net Zero (2050) et + 1,5°C (2100): vraiment ?

La consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté d'environ 1 % en 2022 (hausse de près de 3 % comparé aux niveaux pré-Covid de 2019)

Les carburants fossiles représentent 82 % du total des énergies consommées, malgré la montée en force des renouvelables.

Les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation énergétique, des processus industriels, ont augmenté de 0,8 % l'an dernier et atteint de nouveaux records .

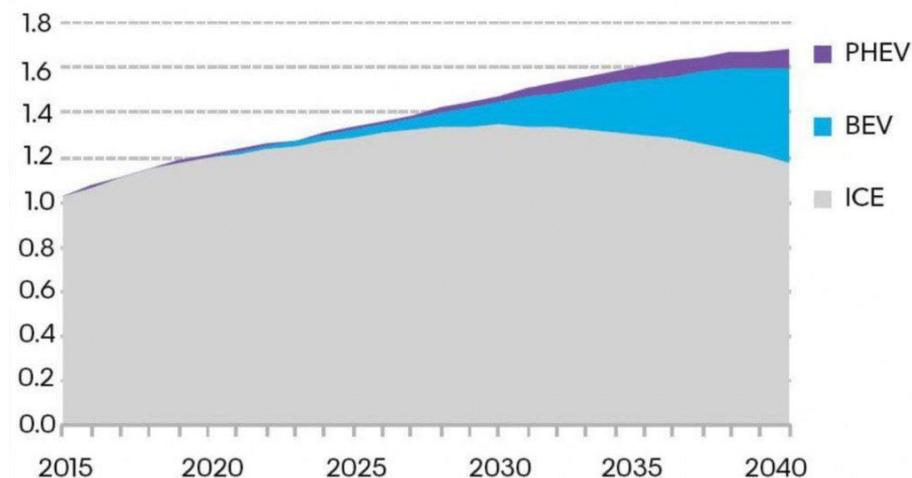
Les énergies renouvelables ont bénéficié en 2022 de la plus forte augmentation de capacité de production d'énergie solaire et éolienne, pour parvenir conjointement à une part record de 12 % de la génération d'électricité.

Net Zero et + 1,5°C en 2050: vraiment ?

- **2040: le véhicule? thermique!**

Global long-term passenger vehicle fleet by drivetrain

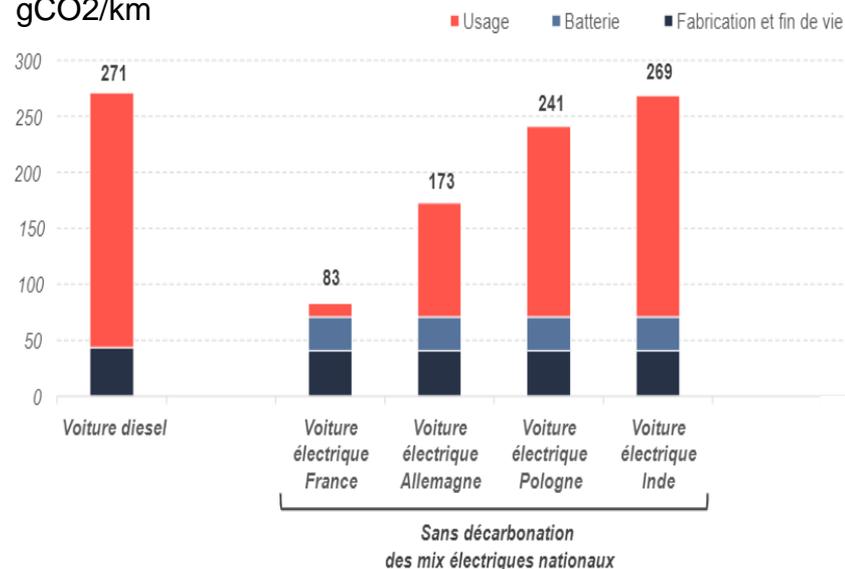
Billion vehicles



Source: BloombergNEF

- **Le véhicule électrique: zéro C?**

gCO₂/km



Sans décarbonation des mix électriques nationaux

Monde-véhicules électriques (EV)

2021: 16 million (1.5 %) - ventes : 6.6 millions

2040: 450 millions - ventes ~ 50 millions

Emissions de CO₂ : un problème global



La Chine multiplie les projets de centrales à charbon

La Chine a beau s'être engagée à réduire son recours au charbon à partir de 2026, elle mise plus que jamais sur ce combustible très polluant. L'an dernier, Pékin a approuvé un nombre particulièrement élevé de nouvelles centrales électriques au charbon, observe une étude réalisée par le Crea, un institut de recherche basé en Finlande, et par l'ONG américaine GEM. Au total, 106 gigawatts (GW) de nouveaux projets ont été approuvés l'an dernier, soit l'équivalent de deux grandes centrales au charbon par semaine. « La Chine continue d'être l'exception par rapport à la tendance mondiale de déclin de la construction de centrales au charbon. La vitesse à laquelle les projets ont progressé en 2022, de l'obtention des permis jusqu'à la construction, est hors norme », note Flora Champenois, analyste chez GEM.

Pékin dépend du charbon pour près de 60% de son électricité. La plupart des nouveaux projets ont été approuvés dans des provinces frappées ces deux dernières années par des pénuries d'électricité dues à des vagues de chaleur record. En mai 2022, le gouvernement a annoncé un investissement de 1,4 milliard d'euros dans la production d'électricité à partir de charbon. Son objectif est que ces nouvelles centrales contribuent à garantir un approvisionnement électrique stable en cas de défaillance des énergies renouvelables, lesquelles se développent aussi beaucoup en Chine. Toutefois, des provinces comme le Guangdong, au sud, où les nouvelles centrales au charbon se multiplient, sont « à la traîne » en matière d'investissement dans les énergies propres, souligne l'étude.

A. BOH

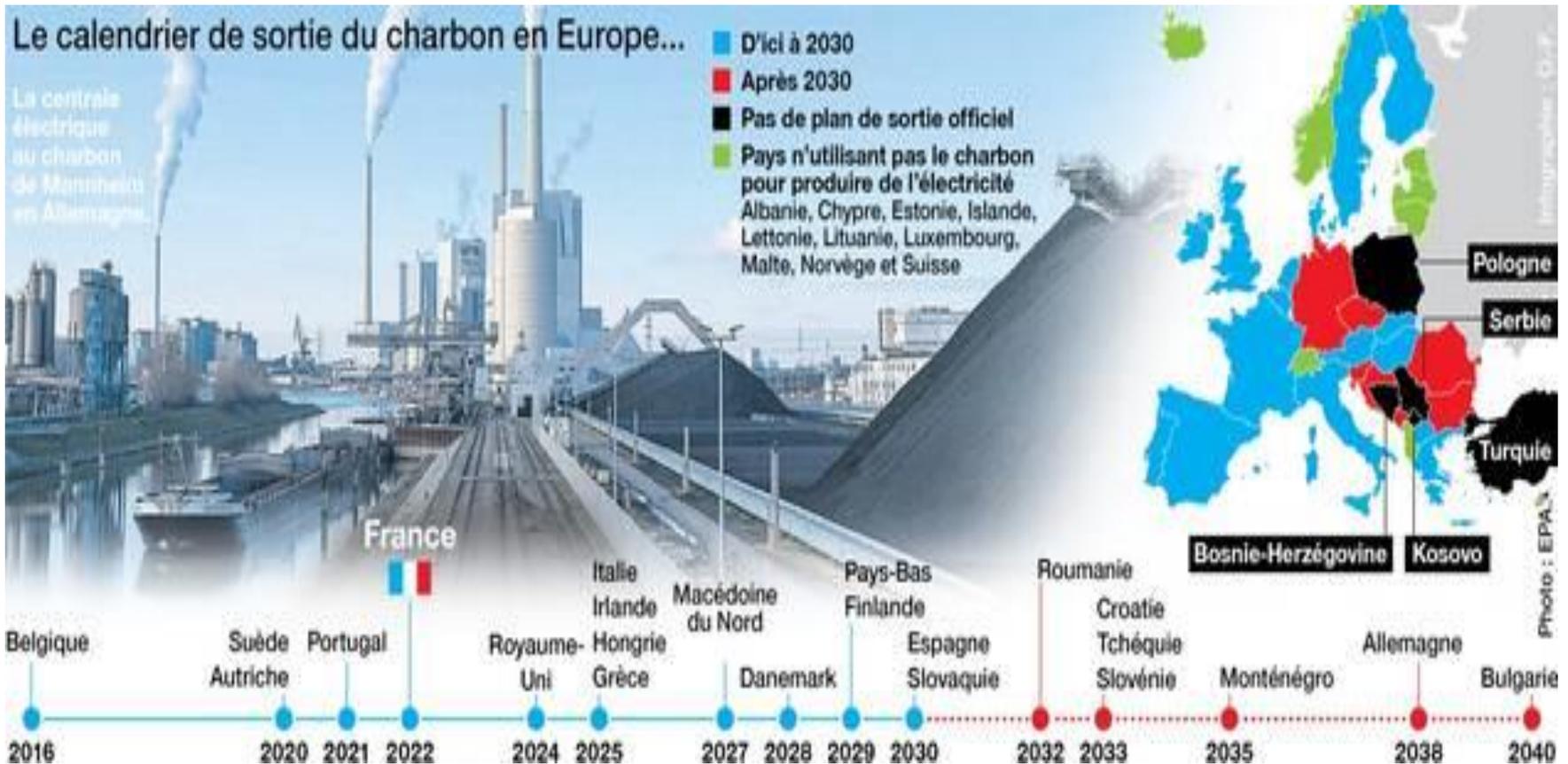
Le Figaro février 2023

Climat: encore des projets de nouvelles centrales à charbon dans 34 pays, dont la Chine
Paris - Malgré les dommages causés au climat, la planète compte encore des projets de construction ou d'extension de centrales électriques au charbon dans 34 pays différents, surtout en Chine, dénonce le rapport annuel du Global Energy Monitor publié mardi.
L'Express avril 2022

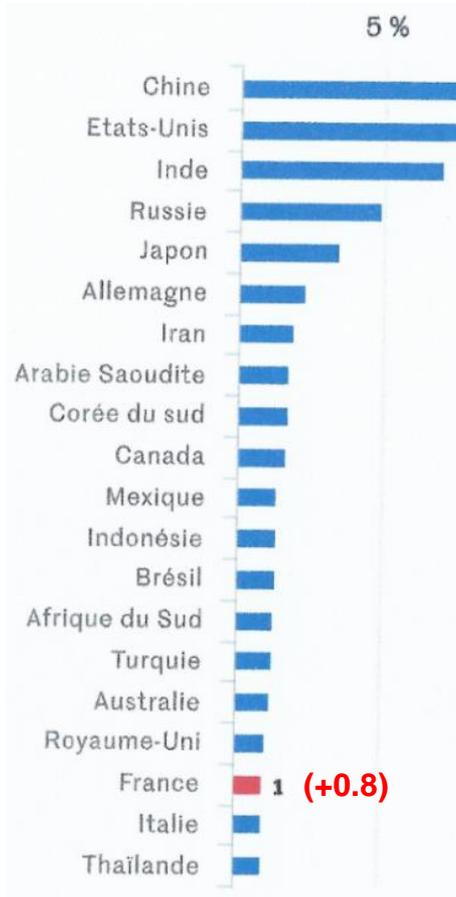
Climat : 600 projets de centrales à charbon en Asie
La Chine, l'Inde, l'Indonésie, le Japon et le Vietnam ont au total plus de 600 nouvelles centrales à charbon en projet.
France Info/AFP juin 2021

Emissions de CO₂ : un problème global

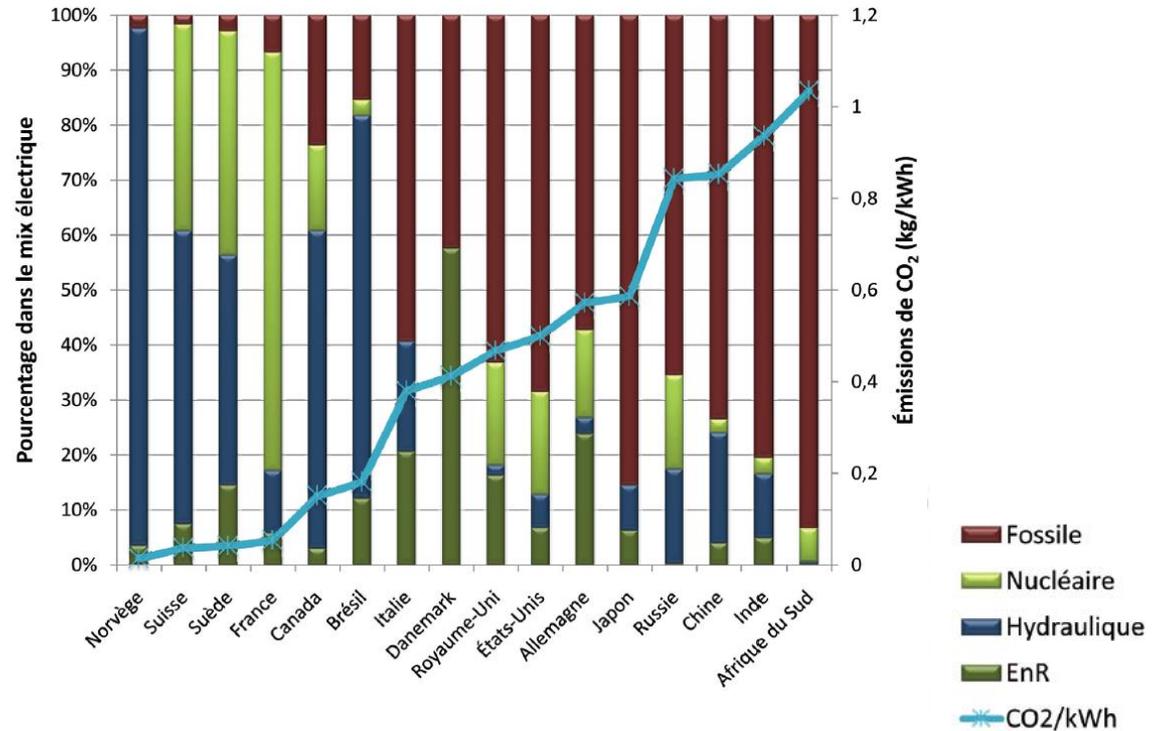
Ex: la sortie du charbon



Emissions de CO₂ : un problème global ?

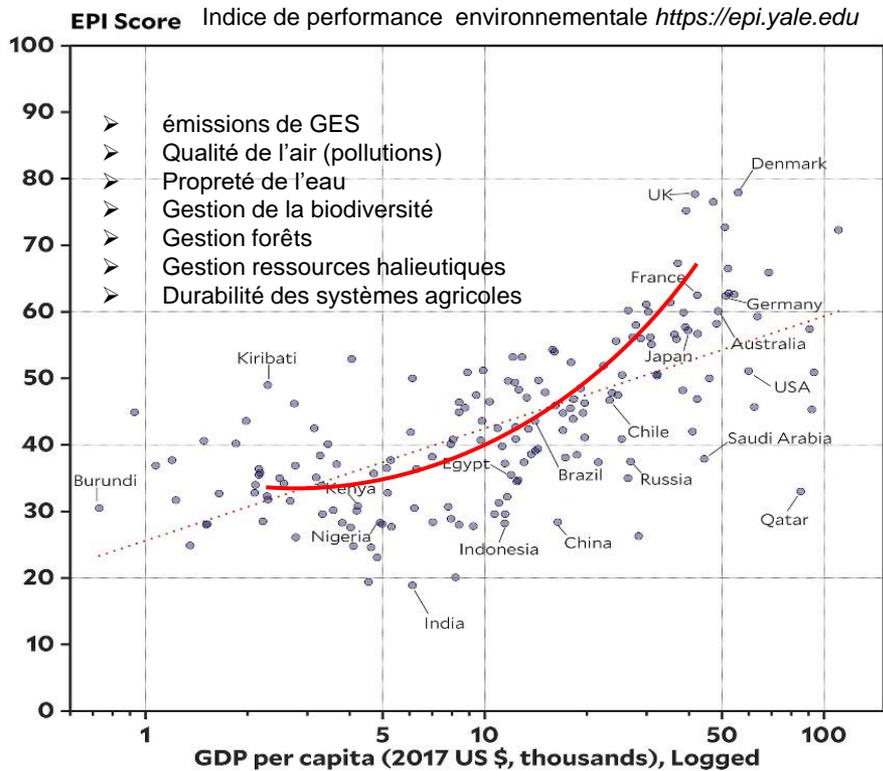


Mix électrique et émissions de CO₂

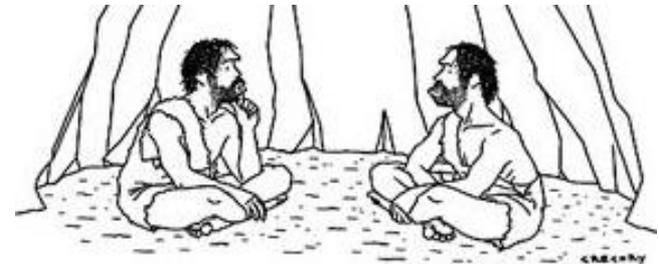
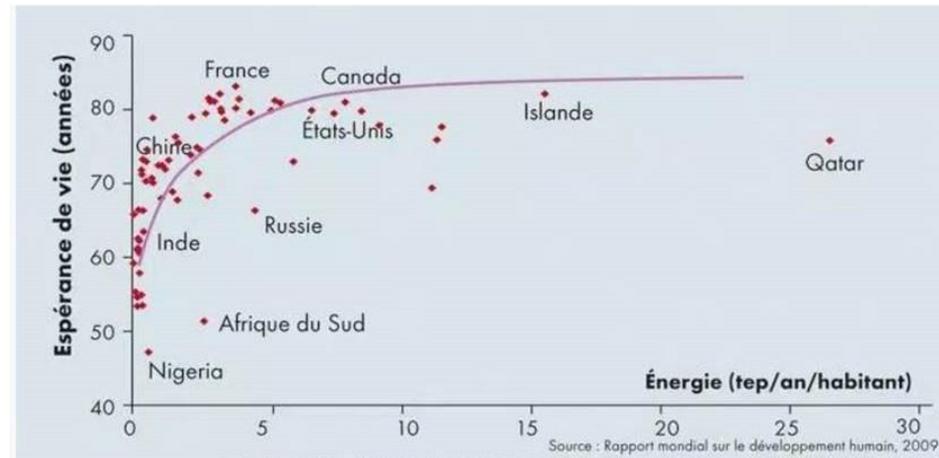


Decroissance: vraiment ?

• Environnement



• Espérance de vie



"Something's just not right—our air is clean, our water is pure, we all get plenty of exercise, everything we eat is organic and free-range, and yet nobody lives past thirty."

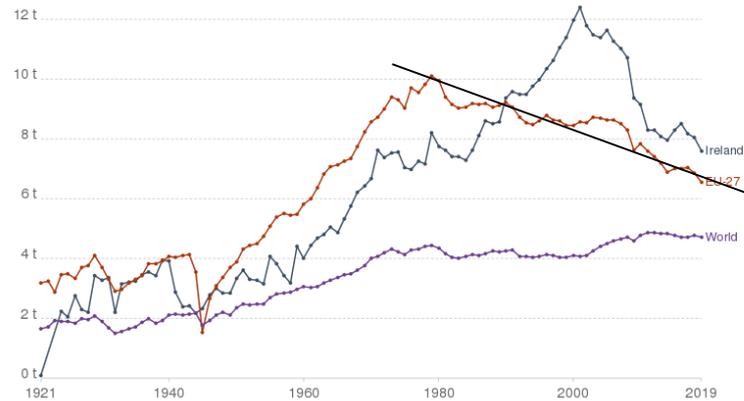
Decroissance: vraiment ?

Découplage croissance/émissions ?

Per capita CO₂ emissions

Carbon dioxide (CO₂) emissions from the burning of fossil fuels for energy and cement production. Land use change is not included.

Our World in Data

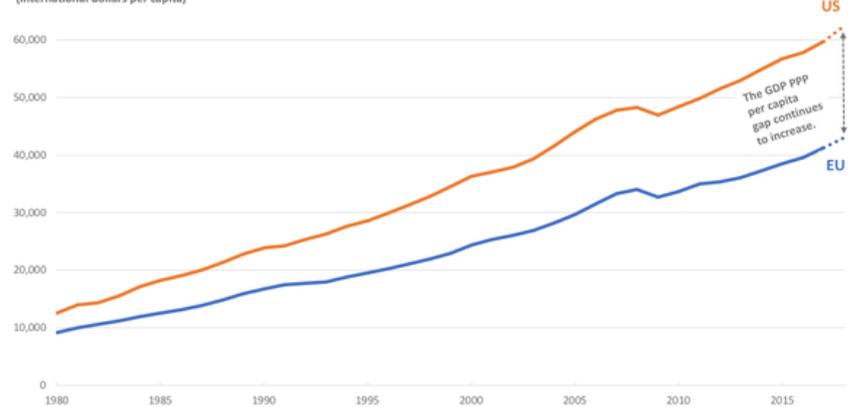


Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project, Gapminder & UN
Note: CO₂ emissions are measured on a production basis, meaning they do not correct for emissions embedded in traded goods.

Europe: baisse des émissions de 35% par habitant depuis 1980

US VS EU: GDP PPP PER CAPITA COMPARISON 1980-2018

GDP PPP per capita, current prices (international dollars per capita)



Data Source: IMF World Economic Outlook, October 2018

Data Analysis by: MGM Research

Europe: augmentation du PIB de 50% par habitant depuis 1980

Decroissance: vraiment ?



- **700 millions de personnes sans électricité**
- **4 millions de personnes par an meurent** de maladies imputables au manque d'énergie (ex: pollutions dues à la combustion de combustibles solides en foyers ouverts pour la cuisine) source: OMS
- **1.6 milliards de personnes** n'ont pas accès à l'eau potable
-et la population mondiale augmentera de **2 milliards** (en Afrique)

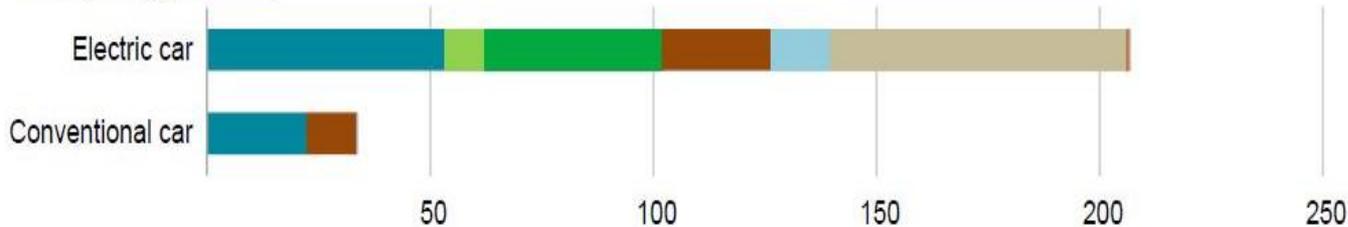
Souveraineté: vraiment ?

Ressources minérales

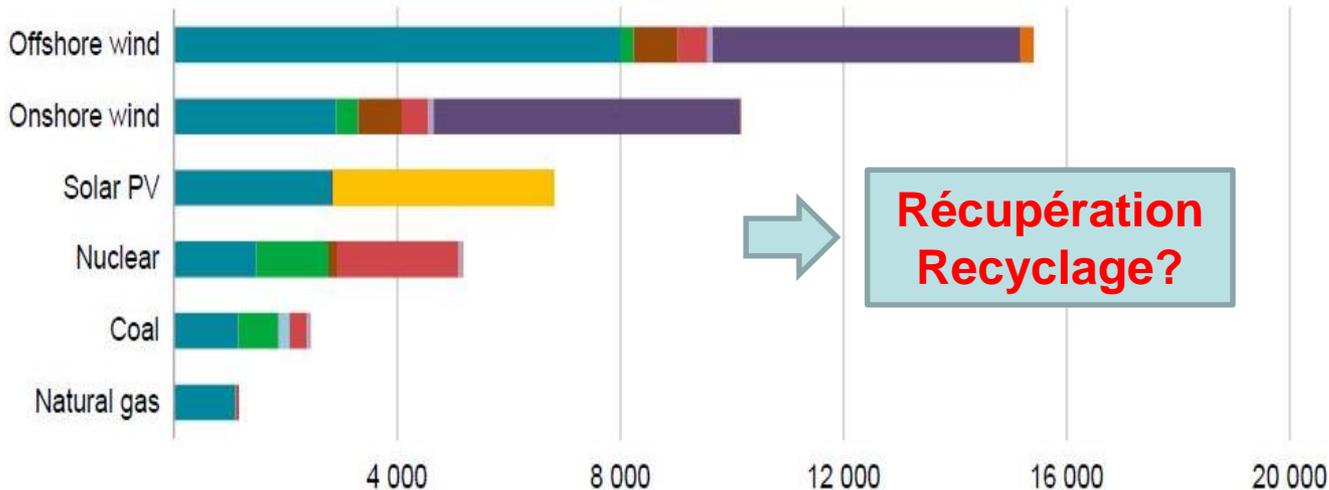
The rapid deployment of clean energy technologies as part of energy transitions is a significant increase in demand for minerals

Minerals used in selected clean energy technologies

Transport (kg/vehicle)



Power generation (kg/MW)



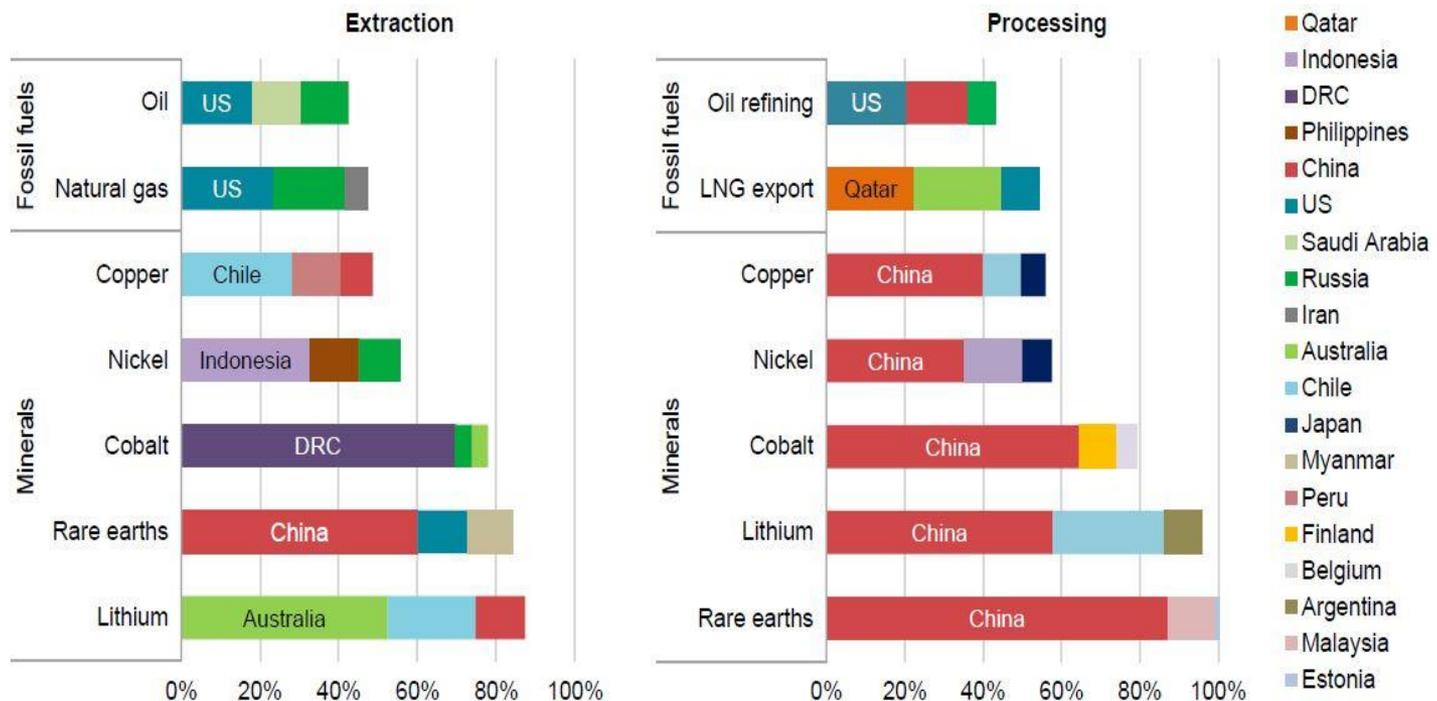
Récupération
Recyclage?

Souveraineté: vraiment ?

Ressources minérales

Production of many energy transition minerals today is more geographically concentrated than that of oil or natural gas

Share of top three producing countries in production of selected minerals and fossil fuels, 2019

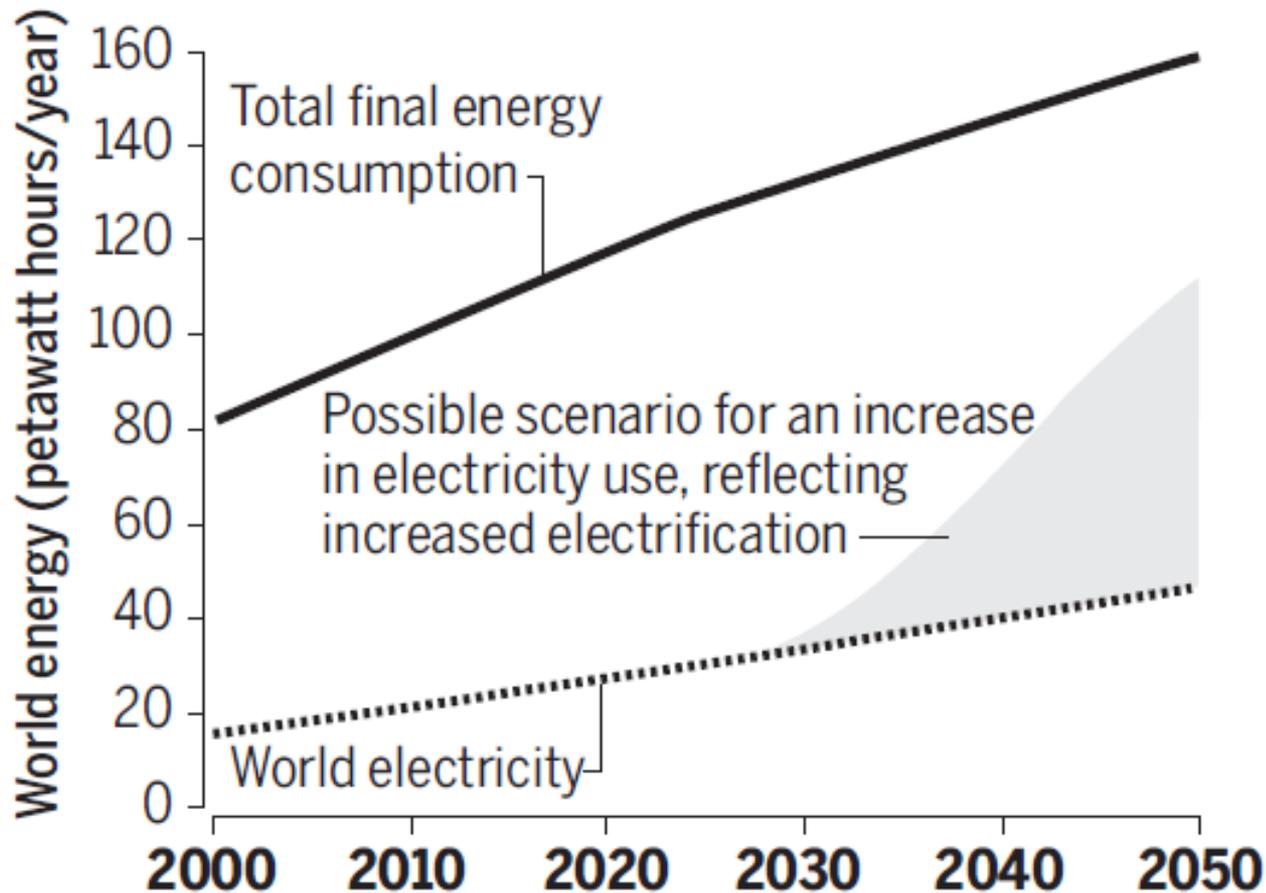


IEA. All rights reserved.

Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations.
Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

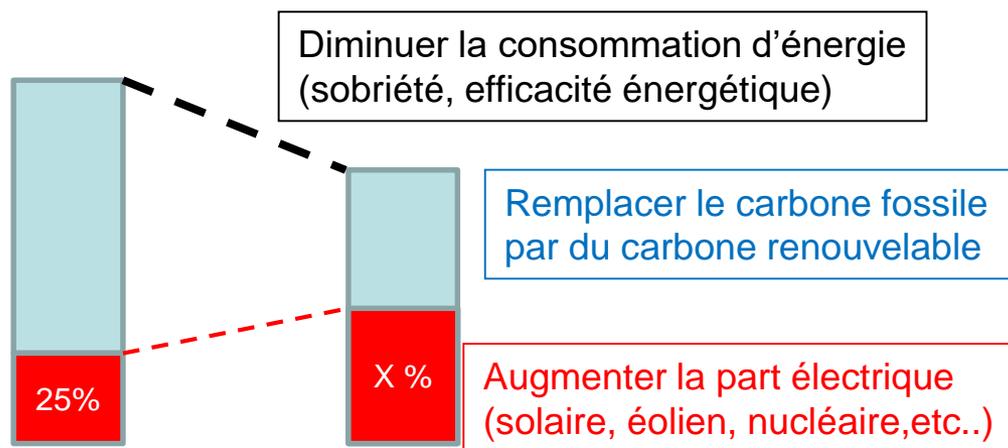
**La transition énergétique:
Quels scénarios ?
(le cas de la France)**

Monde: plus d'énergie/plus d'électricité



La transition énergétique France: scénarios 2050 ?

- **Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?**
- Sobriété (échelle collective et individuelle)
- Efficacité énergétique (chauffage, industrie, transports,..)
- **Décarboniser les secteurs les plus émetteurs (transports, habitat, industrie)**
- Diminuer la part des énergies fossiles (charbon>pétrole>gaz). De combien? **100%?**
- Trouver de nouvelles sources de carbone (biomasse, CO2) pour la synthèse de carburants, matériaux (plastiques, acier) et molécules (médicaments,..),... **X TWh?**
- **Electrifier le système énergétique (25 > 50%?)**
- Augmenter la part des ENRs (éolien, solaire, biomasse) bas-carbone. **De combien?**
- Maintenir/développer l'énergie nucléaire bas-carbone. **Jusqu'à combien?**



La transition énergétique France: scénarios 2050 ?

- **Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?**
- Sobriété (échelle collective et individuelle)
- Efficacité énergétique (chauffage, industrie, transports,...)
- **Défossiliser les secteurs les plus émetteurs (transports, habitat, industrie)**
- Diminuer la part des énergies fossiles (charbon>pétrole>gaz). De combien? **100%?**
- Trouver de nouvelles sources de carbone (biomasse, CO2) pour la synthèse de carburants, matériaux (plastiques, acier) et molécules (médicaments,...),... **X TWh?**
- **Electrifier le système énergétique (25 > 50%?)**
- Augmenter la part des ENRs (éolien, solaire, biomasse) bas-carbone. **De combien?**
- Maintenir/développer l'énergie nucléaire bas-carbone. **Jusqu'à combien?**

❖ **DEFOSSILISER**

❖ AVEC UNE **SECURITE TOTALE D'APPROVISIONNEMENT**

(stabilité des réseaux, sources d'énergie pilotables,...)

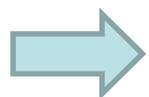
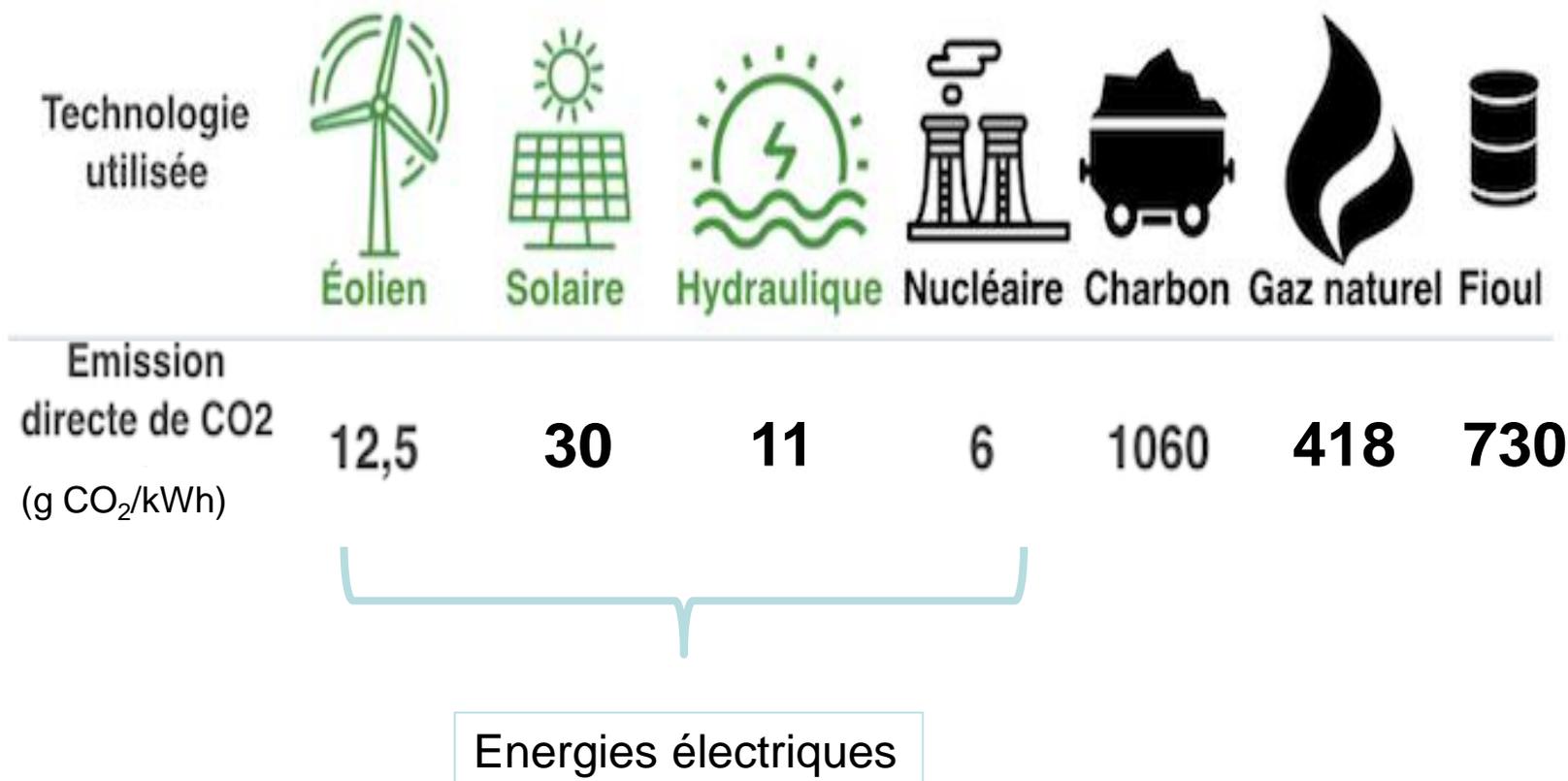
❖ AU PLUS **BAS COUT**

❖ MAINTENIR UNE **SOUVERAINETE ENERGETIQUE**

❖ ACCROITRE NOTRE **ACTIVITE INDUSTRIELLE**

(Nucléaire, barrages, technos vertes: ENRs, H2, batteries,...)

Pourquoi défossiliser = Electrifier ?



Un enjeu majeur de la transition: augmenter la consommation électrique
France: 470 TWh à 550-640-750-900 TWh ??

Energie: France

Production électrique 2019

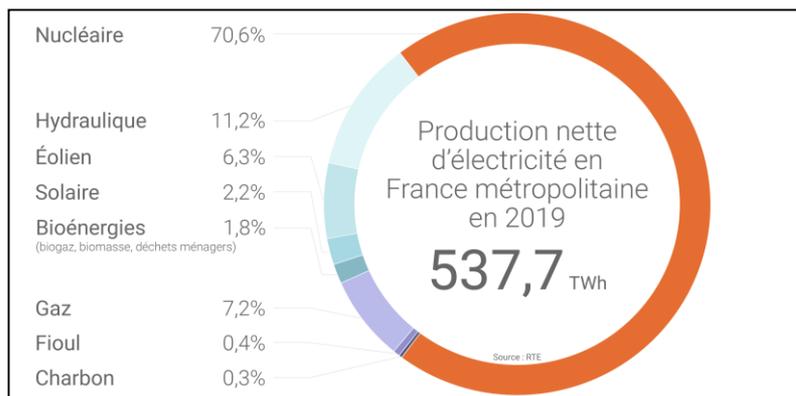
Etat 2019	Energie TWh	Pourcent
Production d'électricité	535	100%
Nucléaire	379	70,8%
Eolien	34	6,3%
Solaire	12	2,3%
Hydraulique	60	11,1%
Biomasse	10	1,8%
Gaz	37	6,9%
Charbon/pétrole	4	0,7%

Consommation énergie 2019

Etat 2019	Energie TWh	Pourcent
Consommaion électrique	468	29,1%
Autres consommations	1143	70,9%
Pétrole	626	38,9%
Gaz	328	20,4%
Charbon	11	0,7%
ENR thermique	177	11,0%
Total consommations	1611	100%

Sources : Eurostat [6] et RTE [7].

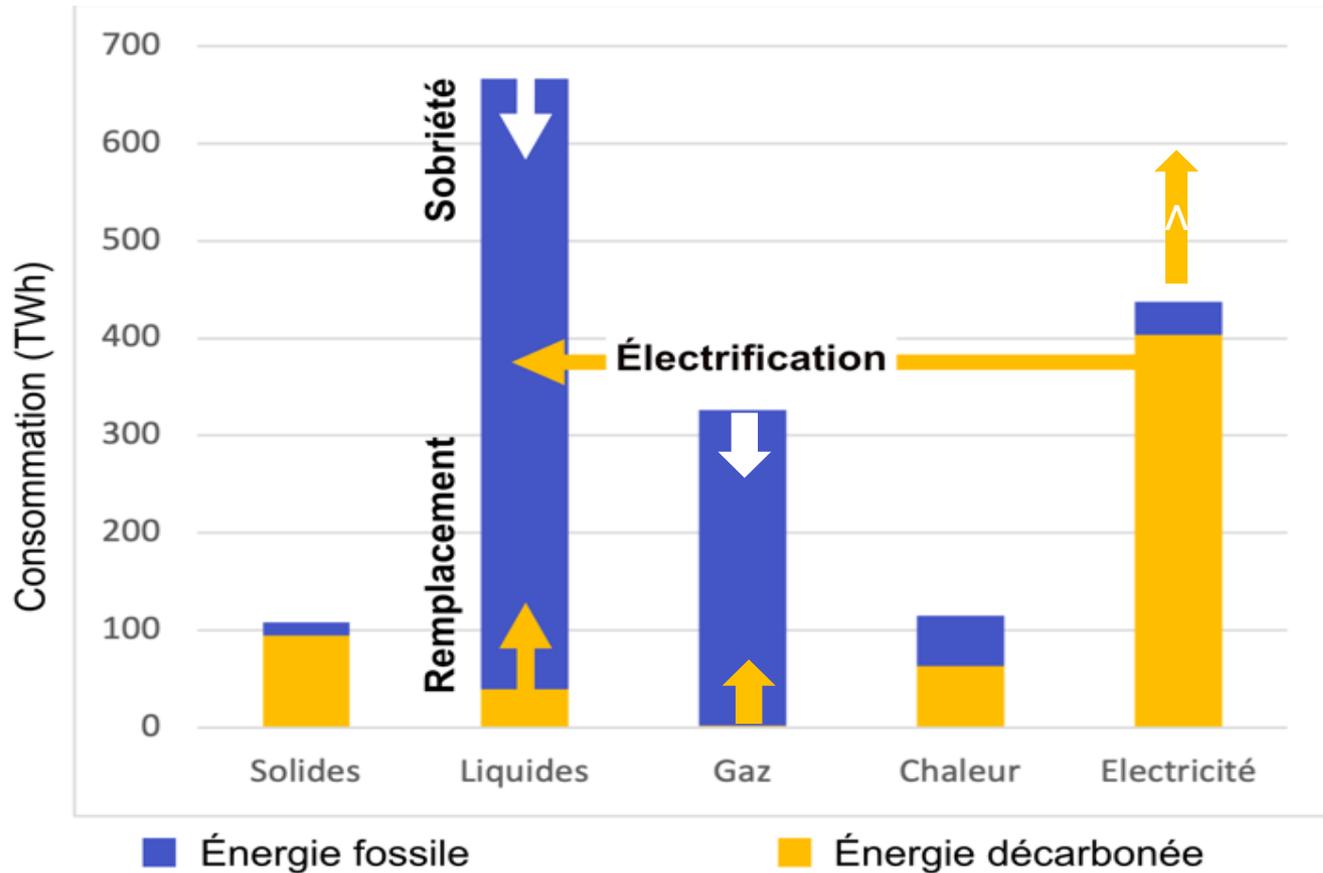
France: Energie Electricité 92% décarbonée



France: Energie 60 % fossiles (charbon < gaz < pétrole)

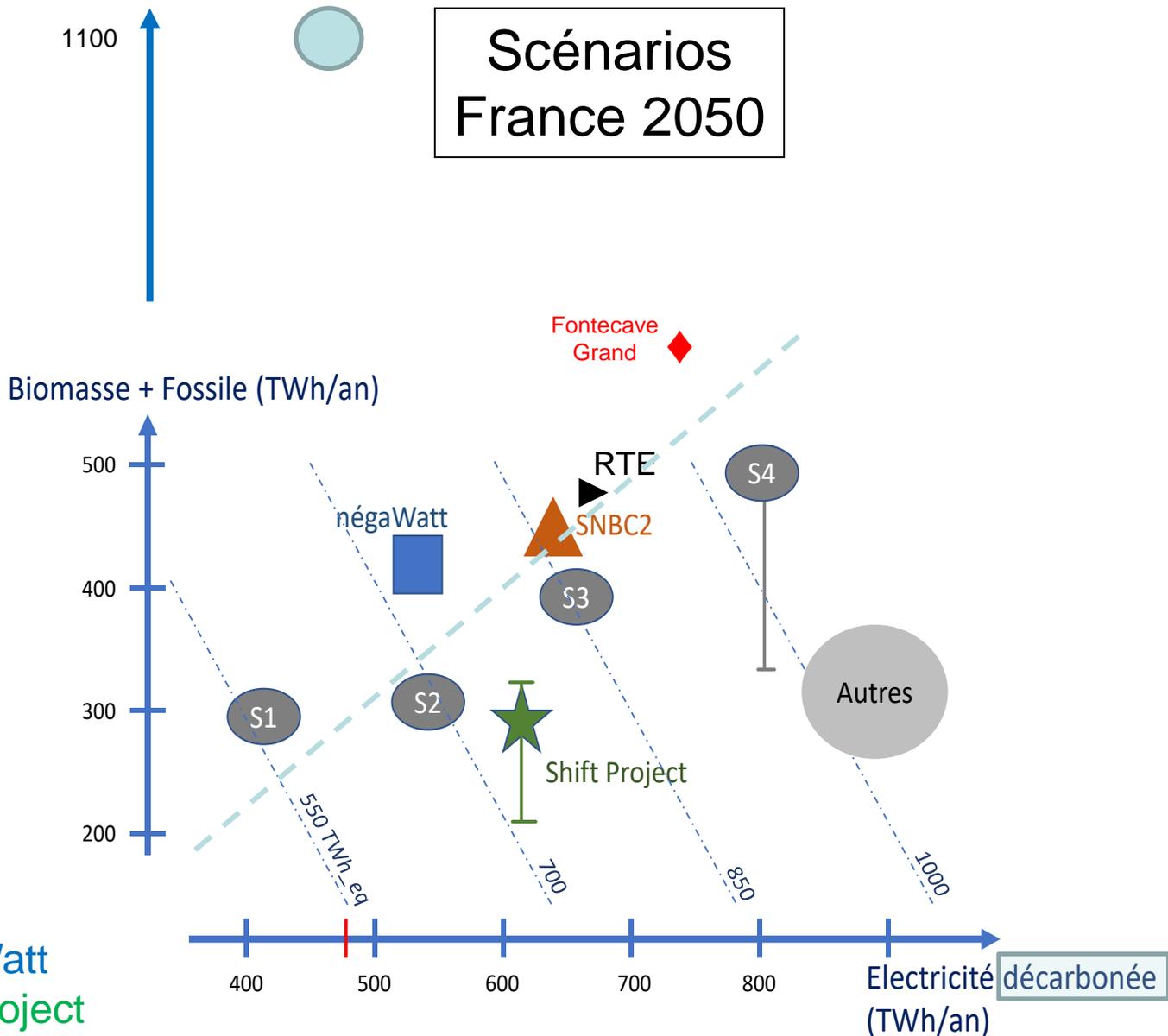
Rem: éolien + solaire < exportations

Energie: France



Répartition de la consommation finale suivant les différentes formes matérielles de l'énergie et entre fossiles (bleu) et sources décarbonées (jaune). Unité TWh

Scénarios France 2050



SNBC

RTE

NegaWatt

Shift project

ADEME 2022: S1, S2, S3, S4

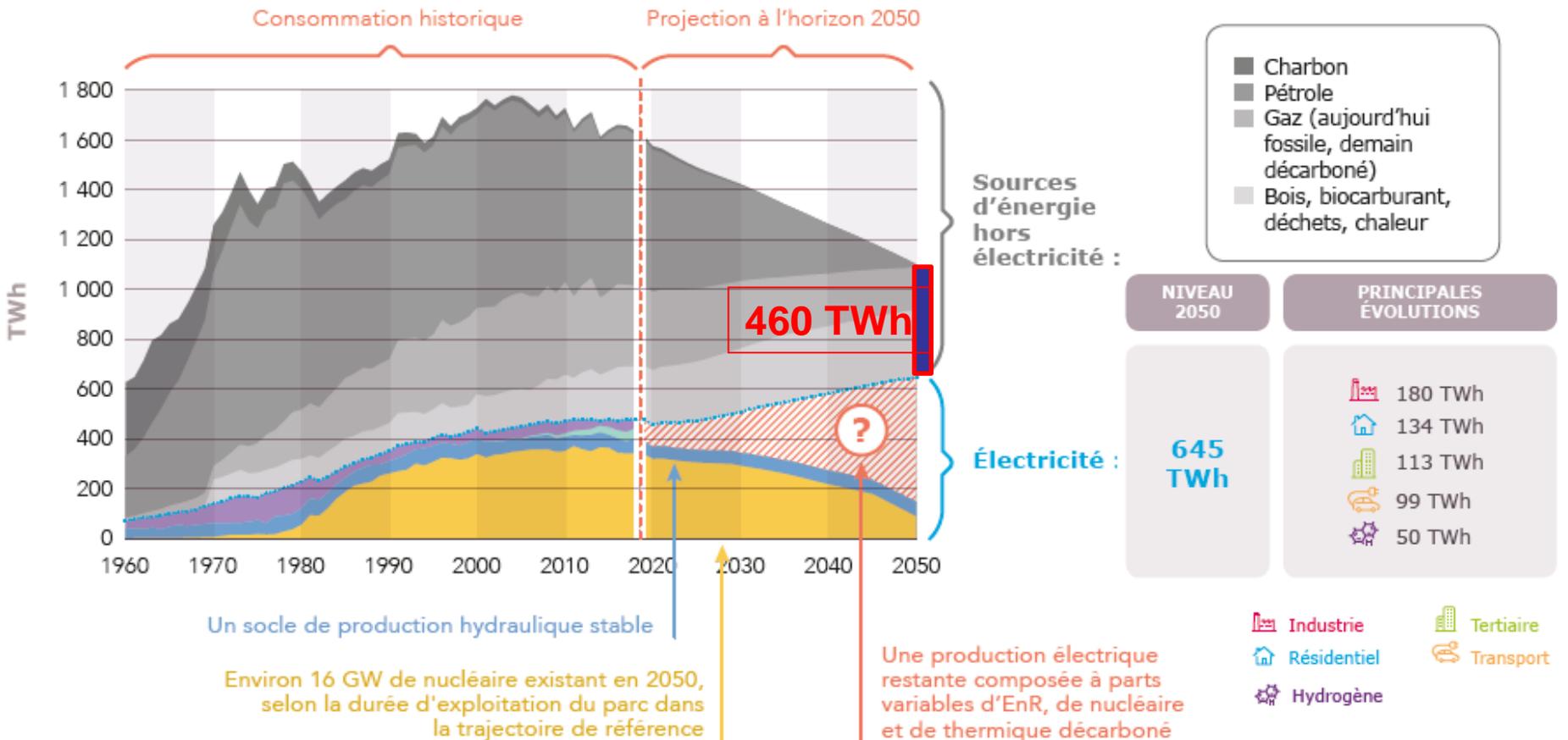
Autres: académie des technologies, CEREME

Fontecave, Grand (CRAS 2021)

France: Les scénarios 2050

RTE octobre 2021: scénario de référence (1100 Twh dont 645 Twh électricité)

6 scénarios « électricité »:
de « sobriété » (555 TWh) à « réindustrialisation » (752 TWh)
% nucléaire variable



**La transition énergétique:
Quel mix électrique ?
(le cas de la France)**

Quel mix électrique ?

- **Nucléaire + solaire
+ éolien.....+ gaz**



- **Avis de l'Académie des Sciences (2021)**
 - ✓ Prolongation des centrales (40 > 60 ans)
 - ✓ Construction de nouveaux réacteurs (EPR-SMR)
 - ✓ Recherche et développement des réacteurs du futur: réacteurs neutrons rapides (RNR)

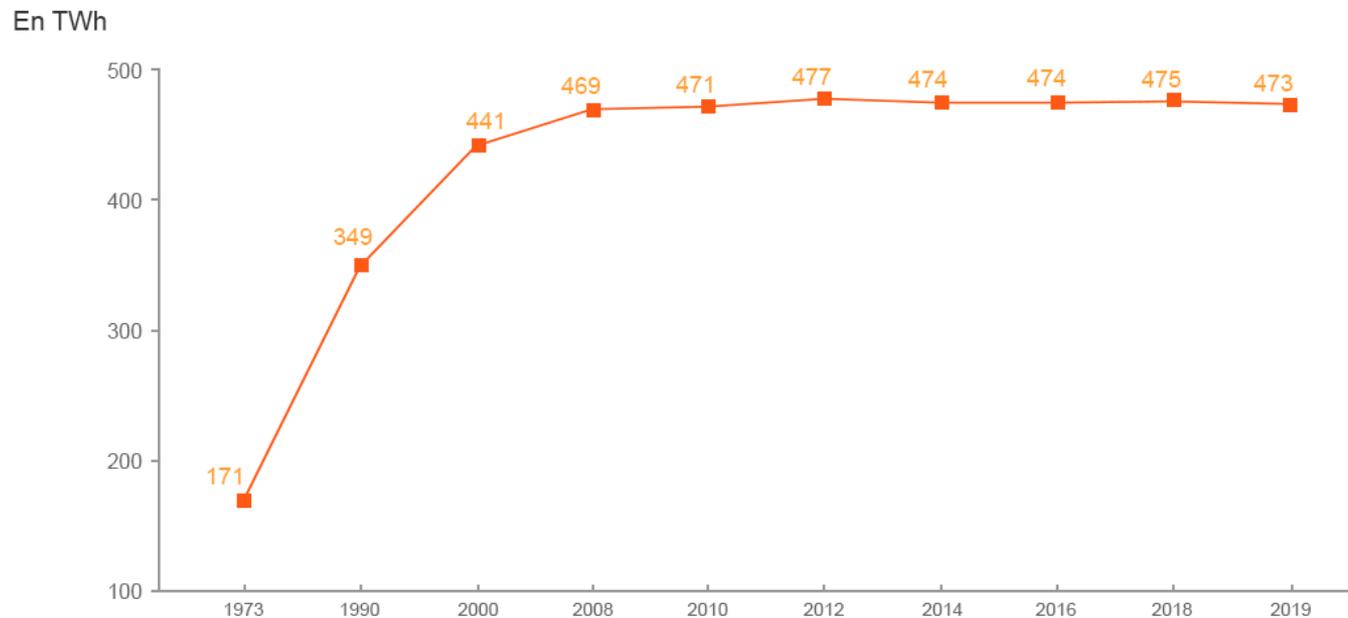
Energie Nucléaire

Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV-2015)

- Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % (**2025**)

LPPE (2019)

- Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % (**2035**)
- Fermeture de 14 réacteurs nucléaires (2035) !
- Baisse de la consommation d'énergie de 16,5 % (2028 vs 2012) !



Évolution de la consommation électrique en France entre 1973 et 2019
(en mode corrigé des aléas climatiques et des effets calendaires)

Source RTE - Bilan électrique 2019

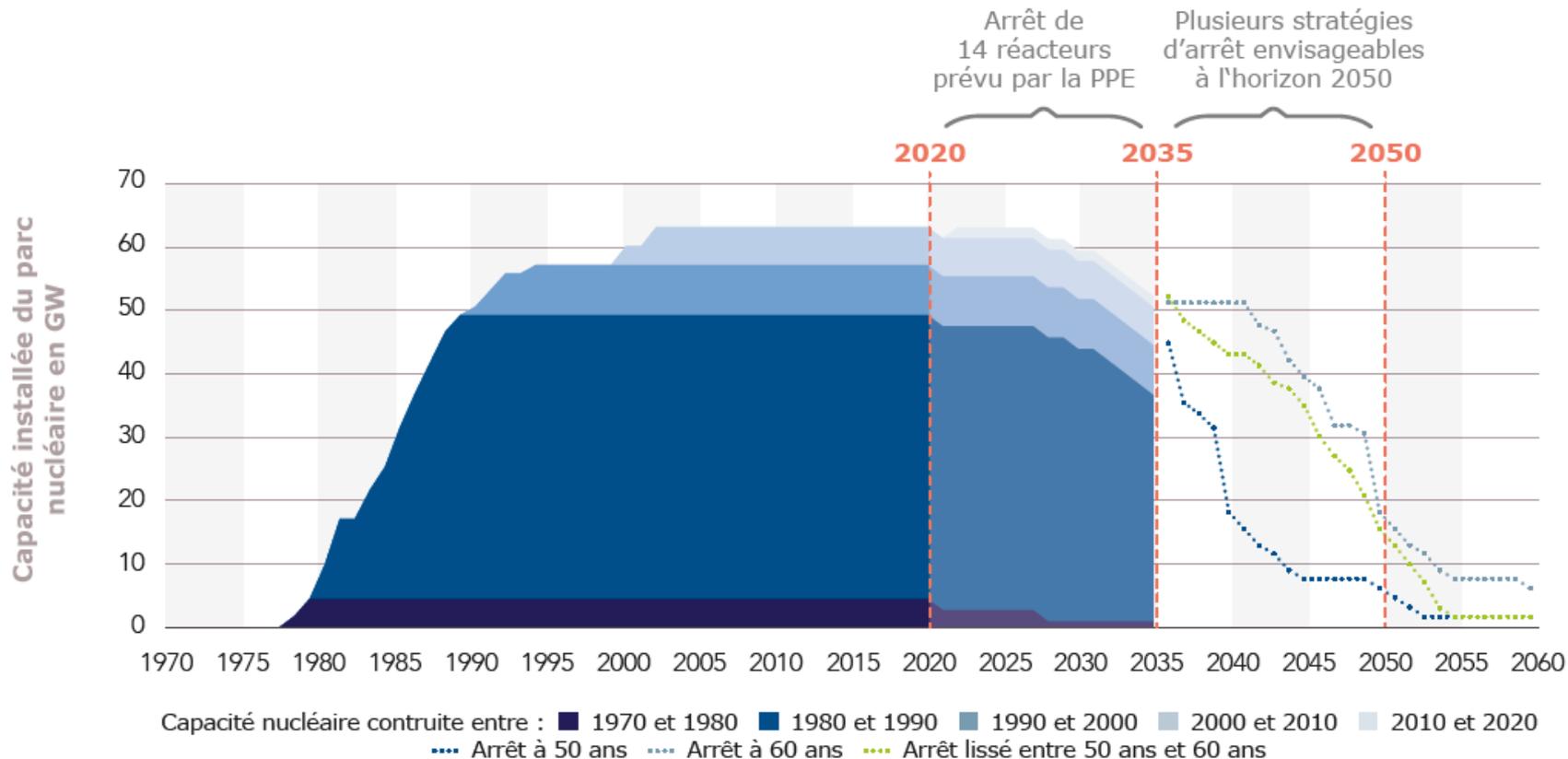
© EDF

Energie Nucléaire

Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV-2015) LPPE (2019)

- Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % (2025-2035)

Et après ?



Âge moyen des centrales: 37 ans > mise à l'arrêt en 2055 (hypothèse 50 ans)

**Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV-2015)
LPPE (2019)**

- Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % (2025-2035)

Et après ?

PROJET DU GOUVERNEMENT (2023)

Conseil de Politique Nucléaire (3 février 2023)

- ✓ Préparation de la loi de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)
- ✓ Lancement d'études pour la prolongation des centrales à 60 ans
- ✓ Programme de construction de 6 nouveaux EPR2 (+ 8 ?) > 2040
- ✓ Programme de petits réacteurs (SMR)
- ✓ Réflexion sur la question du cycle du combustible
- ✓ Plan de formation aux métiers du nucléaire

Comment est-ce possible ?
(Commission Parlementaire 2023)

Arnaud Montebourg, ministre de l'Économie et du Redressement productif (2012-2014)

« Nous ne voulions pas cet accord. L'accord a été présenté par Martine Aubry comme un changement de société et par Cécile Duflot comme un changement historique. Pour moi, c'est un accord de coin de table. On s'est mis d'accord sur un accord politique de manière à marquer les esprits. Et on s'est retrouvé avec un programme qui indiquait qu'il fallait fermer 24 réacteurs. Et après, vogue la galère [...] »

Ségolène Royal, ministre de l'Environnement 2014-2017

« L'objectif de 50 % est un accord politique entre le PS et les Verts. Cet accord politique n'est pas techniquement robuste par rapport à des études d'impact. C'est un objectif politique au sens où il faut sortir du tout nucléaire »

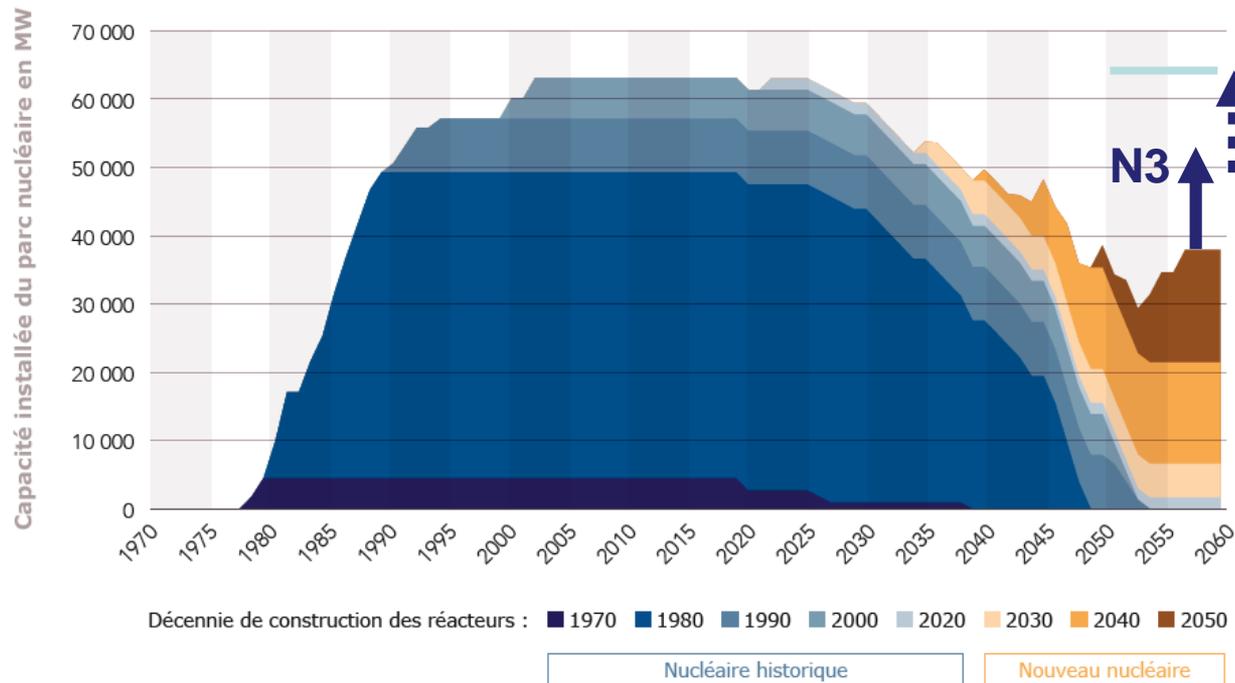
Manuel Valls, Premier ministre 2014-2016

« C'est un choix d'abord politique (...) Le choix des 50 % est lié à la contrainte de l'accord passé entre le PS et les Verts et dont celui qui allait être désigné comme candidat à la présidentielle voulait sortir -je parle de François Hollande -. Deuxièmement, les 50 % n'était le résultat d'aucune étude d'impact ou d'analyse de besoin. L'optique était politique.

Energie Nucléaire: combien ?

- ✓ Plus de 20 ans de politique nucléaire incohérente
- ✓ Échelles de temps longues pour la construction de nouveaux réacteurs
- ✓ capacité financière et industrielle d'EDF (prolongation et construction)
- ✓ Nouvelles compétences

Figure 12 Évolution du parc nucléaire dans le scénario N2, en MW
Trajectoires avant optimisation des durées de mises en service et d'arrêts des réacteurs



ENRs
Eolien
Solaire

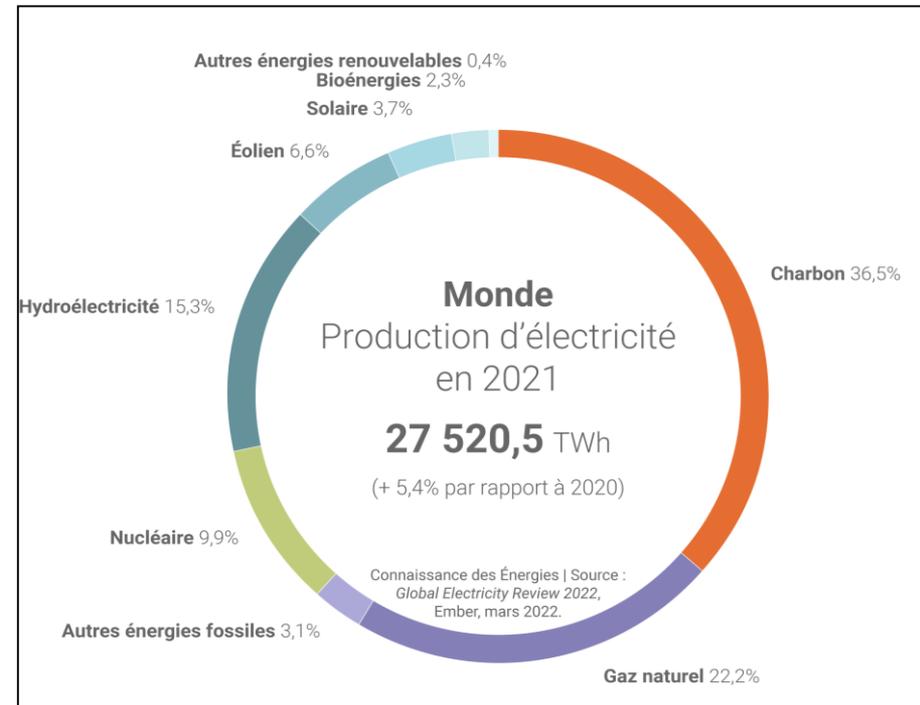
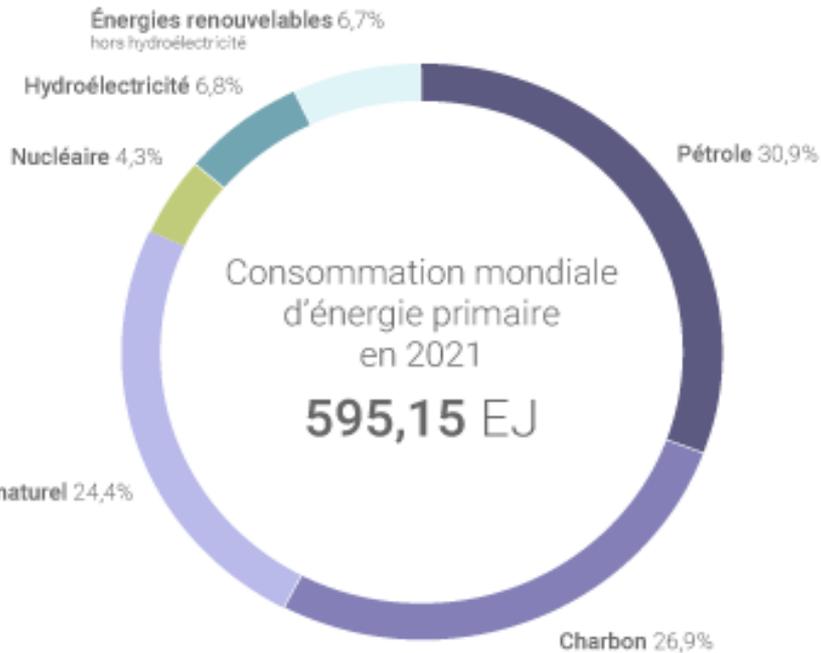
N2: Trajectoire haute de construction de nouveaux EPR2 23 GW

► Nécessite la mise en service de 14 EPR entre 2035 et 2050 pour atteindre une part de l'énergie nucléaire dans le mix de 36% en 2050 (consommation de référence)

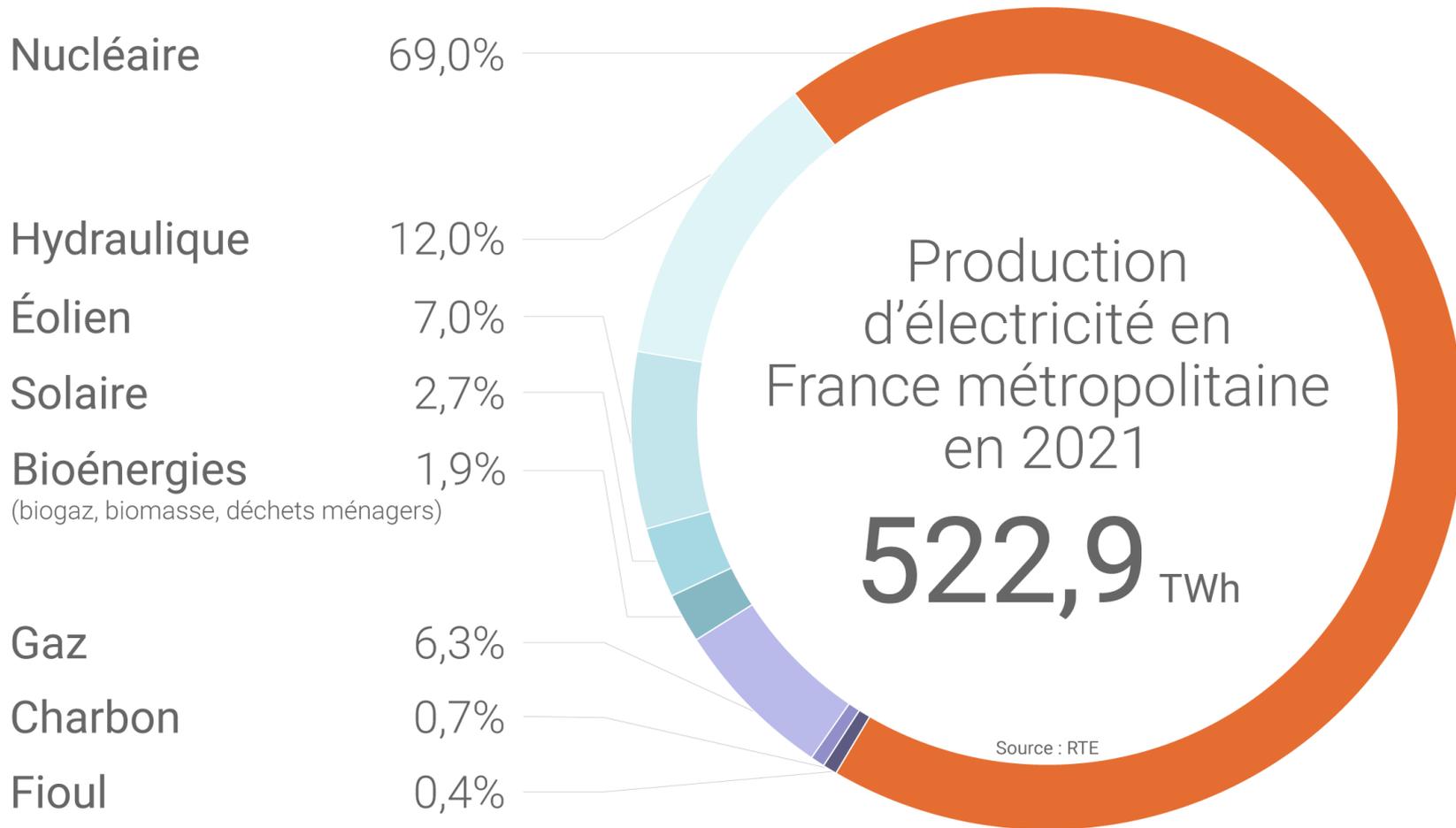
+ Historique prolongation réacteurs 50-60 ans (16 GW)

Comment atteindre la quantité d'électricité requise (650-750 TWh) ?

La part des énergies renouvelables



La part des énergies renouvelables (France)



Les énergies renouvelables électriques



éolien



solaire

Soleil: 100000 TW > biomasse 100 TW
Consommation mondiale: 17 TW



Hydro
(60 TWh)

✓ **Energies de flux (pas de stock)**

✓ **Energies intermittentes**

- Besoins massifs en **stockage d'énergie**
- Valeur économique faible
- Problèmes de stabilisation des réseaux
- Facteur de charge faible (terre)

✓ **Energies de faible densité surfacique**

- PV 7; Eolien 4; hydro 3; Nucléaire 0.08 (m²/MWh)
- Empreinte spatiale forte/artificialisation des sols

✓ **Besoins massifs en matériaux de construction (béton, acier)**

- Éolien 10000; solaire 16000; nucléaire 700 (tonnes/TWh)

✓ **Besoins en ressources minérales**

- terres rares, métaux critiques,..(éolien surtout)

Plus d'investissement global dans les nouvelles technologies (énergies renouvelables et transport électrique)

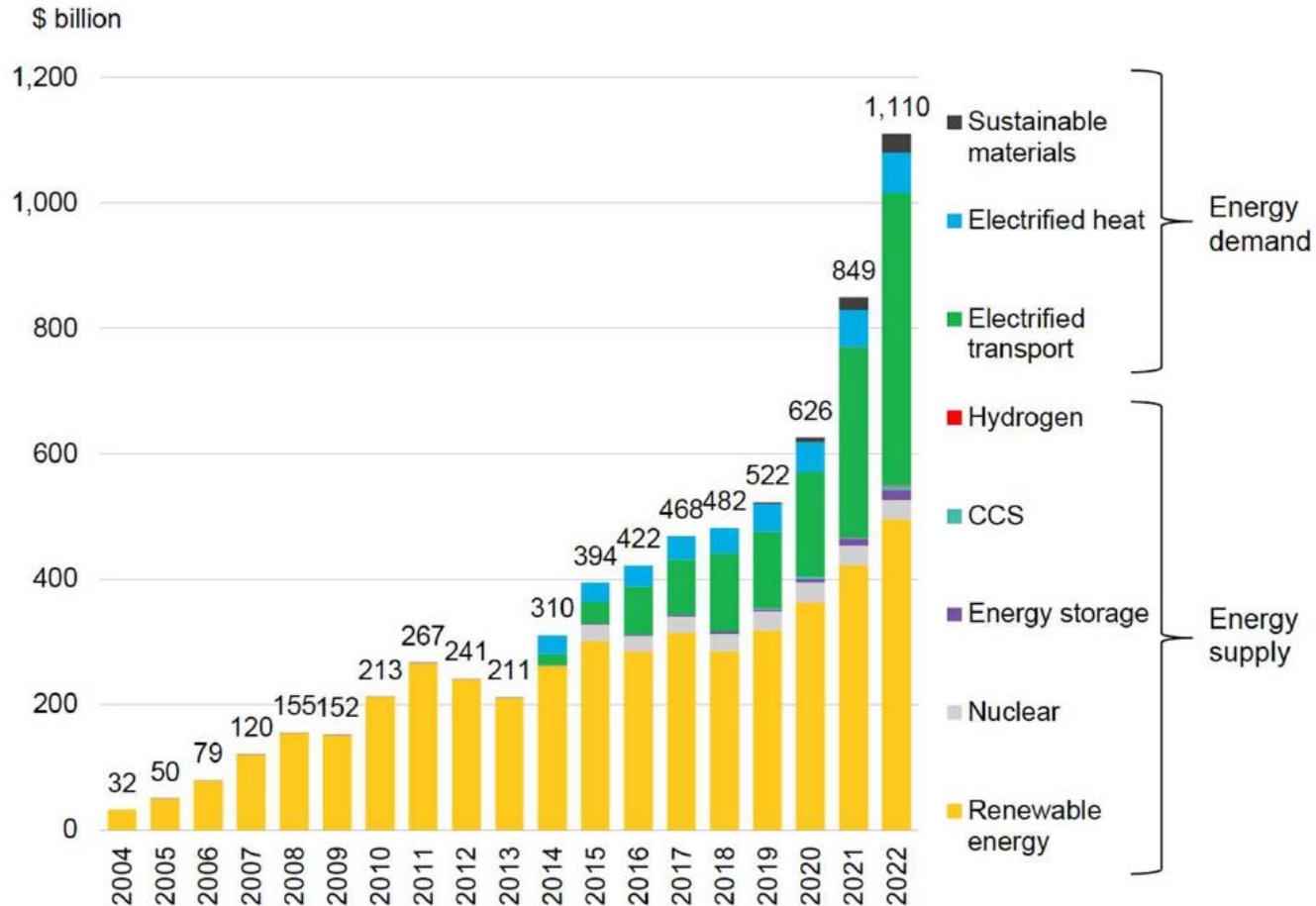


Figure 3: Global investment in energy transition technologies, 2004-2022
Source (BNEF 2023)

Souveraineté: vraiment ?

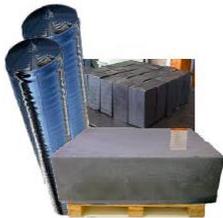
Photovoltaïque

AIE 2022- Académie des Technologies 2023

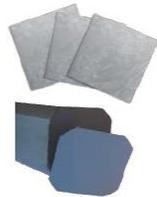
- Demande mondiale ↗:
2021: 1000 sur 28330 TWh (électricité)- 3.5 %
2050: 27000 sur 73231 TWh- 37% (x27)
- Offre:
Chine (80%) Asie Sud Est (18%) Europe (0,9%)
- Technologie silicium (95%)
Rendements: 20%



silicium



lingots



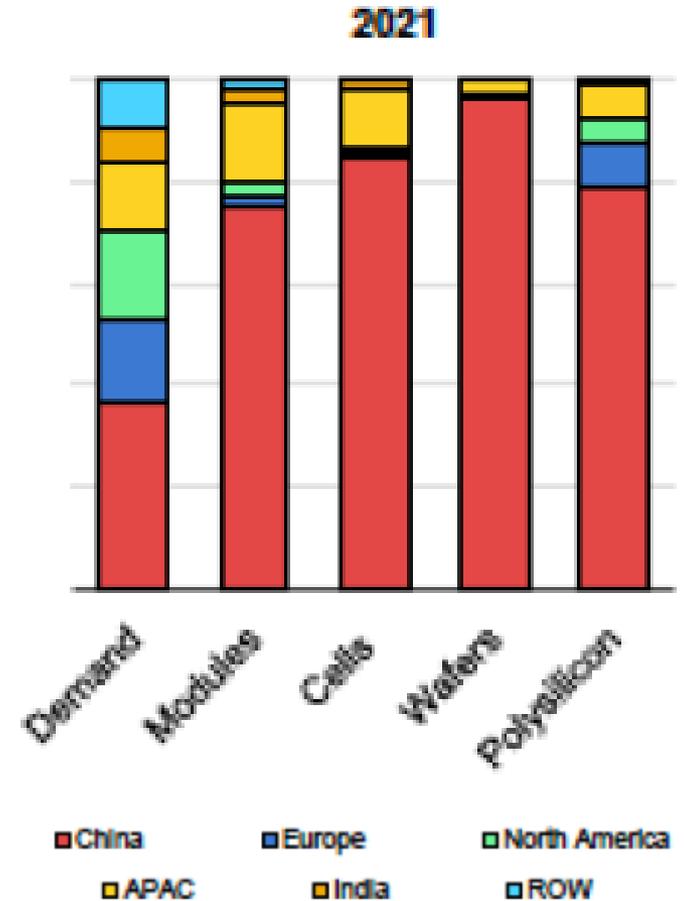
Galettes
wafers



cellules



modules

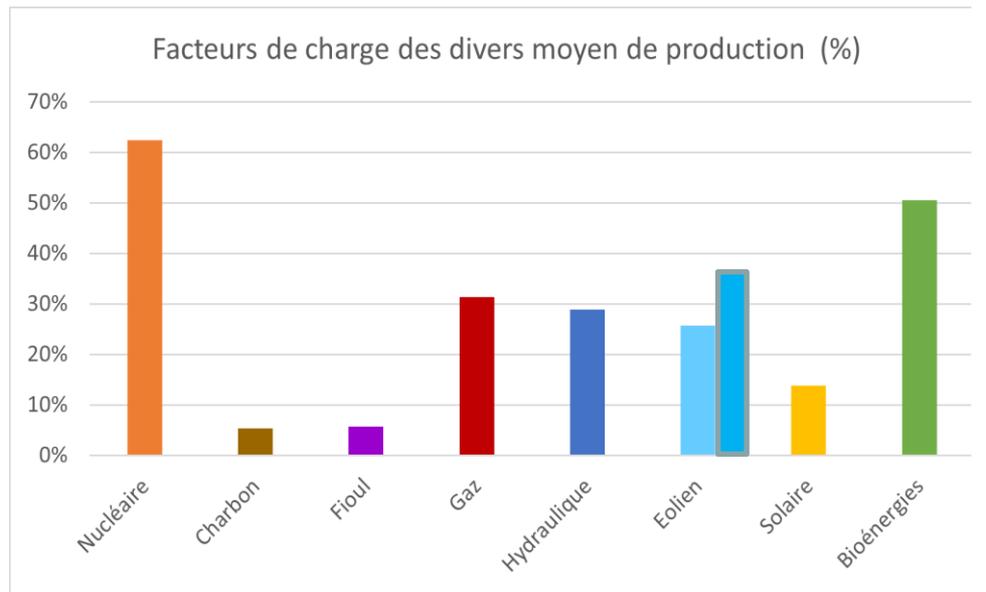
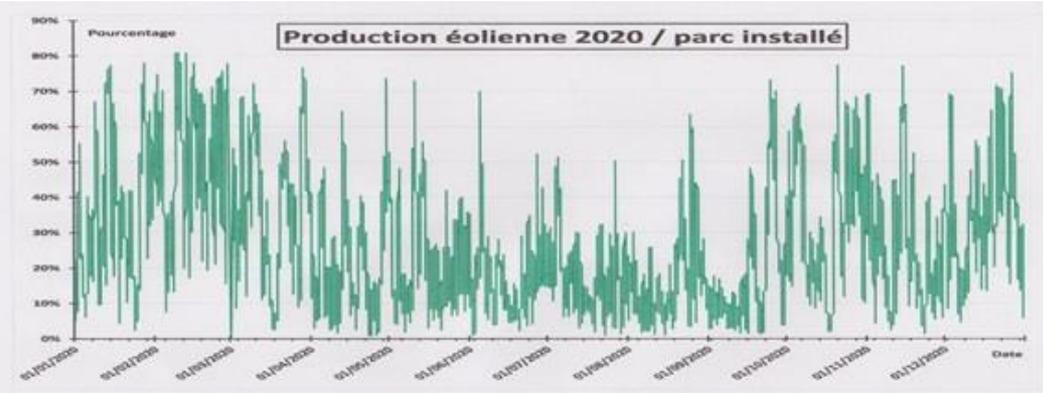


Notes: APAC = Asia-Pacific region excluding India. ROW = rest of world.

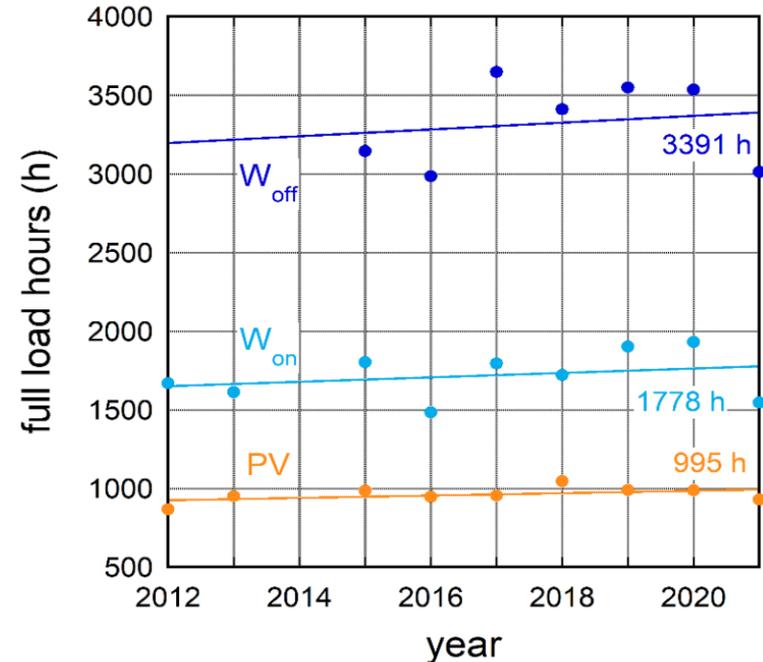
Source: IEA analysis based on BNEF (2022a), IEA PVPS, SPV Market Research, RTS Corporation and PV InfoLink.

Les énergies renouvelables électriques

FRANCE



Intermittence Facteurs de charge



Exemple: **Allemagne**

PV : **11%**; Eolien onshore **23%**; Eolien offshore **38%**

(diviser les heures par 8760 h = 1 an)

Les limites des ENRs électriques



(2021)

Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050

1. Plus de 90% des technologies nécessaires pour atteindre la neutralité carbone sont au stade de la R et D et ne sont pas matures industriellement (stockage, remplacement des systèmes d'inertie,...).

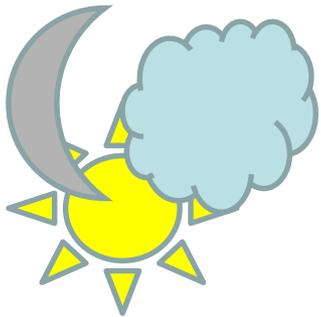
2. Conditions pour un mix à forte proportion d'ENRs

- ✓ Disposer de **capacités de puissance décarbonées pilotables** (80 GW- RTE) (lesquelles ? Hydroélectricité; Gaz décarboné (biogaz, H₂); *gaz naturel*)
- ✓ Développer massivement le **stockage d'énergie** (batteries, hydrogène, hydro...)
- ✓ Développer/renforcer les **infrastructures de réseaux électriques et les Interconnexions transfrontalières**

Équilibre offre/demande-stabilité du réseau STOCKER les ENR

Moyens de flexibilité (réserves et effacement)

- ✓ Centrales pilotables (gaz décarboné, nucléaire)
- ✓ Demande (particuliers, entreprises)
- ✓ Échanges transfrontaliers: imports/exports
- ✓ **STOCKAGE**



INTERMITTENCE
(nuages, nuit,..)



STOCKAGE
de l'ENERGIE

Stockage électrochimique
(batteries)

Stockage chimique
(H₂, carburants)

Stockage hydraulique
(STEP)

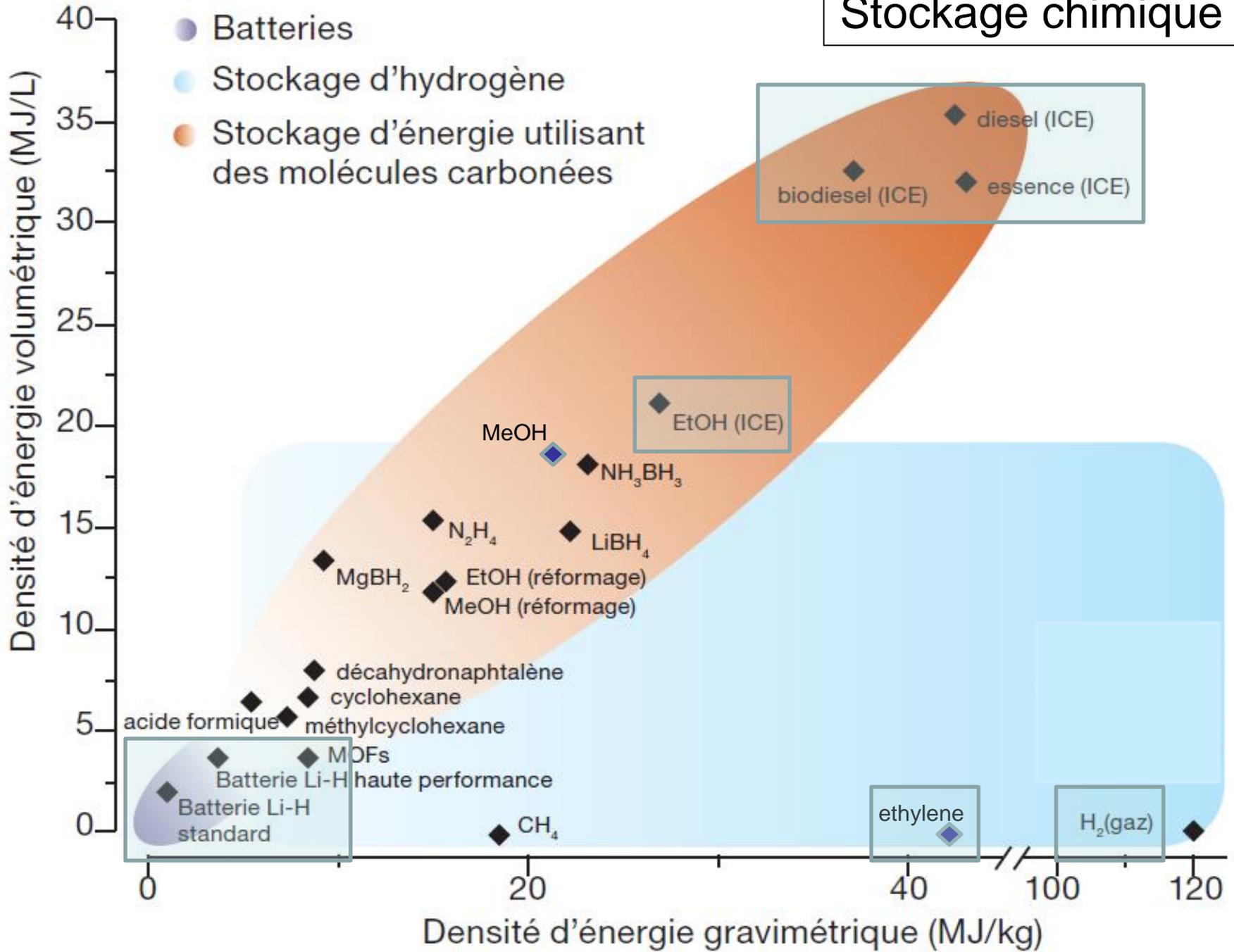
Facteurs de charge

Eolien: 0.24-0.38

Solaire: 0.13

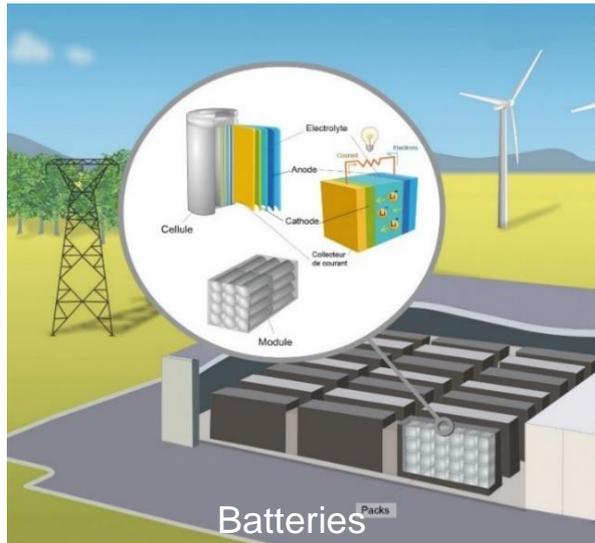
STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage)

Stockage chimique

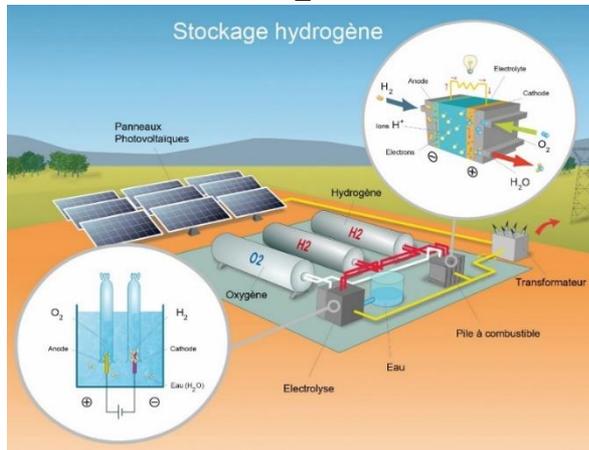


Moyens de flexibilité

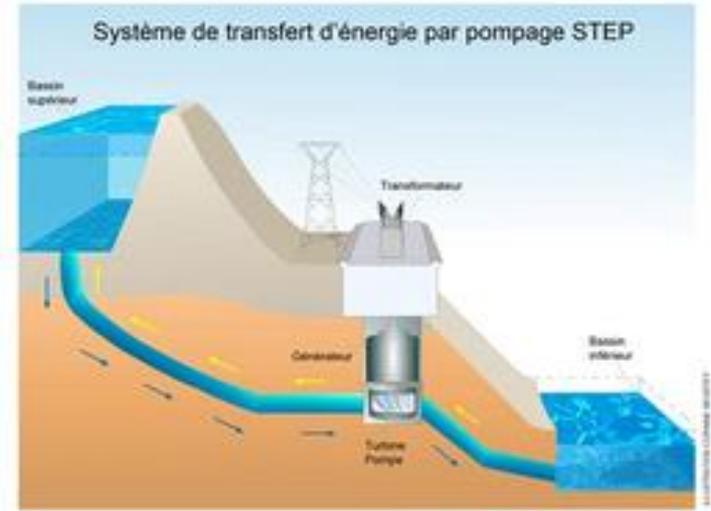
Stockage électrochimique (batteries)



Stockage chimique (H₂)



Stockage hydraulique (STEP)



+ utiliser la flexibilité de la demande

+ utiliser les échanges trans-frontaliers

[+ utiliser les sources pilotables (gaz, nucléaire)]

Moyens de flexibilité

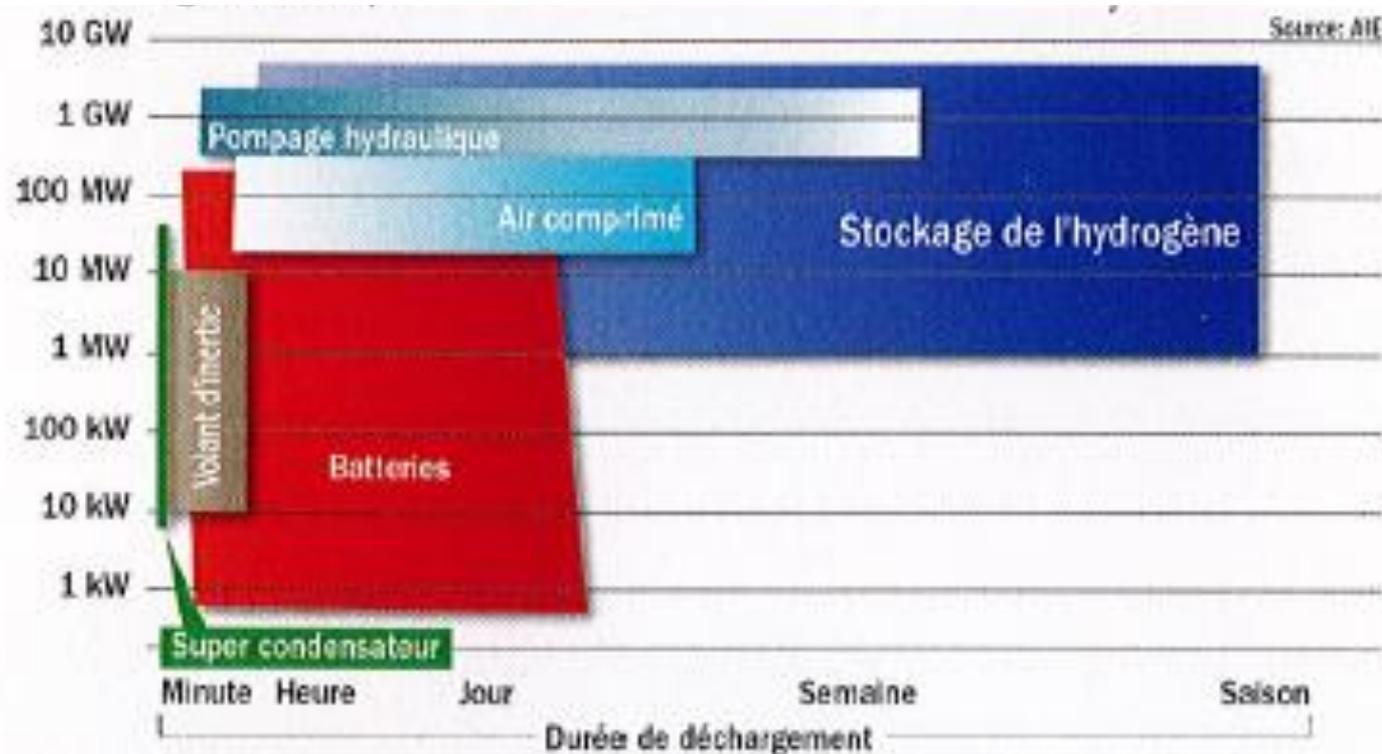
Gestion jour/semaine:

- Demande
- Échanges transfrontaliers
- Batteries
- STEP

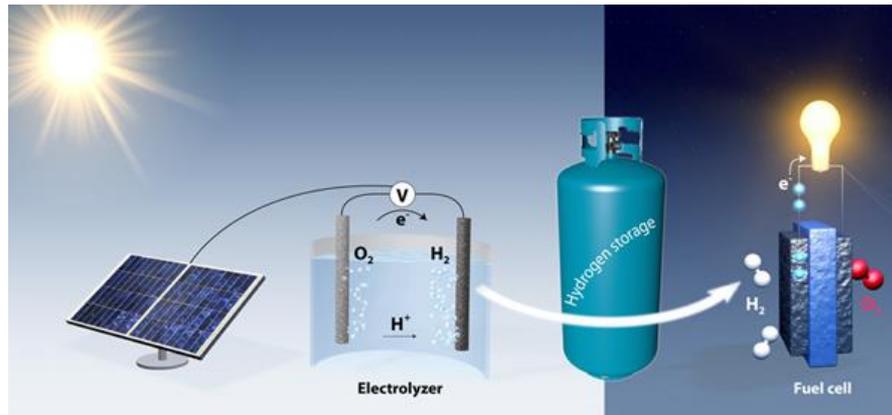
Gestion saison*

- Hydrogène

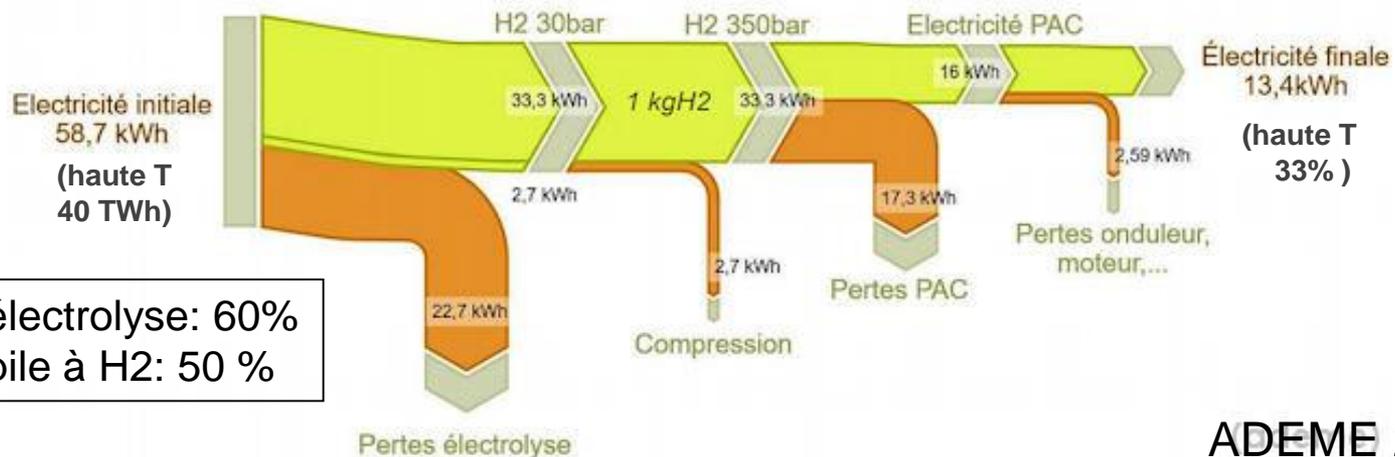
* Besoins aujourd'hui couverts par le nucléaire à coût nul (planification des arrêts de tranches)



Un problème sérieux: les rendements



« Power-to-H₂*-to-Power » rendement : **23 %** (HT 33%)
 (* with compression at 350 bars for storage/transport)

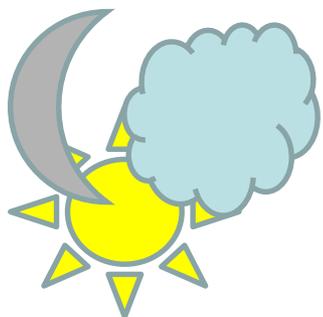


Rendement électrolyse: 60%
 Rendement pile à H2: 50 %

ADEME 2020

58 TWh >>>> 1 million de tonnes H2 (33 TWh) >>>> 13 TWh electricité

Équilibre offre/demande-stabilité du réseau STOCKER les ENR



INTERMITTENCE
(nuages, nuit,..)



STOCKAGE
de l'ÉNERGIE

2020 (11 TWh/an):

- **Stockage hydraulique STEP**
- Centrales thermiques pilotables
- Échanges trans-frontaliers

Scénario
100% ENR

2050 (120-150 TWh/an):

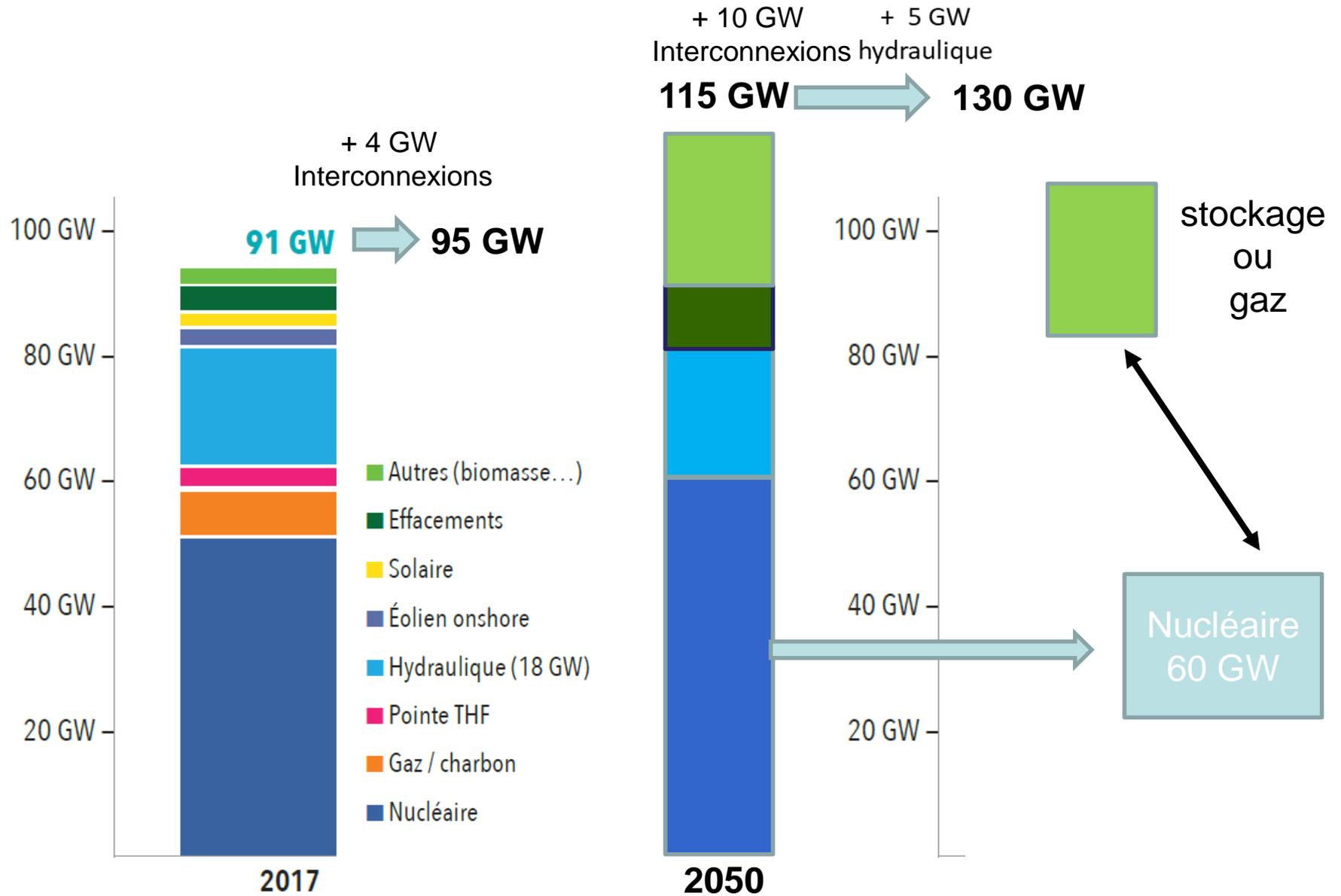
Scénario
50% ENR
50% nucléaire

2050 (50-70 TWh/an):

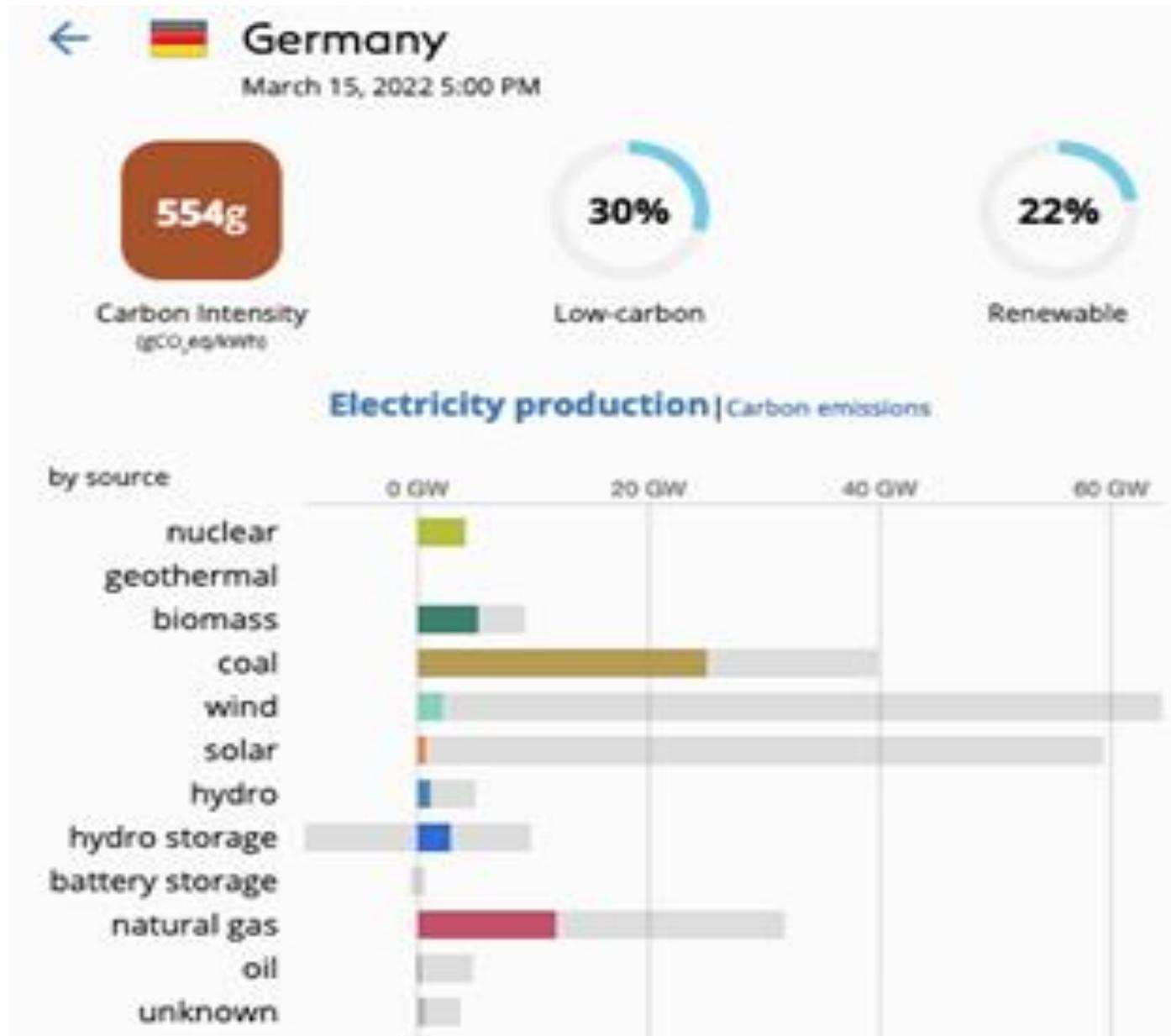
Moyens de flexibilité:

- *STEP*
 - *Échanges trans-frontaliers*
 - *Flexibilité de la demande*
 - Stockage électrochimique (batteries)
 - Stockage chimique (hydrogène)
 - Centrales pilotables
- (réacteurs nucléaires, centrales à gaz décarboné)

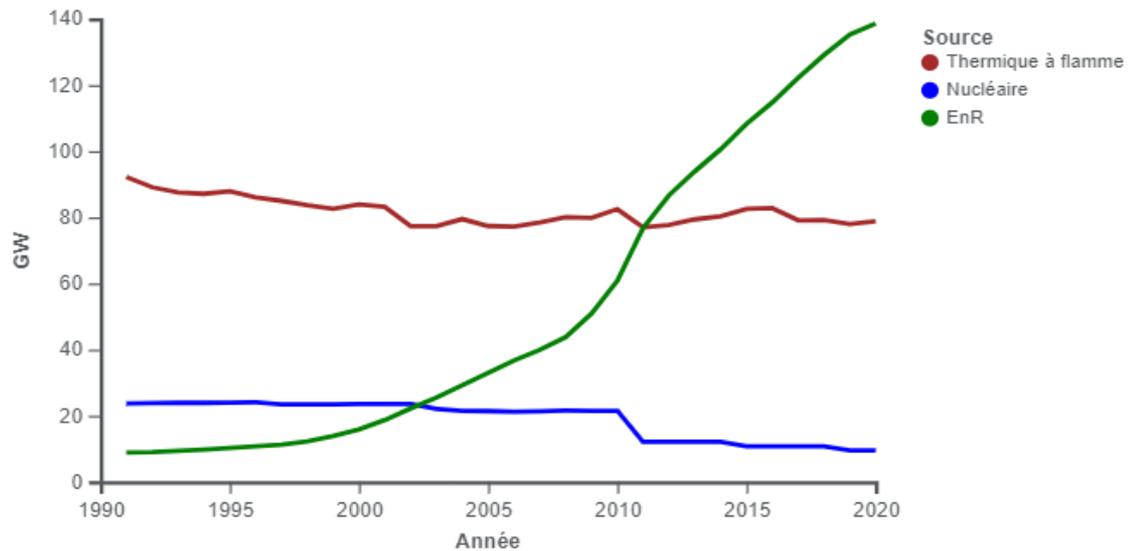
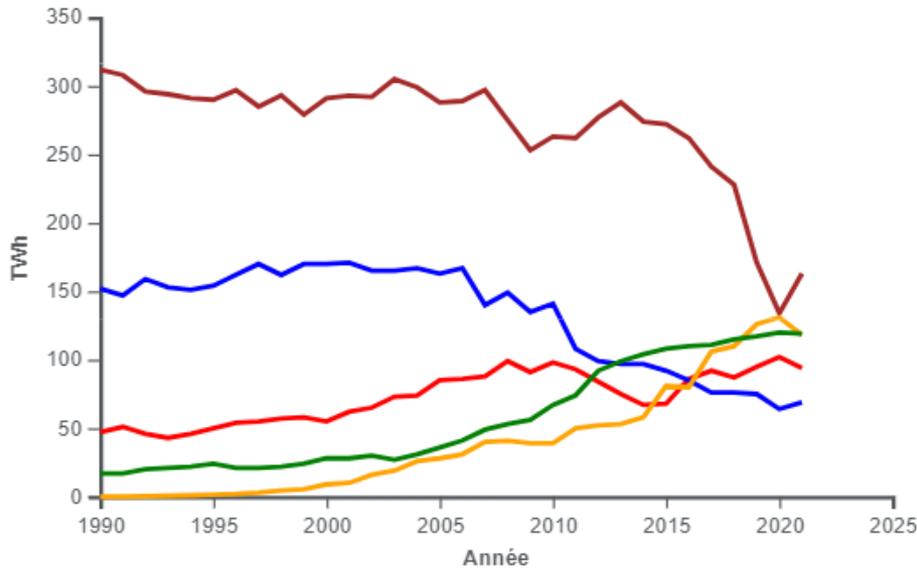
Assurer les pointes



L'Allemagne: exemple?



L'Allemagne: comment l'augmentation de la production intermittente ne change rien à la puissance installée de fossiles



Conclusion

- montée en puissance limitée des ENRs
- Intermittence: besoins massifs en stockage d'énergie
- Technologies de stockage massif indisponibles
- Stockage intersaisonnier ?
- Hydrogène: rendements très mauvais
- Il faut des capacités pilotables !!
nucléaire, gaz décarboné (H₂, biométhane), gaz naturel)