

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : ENJEUX, DEFIS ET PERSPECTIVES

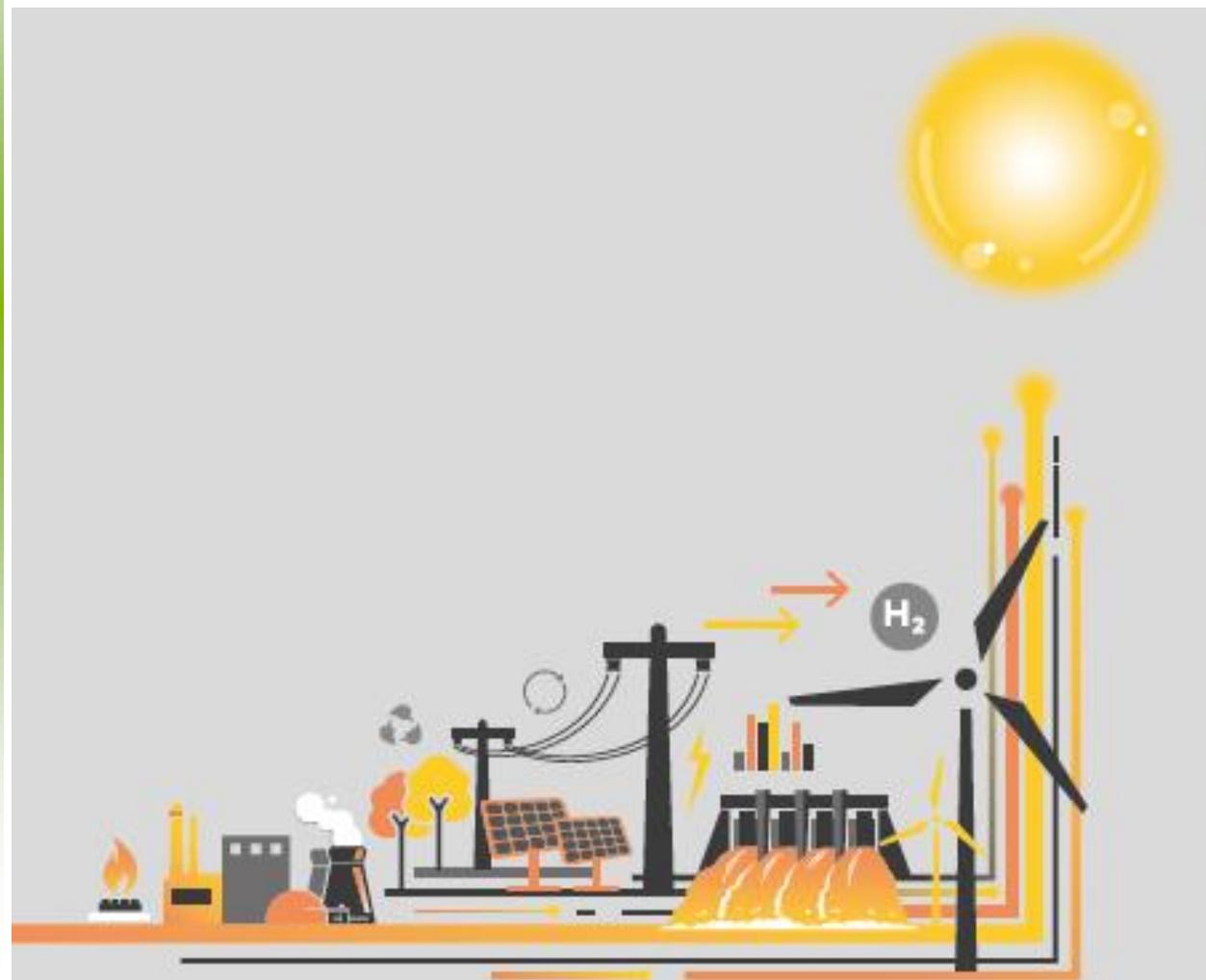
Marc Fontecave

Professeur au Collège de France

Membre de l'Académie des Sciences



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE



LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : ENJEUX, DEFIS ET PERSPECTIVES

Marc Fontecave

Professeur au Collège de France

ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?

L'ENERGIE EN FRANCE

DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER !

SCENARIOS (2035-2050)

**PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE
L'ÉNERGIE (2035)**

CONSOMMATION ELECTRIQUE EN HAUSSE ?

LES COMBUSTIBLES ALTERNATIFS

**SOUVERAINETÉ OU NOUVELLES
DÉPENDANCES ?**

RECHERCHE ET INNOVATION

ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?

Une question globale

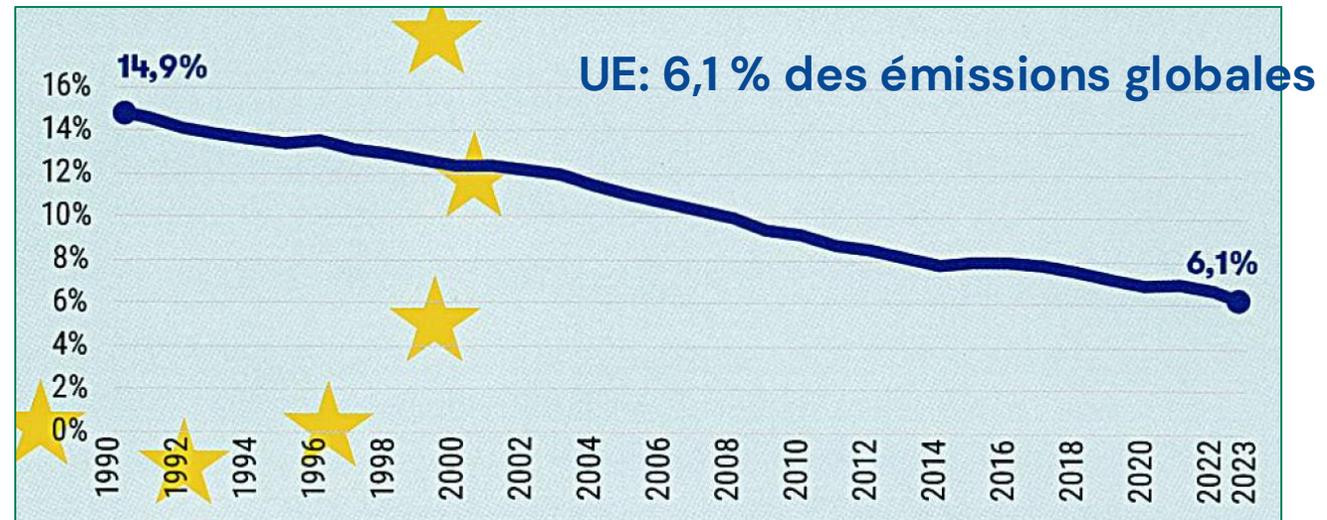
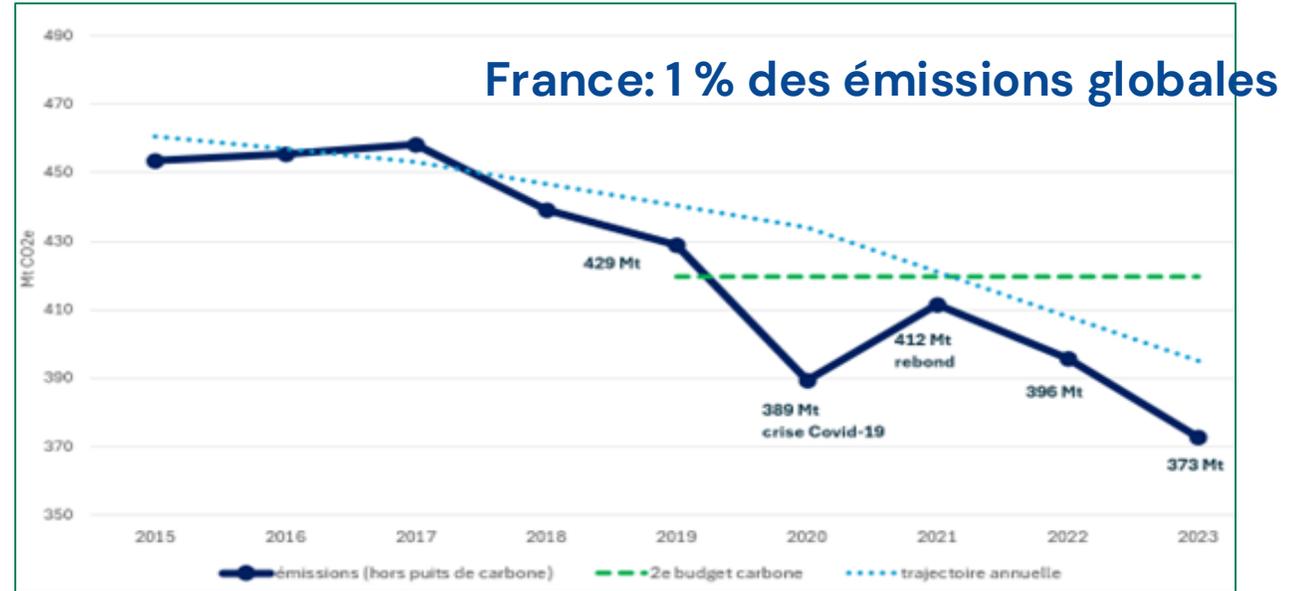
Emissions 2024: 37,4 Gt

Augmentation: + 0,8 % vs 2023

« un rythme identique à celui de la dernière décennie (+0,9 % sur la période 2010-2019). »

- **Europe:** baisse de 3,8 %
- **Etats Unis:** baisse de 0,6 %
- **Chine:** hausse de 0,2 %
- **Inde:** hausse de 4,6 %

- **France:** baisse de 1,8 %
empreinte C : 644 Mt



ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?

Demain, encore des fossiles

AIE 2025

La consommation mondiale de Charbon a atteint un record en 2024. (8,77 milliards de tonnes)
Le niveau des capacités mondiales de centrales à charbon est inégalé (2175 GW)

En 2024 la Chine a commencé la construction de centrales pour une capacité de 94,5 GW (record depuis 2015)

AIE 2025

La consommation mondiale de Gaz Naturel a atteint un record en 2024. (4 200 milliards de mètres cubes - + 2,8 % vs 2023 – croissance moyenne de + 2 % entre 2010 et 2020)
« La demande de gaz devrait encore augmenter en 2025, principalement grâce à la croissance rapide des marchés asiatiques »

AIE juin 2024

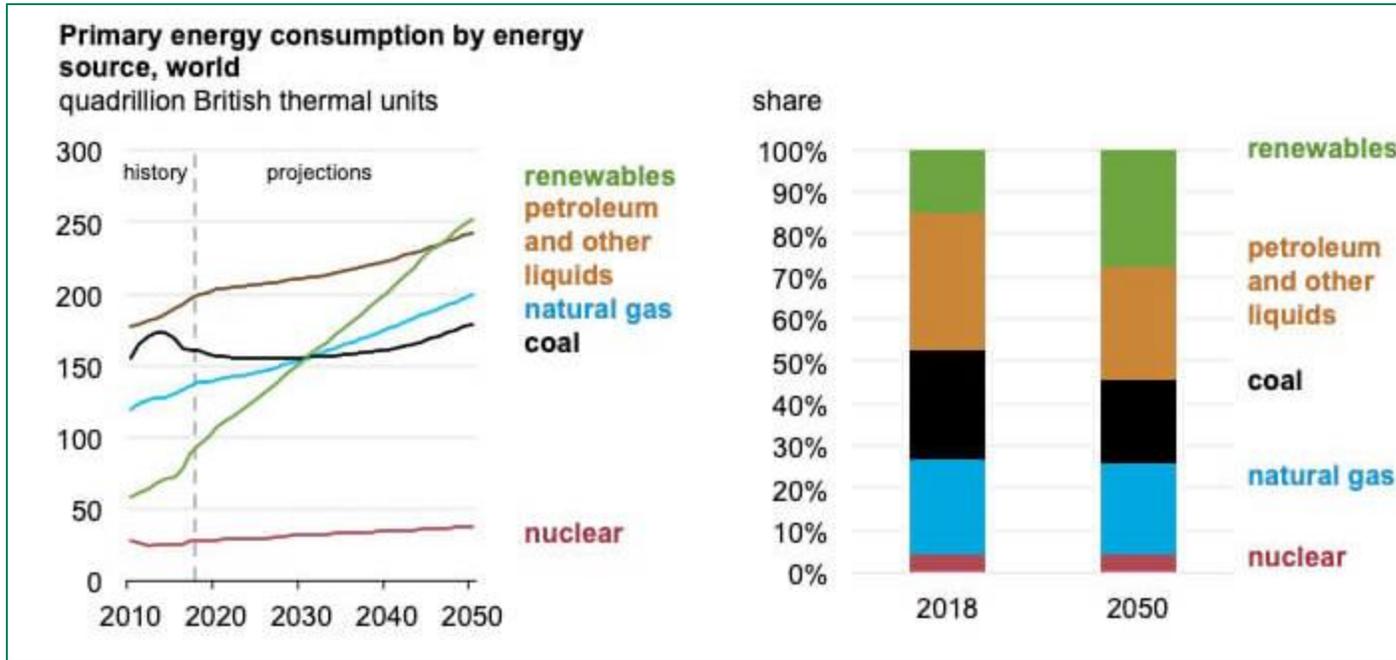
« la demande mondiale de **Pétrole** ne reculera pas avant 2030 et l'on parle désormais d'un plateau. La demande mondiale devrait passer à 106 mb/j à la fin de la décennie. »

AIE et OPEP 2025

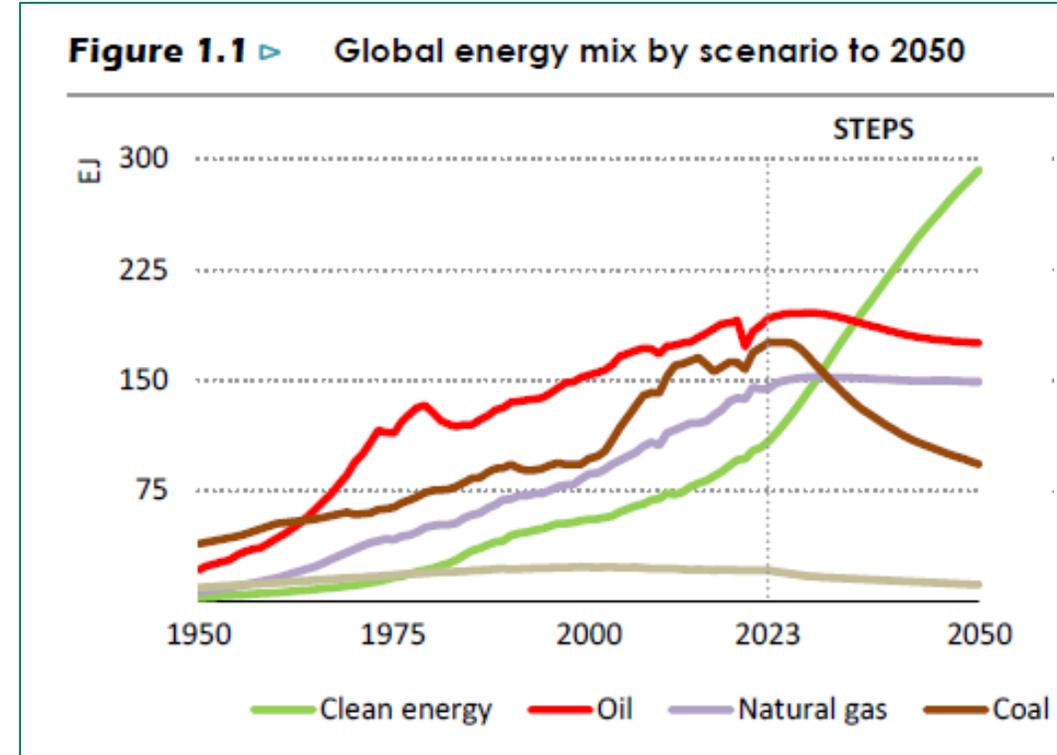
« En 2024, le monde n'aura jamais autant consommé de pétrole, soit 104 mb/jour (103 en 2023)

« la demande mondiale de pétrole devrait encore atteindre un niveau record en 2025, à 105 mb/j »

ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?



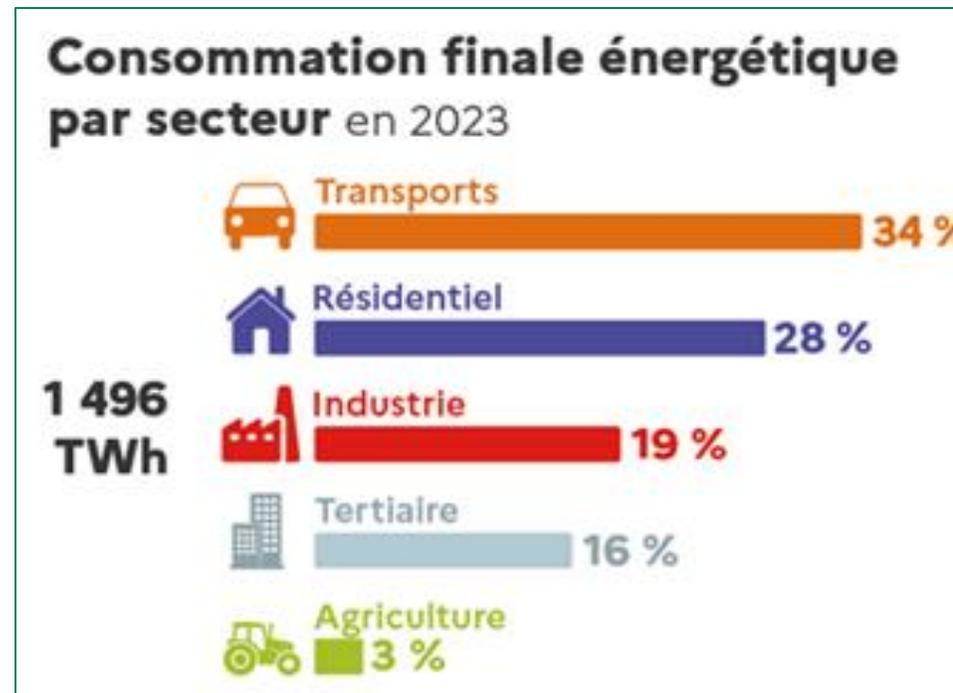
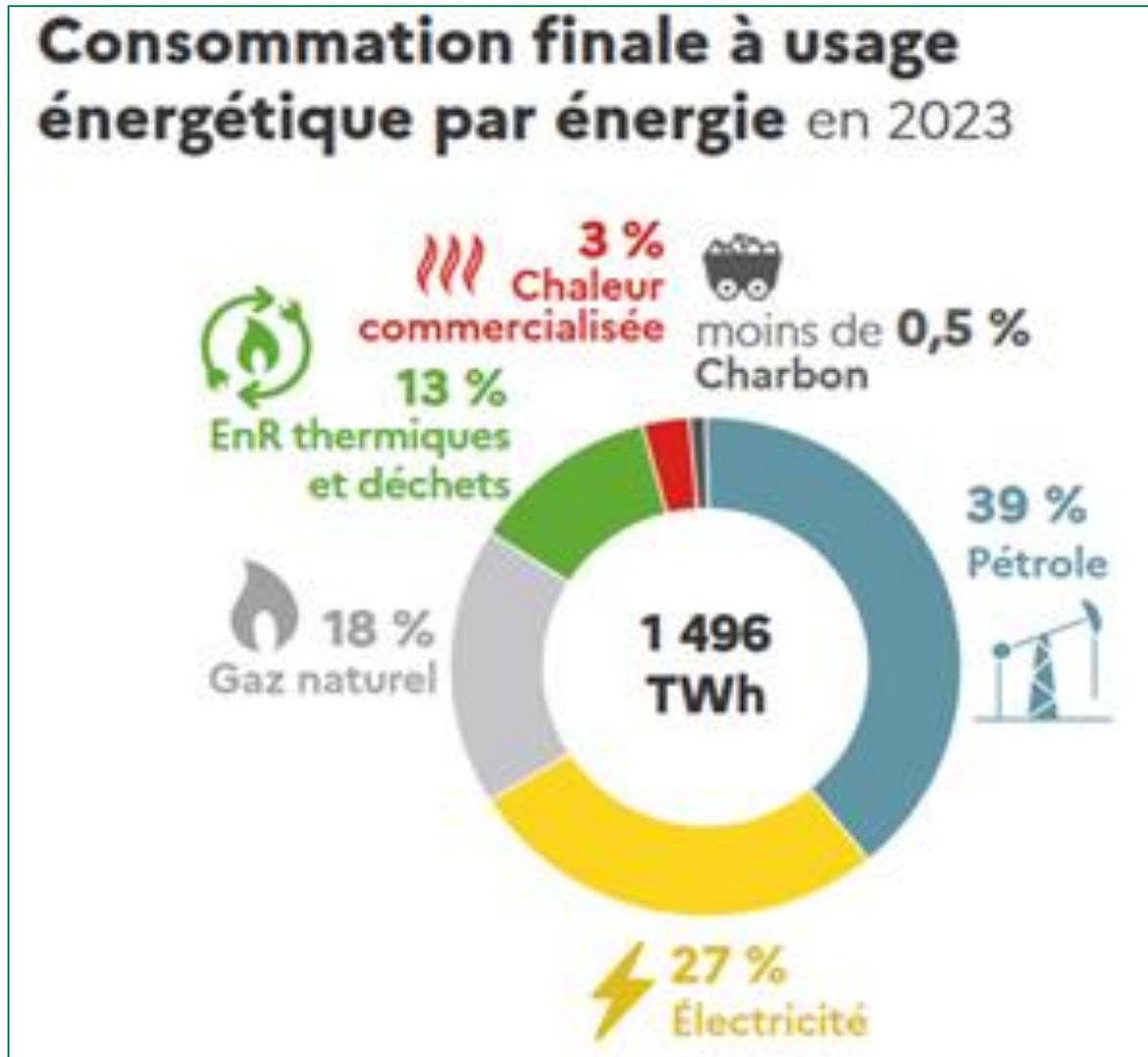
International Energy Outlook 2019



World Energy Outlook 2024 (IEA)

Fossiles: de 82 % (2020) à.....60-70% (2050) de l'énergie mondiale

L'ENERGIE en France (2023)



1496 TWh

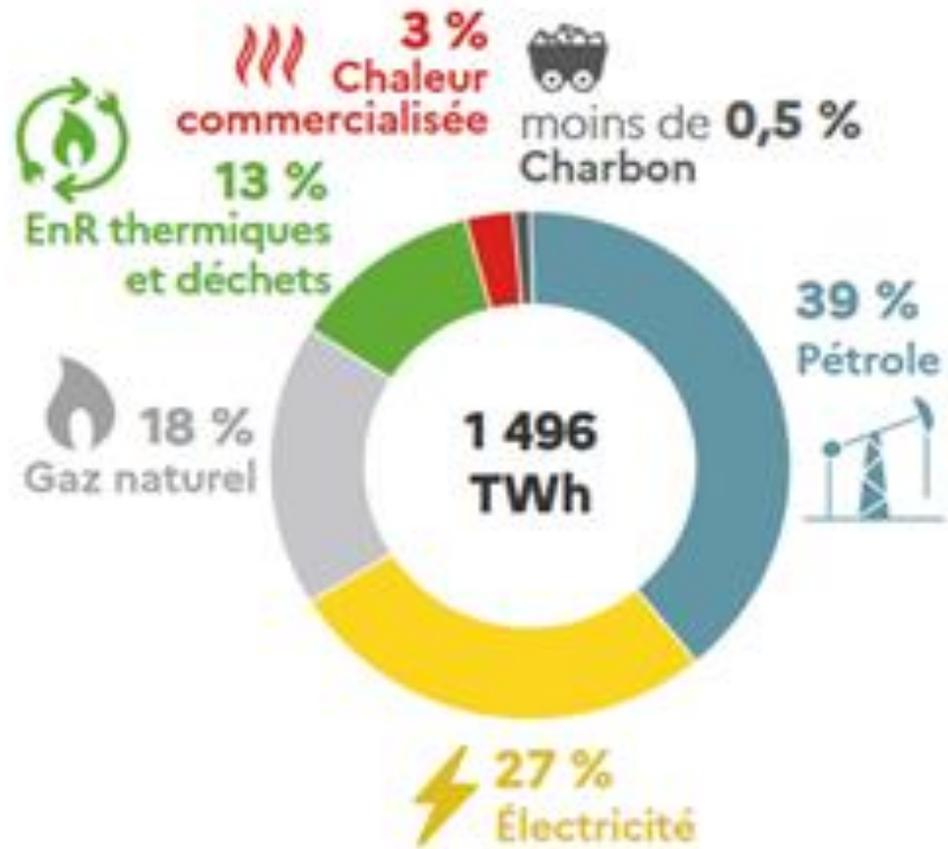
Electricité 27%; 95 % décarbonée

Fossiles: 58 %

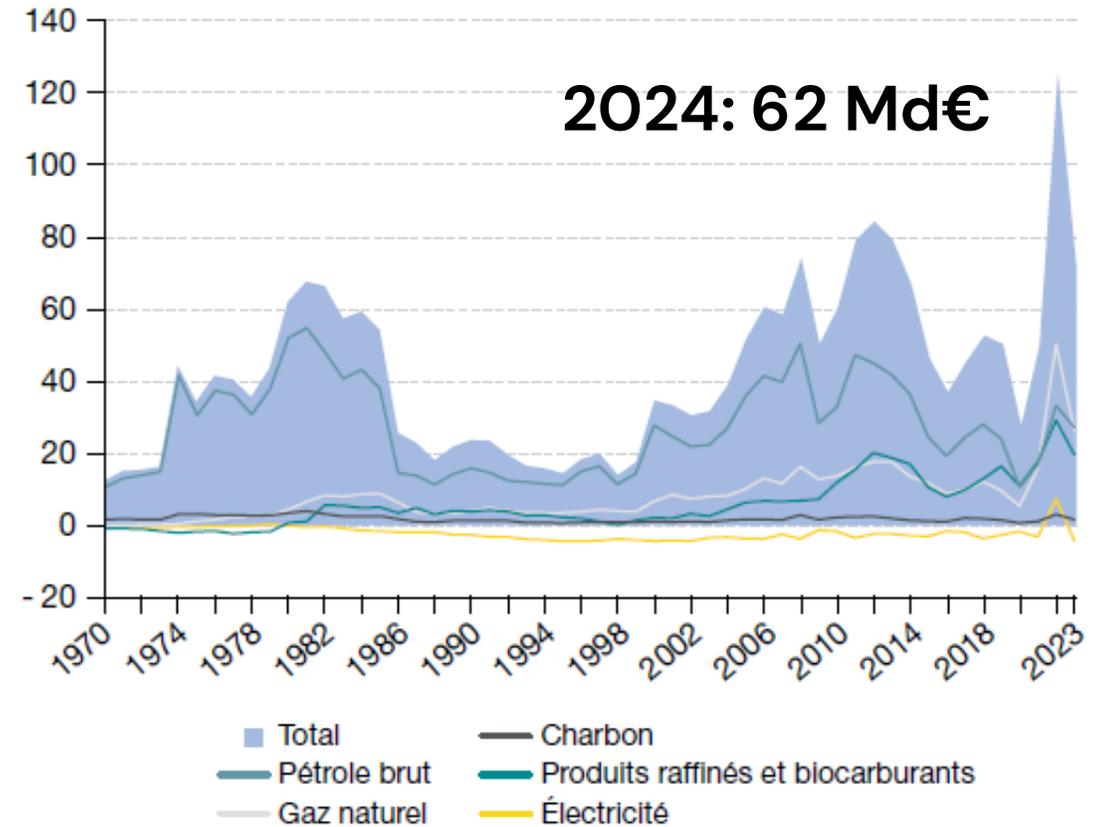
Pétrole/gaz importé en totalité (transport, chauffage, etc..)

L'ENERGIE en France (2023)

Consommation finale à usage énergétique par énergie en 2023



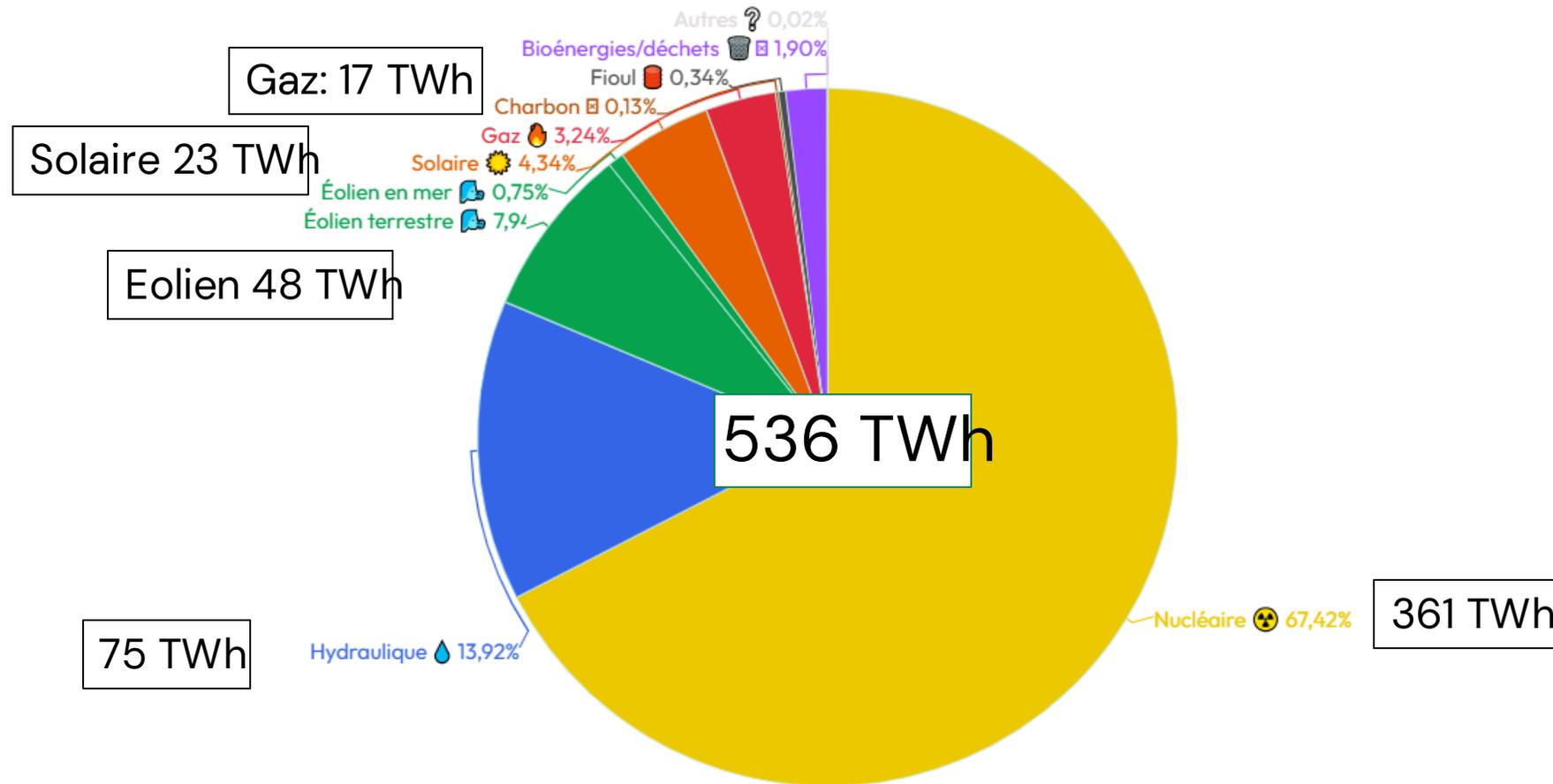
Graphique 2 : facture énergétique de la France
En milliards d'euros 2023



Source : SDES, Bilan de l'énergie, d'après DGDDI, enquête auprès des raffineurs, RTE, enquête gazière

Production électrique 2024 (France)

Production électrique par filière en France en 2024



L'ELECTRICITE en France (2024): *décarbonée*

Bilan électrique 2024; RTE (2025)

Production

536 TWh

Consommation

447 TWh

Solde export/import

89 TWh

➔ Record (77 TWh en 2002)
1er pays exportateur en UE

% production bas carbone

95 %

% production ENR

29 %

➔ Record: 48 TWh éolien, 23 TWh solaire

% production fossile

3,6 %

➔ Niveau le plus faible depuis 1950

Émissions totales GES

11,3 Mt_{eq}CO₂

➔ Niveau le plus faible depuis 1950

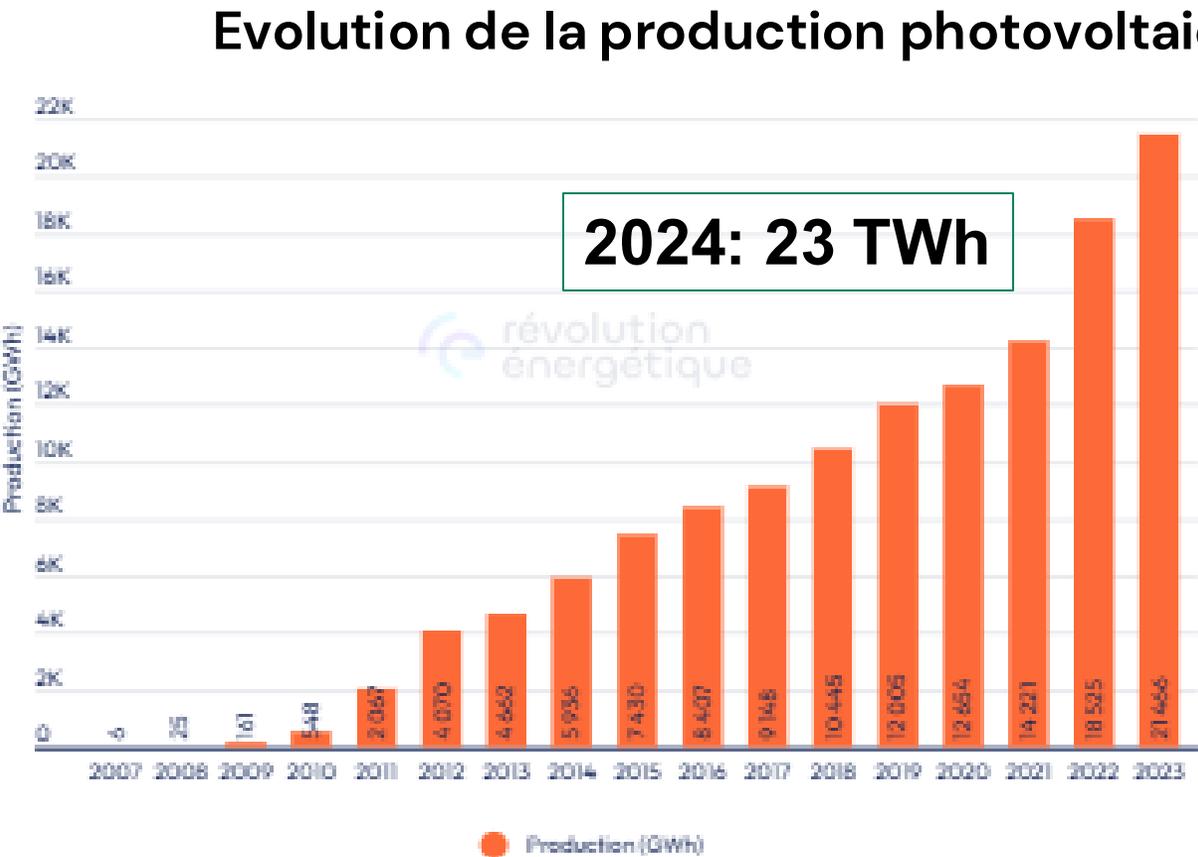
Intensité carbone

21,3 gCO_{2eq}/kWh

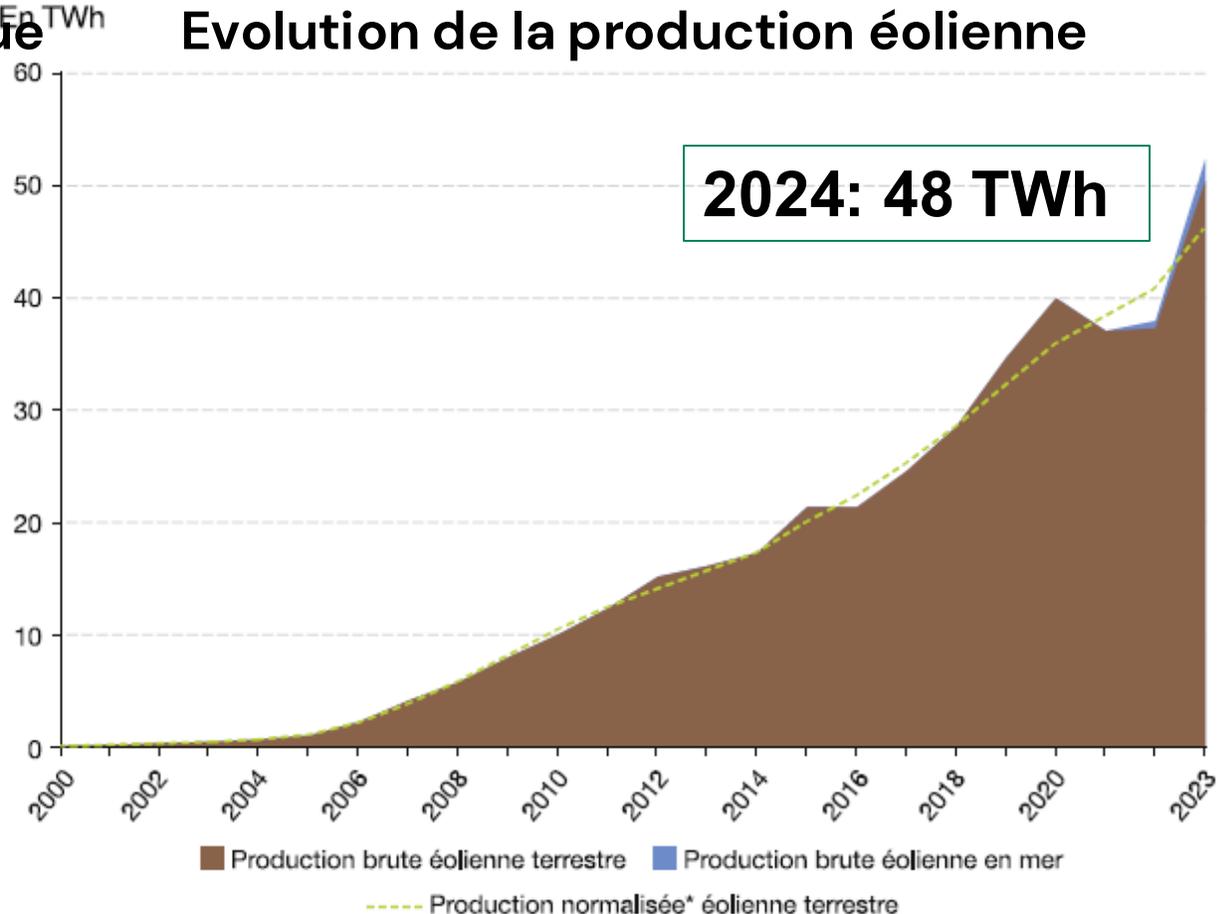
➔ Record (Allemagne 360)
Parmi les plus basses au monde

Energies renouvelables (solaire, éolien) France

Evolution de la production photovoltaïque



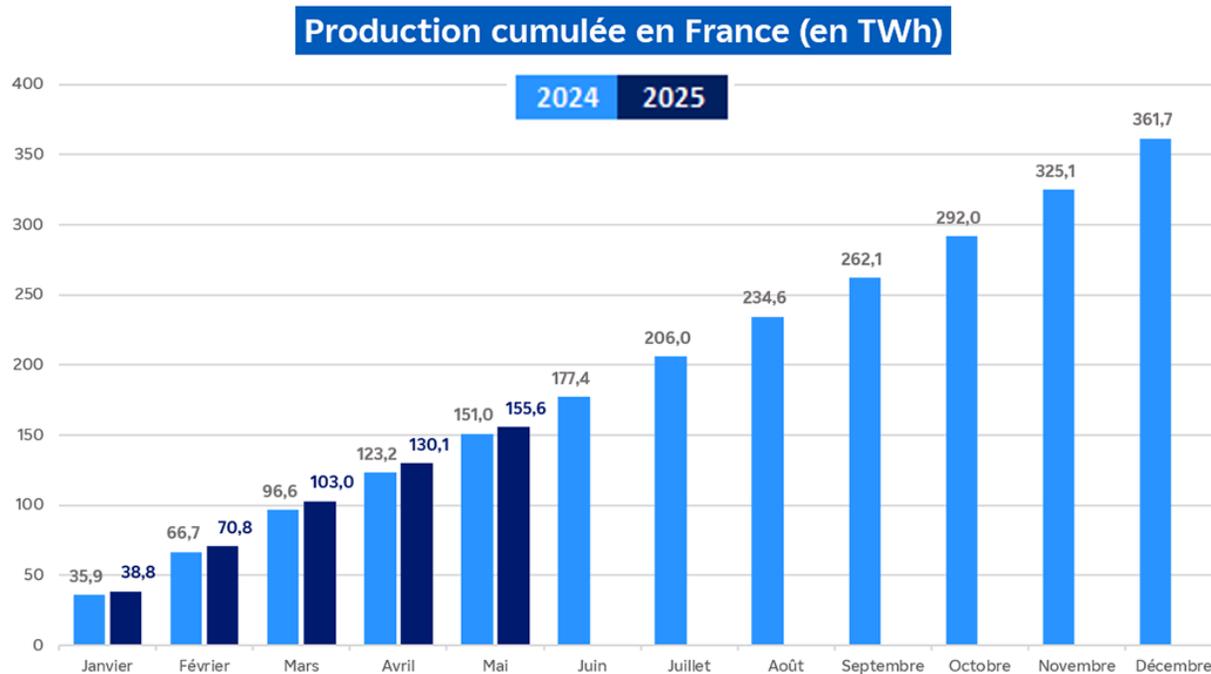
Evolution de la production éolienne



ENERGIE NUCLÉAIRE (France): où en est-on?

- 56 réacteurs et démarrage de l'EPR de Flamanville
- 361,7 TWh en 2024; 370 en 2025 (EDF)
- PPE et CPN* (17 mars 2025): 6 + 8 réacteurs EPR2

*Conseil de Politique Nucléaire



Réacteurs nucléaires

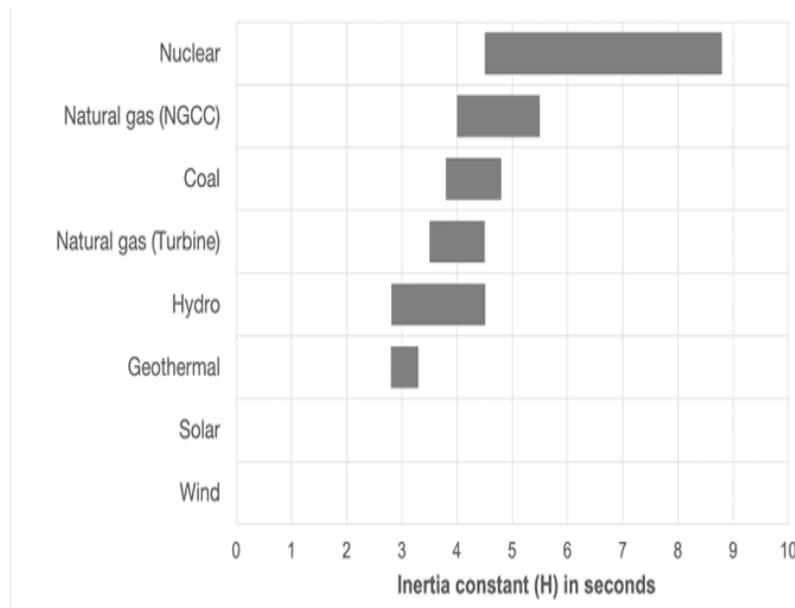
- ✓ Énergie de stock bas carbone*
- ✓ Pilotables (dans une certaine limite et sur toutes les échelles de temps)
- ✓ Stabilisent la fréquence du réseau (inertie mécanique des turbines)
- ✓ Contribuent à réguler la tension

* 1 kg U = 160 tonnes de charbon

ENERGIE NUCLÉAIRE (France): où en est-on?

- 56 réacteurs et démarrage de l'EPR de Flamanville
- 361,7 TWh en 2024; 370 en 2025 (EDF)
- PPE et CPN (17 mars 2015): 6 + 8 réacteurs EPR2

Figure 2: Typical Magnitudes of the Inertia Constant (H) for Different Types of Power Generation



Source: QuantifiedCarbon

Oxford Institute for Energy Studies 2023

Réacteurs nucléaires

- ✓ Énergie de stock bas carbone*
- ✓ Pilotables (dans une certaine limite et sur toutes les échelles de temps)
- ✓ Stabilisent la fréquence du réseau (inertie mécanique des turbines)
- ✓ Contribuent à réguler la tension

* 1 kg U = 160 tonnes de charbon

Un MIX ÉLECTRIQUE: ENR + NUCLÉAIRE

Nucléaire + solaire + éolien + Hydro+ gaz



Avis de l'Académie des Sciences (2021)

- Prolongation des centrales (40 > 60-70 ans)
- Construction de nouveaux réacteurs (EPR-SMR)
- Recherche et développement pour des réacteurs du futur : réacteurs neutrons rapides (RNR)



ENERGIE NUCLÉAIRE (Monde): où en est-on?

iea

The Path to a New Era
for Nuclear Energy

International
Energy Agency



- Prévisions 2025: 2900 TWh (2024:2800)-9 % du mix
- 2^e des énergies bas-carbone (après hydro)
- 2024: 7 réacteurs (8,1 GW) ont été connectés au réseau (Chine 3; Emirats 1; Inde 2; USA 1, France 1) 2 redémarrent au Japon, 2 ferment (Taiwan, Russie)
- **Italie**: loi de relance du nucléaire (28 02 2025)
- **Belgique**: abrogation la loi du 31 01 2003 sur « la sortie de l'énergie nucléaire » (15 05 2025)
- 63 réacteurs en construction (75 GW) (½ Chine)
- 10 nouveaux réacteurs approuvés en Chine (27 04 2025: Conseil des affaires d'Etat Chinois)

DÉFOSSILISER ET NON DÉCARBONER



solides/gaz/ liquides alternatifs ?
Biomasse
(bois, biogaz, biocarburants,...)

Biomasse: Rapport de l'académie des sciences



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Rapport du Comité de prospective en énergie de
l'Académie des sciences - Janvier 2024

Quelles perspectives énergétiques pour la
biomasse ?

La biomasse: une source d'énergie contrainte

Les gisements sont limités (et incertains)

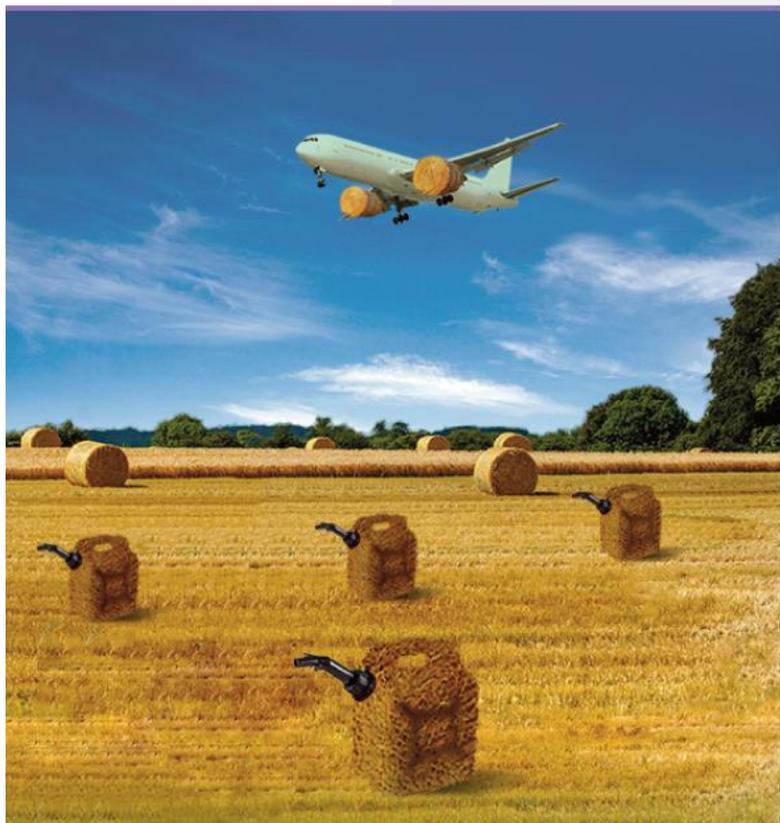
- Biomasse agricole → biogaz/biocarburants (150-300 TWh)
- Biomasse forestière (à préserver)

La biomasse n'est pas une source d'énergie idéale

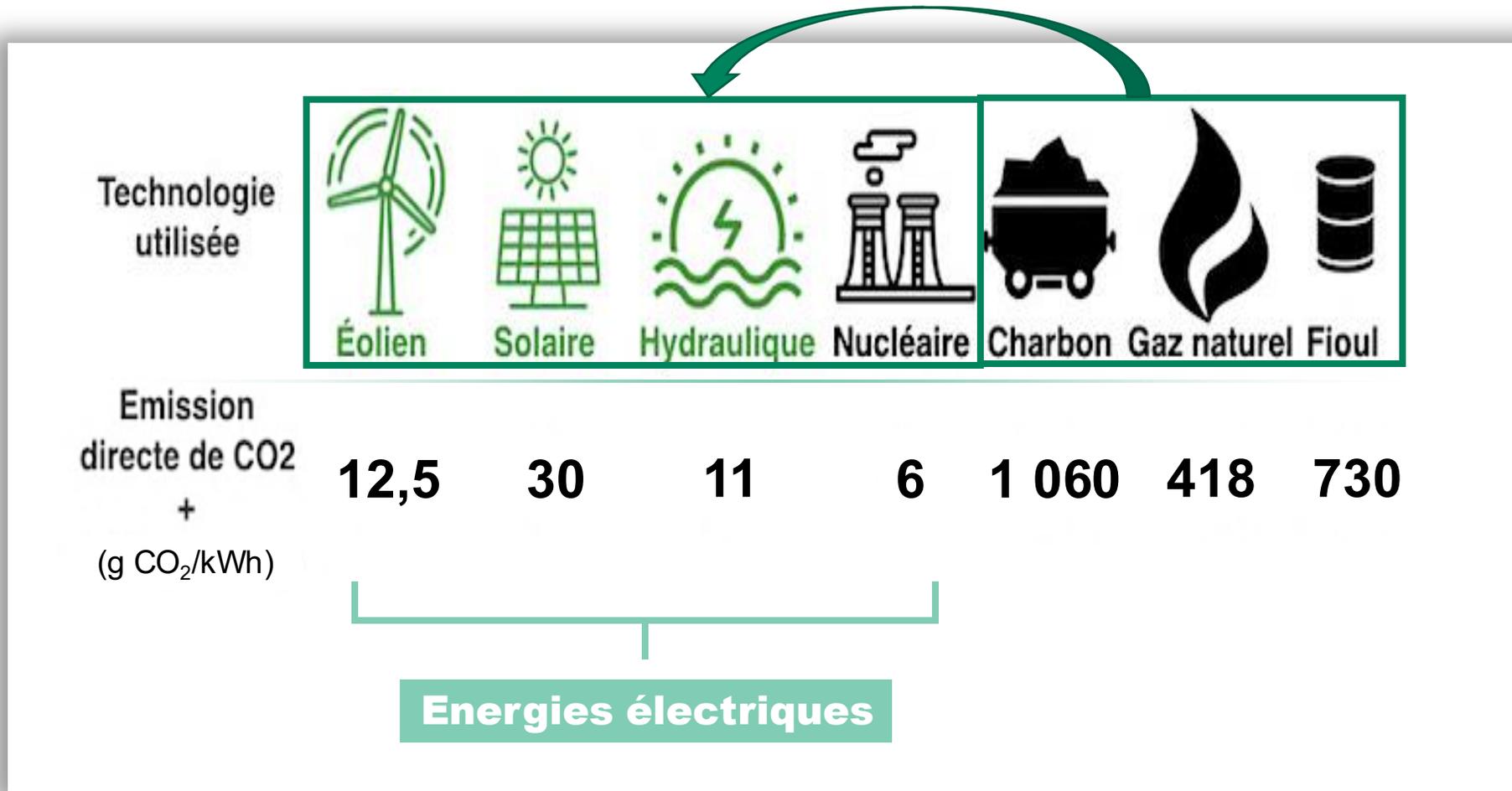
- Compétition avec production alimentaire (biocarburants 1G)
- Impacts environnementaux et empreinte carbone
- Usage massif de la surface

Besoins de recherche/innovation

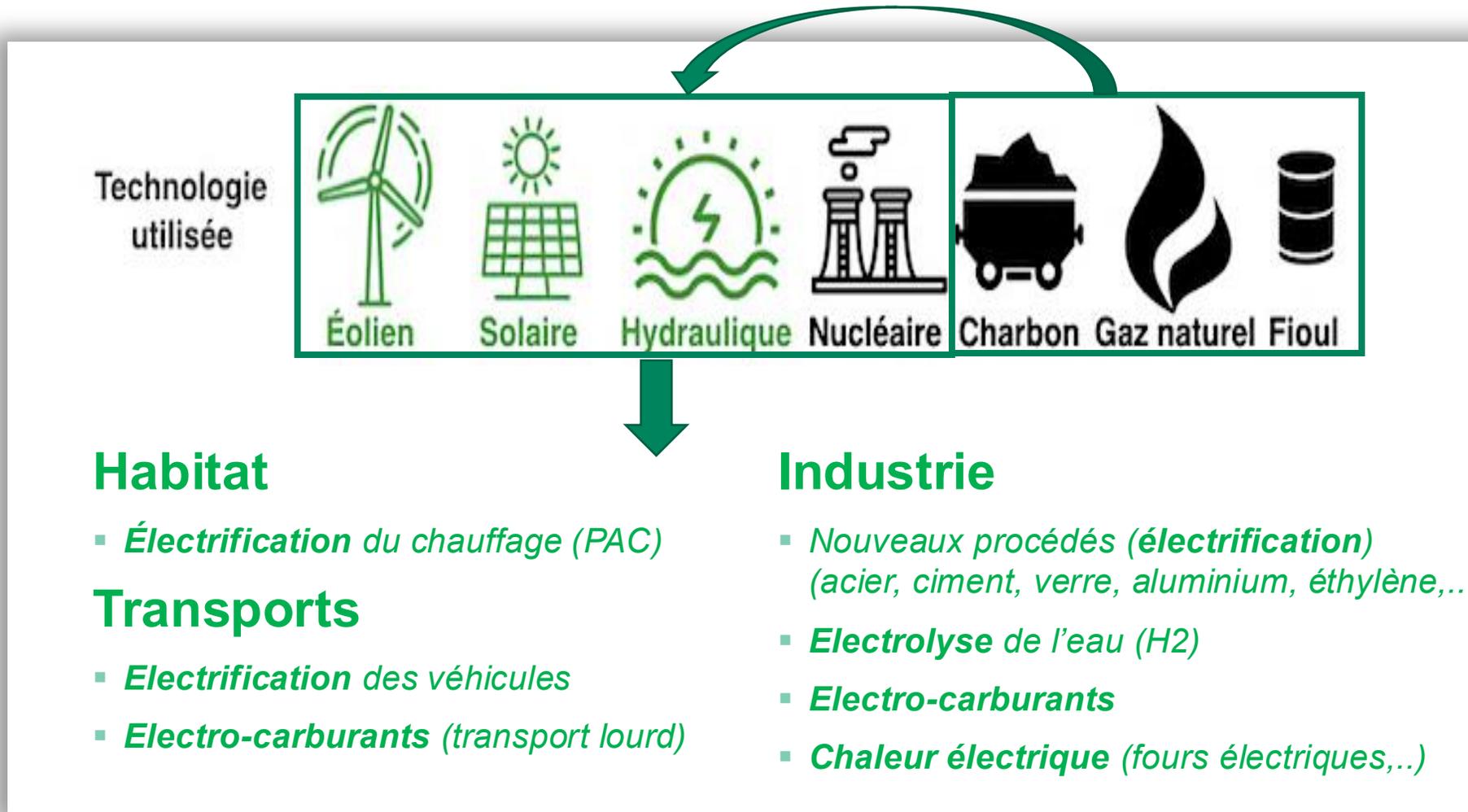
- Biocarburants 2G/3G
- Nouveaux procédés de conversion de la biomasse
- Chimie organique « bio-sourcée »



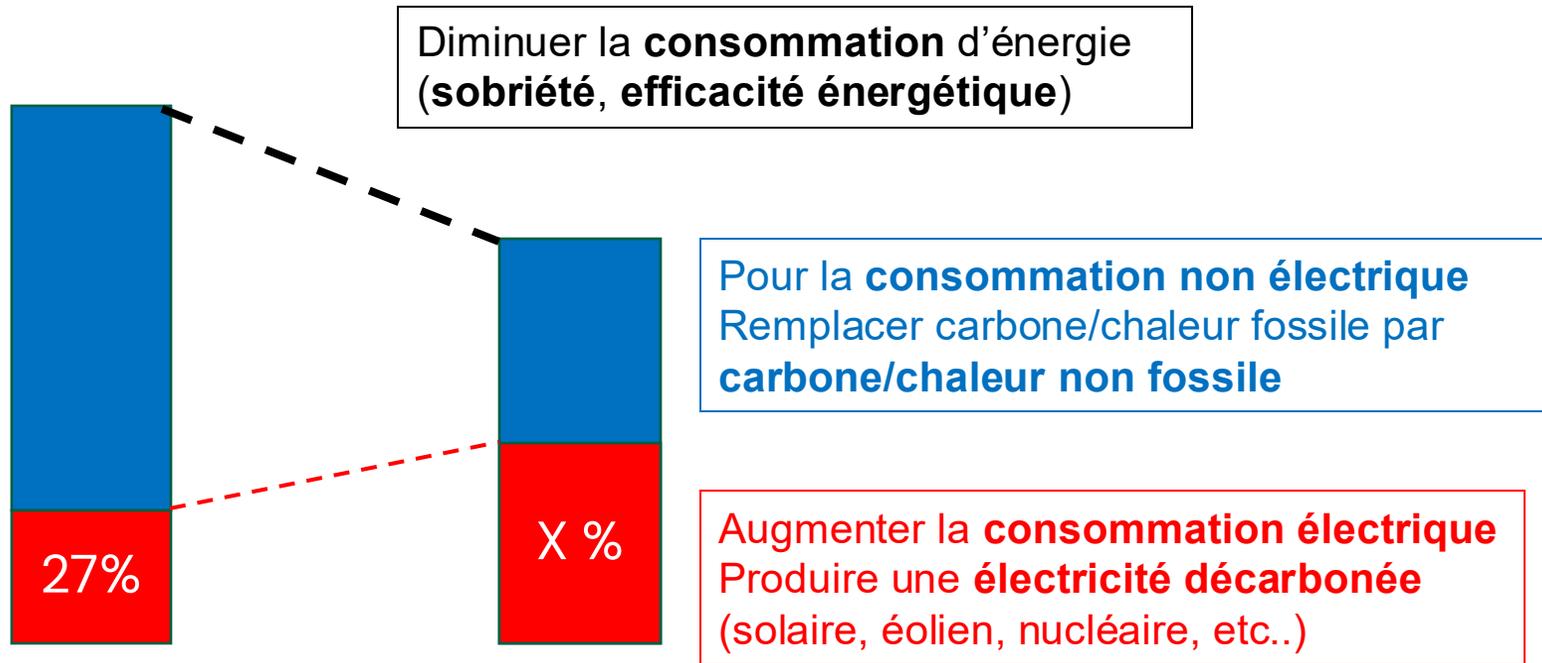
POURQUOI DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER ?



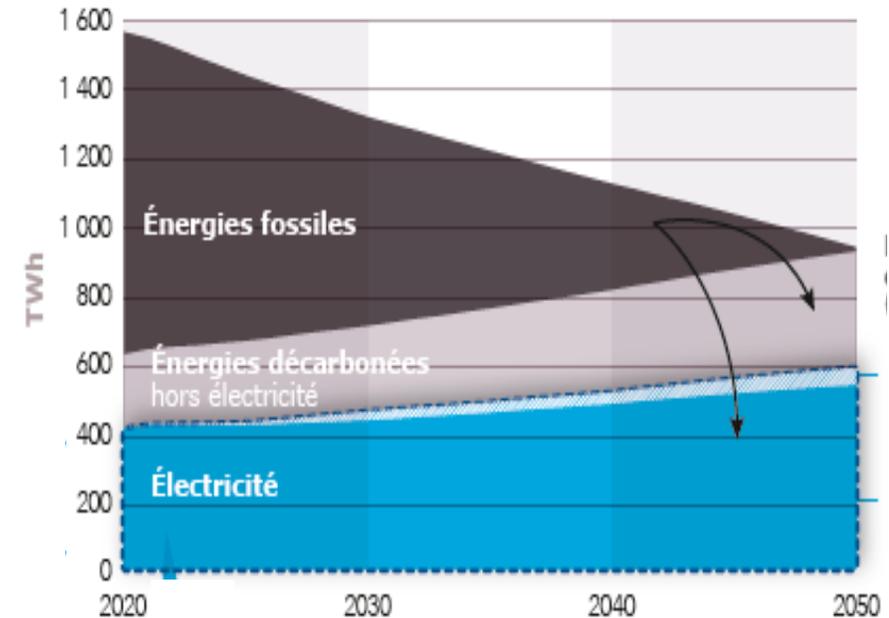
POURQUOI DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER ?



SCENARIOS 2035-2050 (France)?



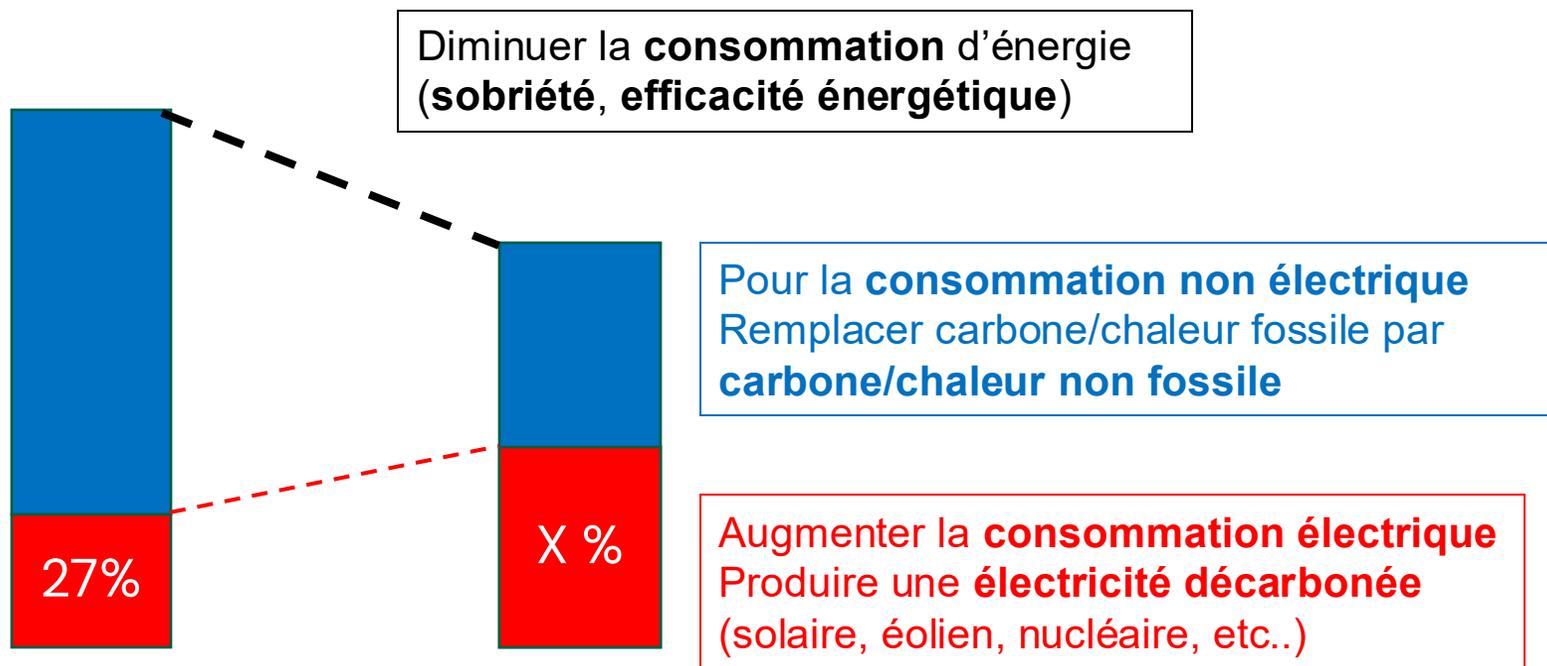
Projection consommation finale (SNBC)
la consommation d'énergie finale en France dans la SN



SCENARIOS 2035-2050 (France)?

Electrification des usages*

450 (2024) + 300 (2050) = 750 TWh



Transports (Véhicules électriques)
90 TWh

Hydrogène
50 TWh

Habitat-Chauffage
40 TWh

Industrie (acier, chaleur, e-fuels,..)
90 TWh

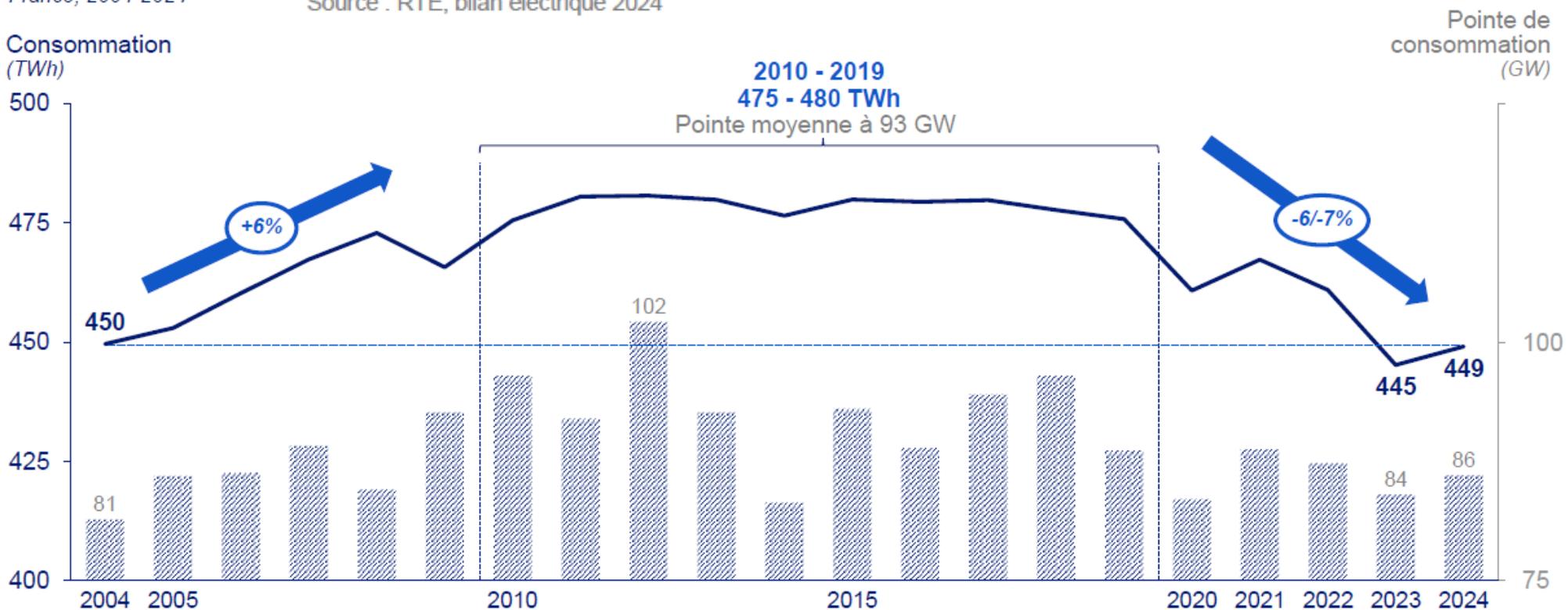
Data centers/AI ?
30 TWh

* Scénarios RTE et ADEME
avis AS et AT; commission d'enquête Sénat
700-800 TWh (2050) – 600-650 TWh (2035)

CONSOMMATION ELECTRIQUE EN HAUSSE ?

France

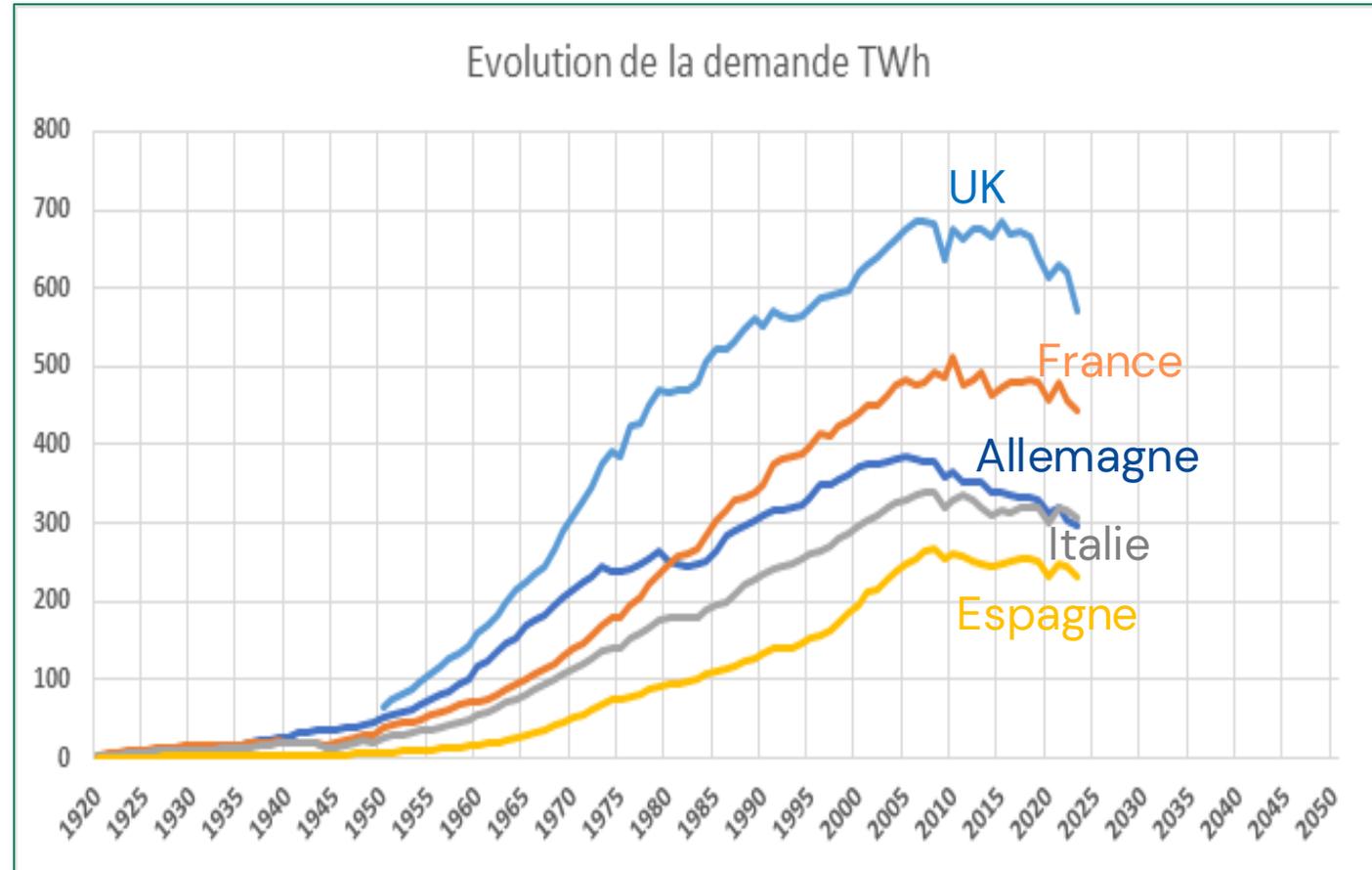
Evolution de la consommation corrigée d'électricité et de la pointe de consommation
France, 2004-2024
Source : RTE, bilan électrique 2024



- Amélioration de l'efficacité énergétique des convertisseurs d'énergie
- Baisse de la demande (économies d'énergie: sobriété)
- Désindustrialisation
- **Électrification des usages plus difficile que prévu**

CONSOMMATION ELECTRIQUE EN HAUSSE ?

Europe



- Amélioration de l'efficacité énergétique des convertisseurs d'énergie
- Baisse de la demande (économies d'énergie: sobriété)
- Désindustrialisation
- **Électrification des usages plus difficile que prévu**

ÉLECTRIFICATION EN PANNE (FRANCE) ?

Contraintes technologiques et économiques

Hydrogène vert ?

trop cher, demande atone

Procédés industriels (acier,..)?

Cf Arcelor Mittal-Dunkerque

Véhicules électriques ?

Trop cher, baisse des immatriculations

Baisse des aides publiques

Bornes de recharge insuffisantes

Marché automobile ↘

(ventes 1,3 M en 2024 vs 2,5 M en 2020)

Chauffage des bâtiments?

Pompes à chaleur ↘; trop cher

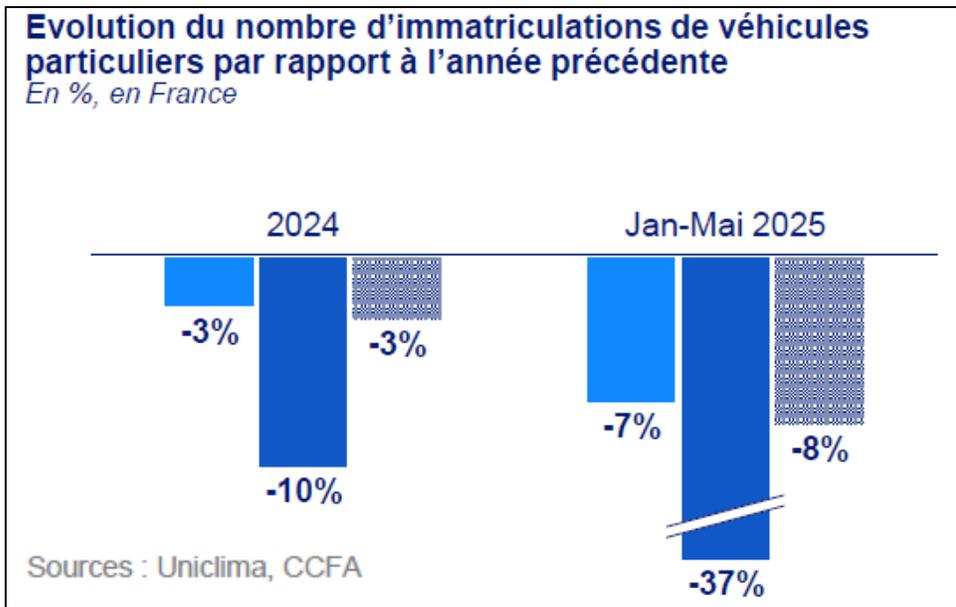
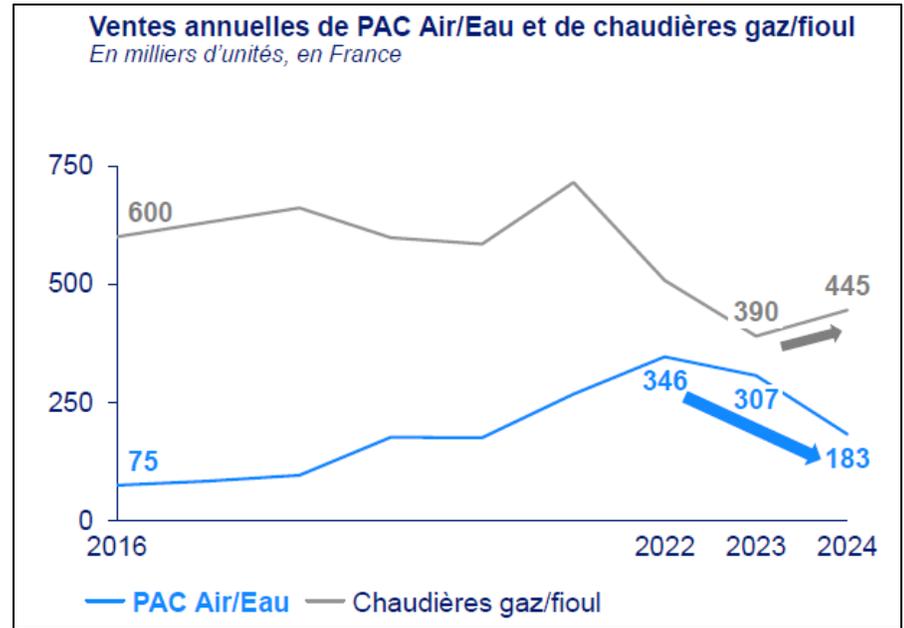
Chaudières gaz ↗

Baisse des aides publiques (MaPrimRenov)

Carburants de synthèse (e-fuels) ?

Trop cher (e-kerosene = x 5-8 kerosene fossile)

Investissements ↘



Sources : Uniclimate, CCFA

ÉLECTRIFICATION EN PANNE (FRANCE) ?

Contraintes technologiques et économiques

Hydrogène vert ?

trop cher, demande atone

Procédés industriels (acier,..)?

Cf Arcelor Mittal-Dunkerque

Véhicules électriques ?

Trop cher, baisse des immatriculations

Baisse des aides publiques

Bornes de recharge insuffisantes

Marché automobile ↘

(ventes 1,3 M en 2024 vs 2,5 M en 2020)

Chauffage des bâtiments?

Pompes à chaleur ↘; trop cher

Chaudières gaz ↗

Baisse des aides publiques (MaPrimRenov)

Carburants de synthèse (e-fuels) ?

Trop cher (e-kerosene = x 5-8 kerosene fossile)

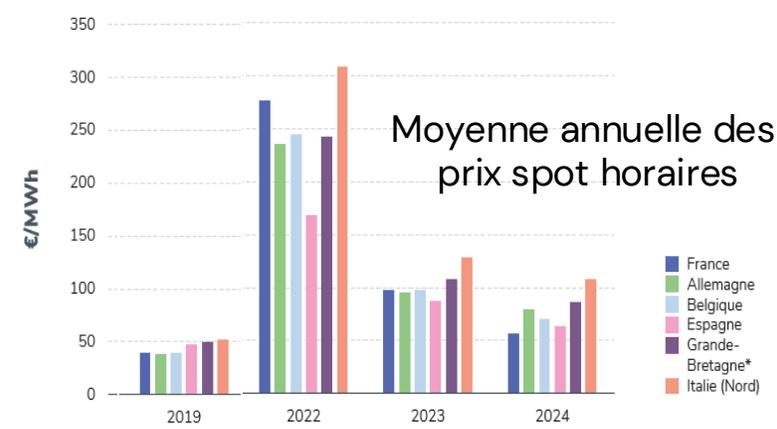
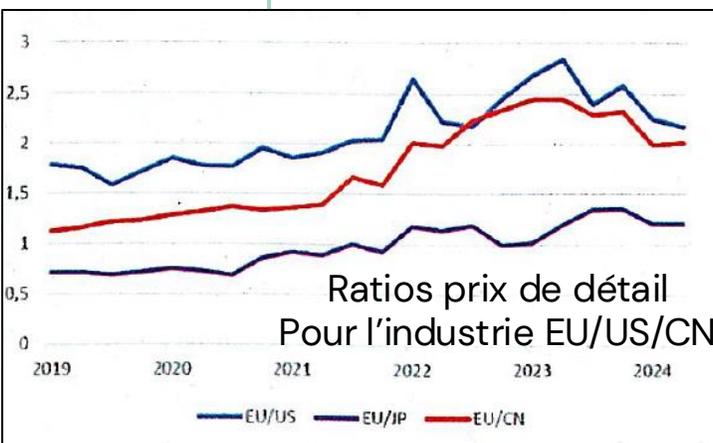
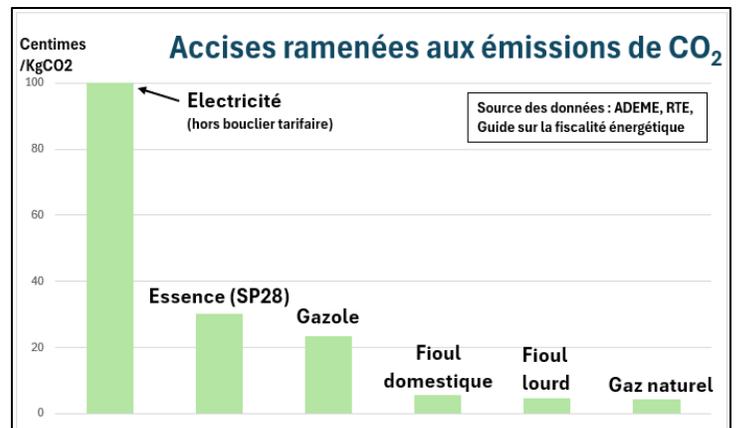
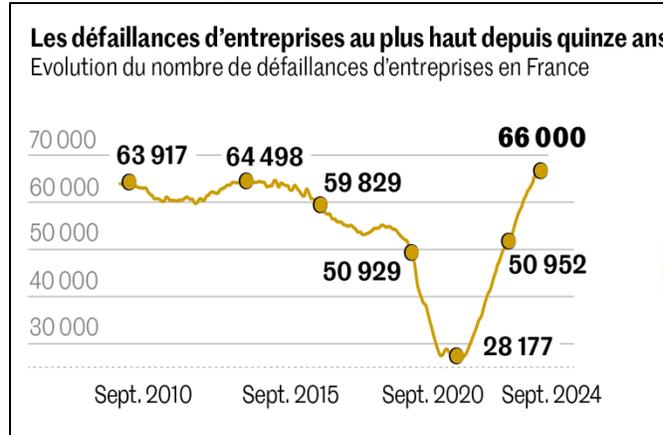
Investissements ↘

Un prix de l'électricité trop élevé

- Plus élevé qu'en Chine/Etats-Unis
- De plus en plus volatil
- Fiscalité (taxes sur l'électricité)



- ✓ Sobriété volontaire
- ✓ Désindustrialisation
- ✓ Délocalisations



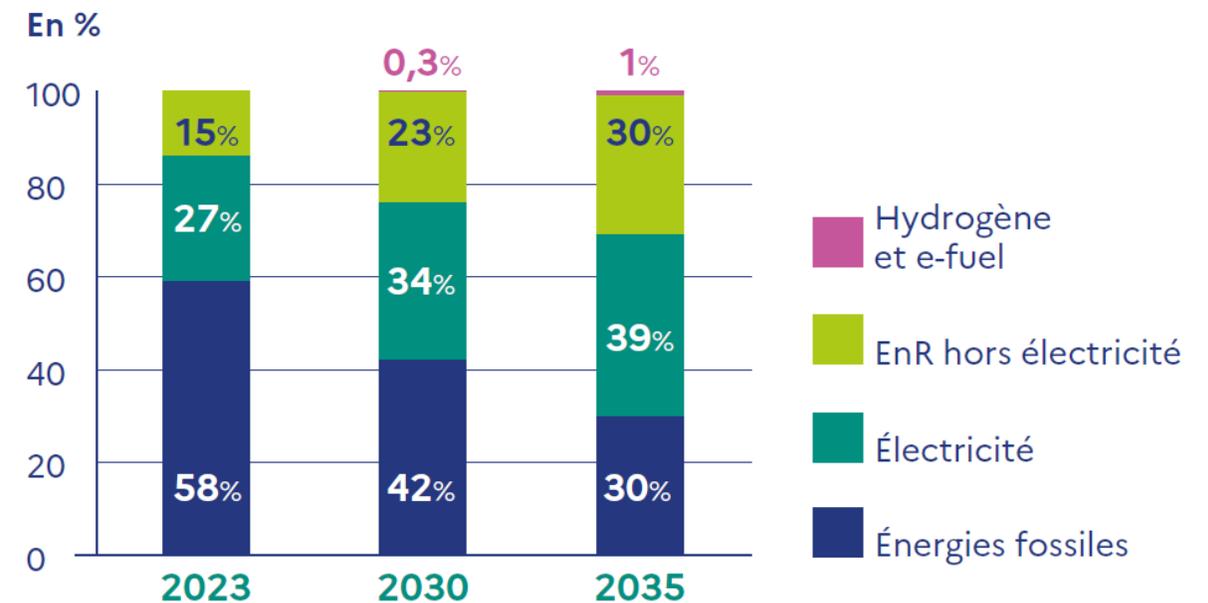
LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

L'énergie dans le texte de la PPE3 février 2025

TWh d'énergie consommée

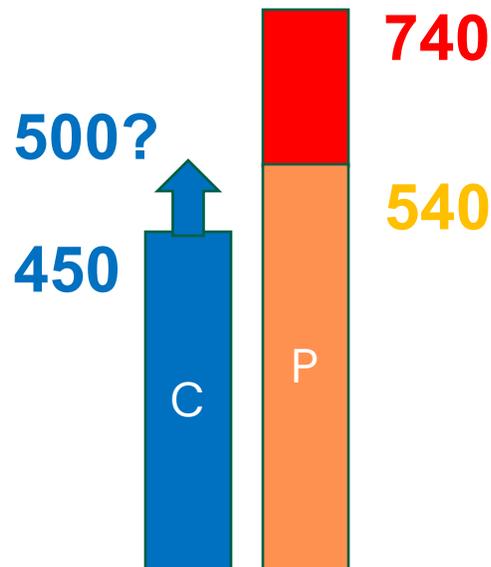


Consommation finale énergétique



LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

L'électricité dans le texte de la PPE3 février 2025



Socle nucléaire

2035 : 60 GW-**360-400 TWh**

Socle hydroélectrique

2035 : : 29 GW-**54 TWh**

Installation massive de capacités d'ENRs (intermittentes)

Eolien en mer: 0,65 GW- 2 TWh (2023) > 18 GW-**70 TWh** (2035)

Eolien sur terre: 22 GW-49 TWh (2023) > 40-45 GW-**91-103 TWh** (2035)

PV: 19 GW-23 TWh (2023) > 65-90 GW-**92-110 TWh** (2035)

Total: **75 > 270 TWh**

LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

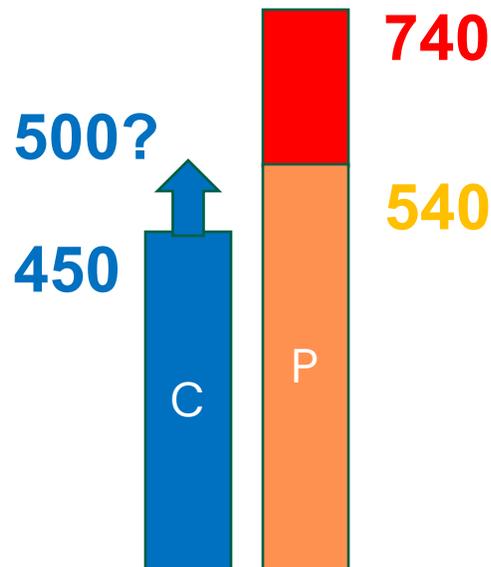
L'électricité dans le texte de la PPE3 février 2025

Avis de l'Académie des sciences - 8 avril 2025

Sur la version révisée de la programmation
pluriannuelle de l'Énergie (PPE 3)



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE



En **absence de capacités de stockage d'électricité massives**, cet excès de production intermittente non pilotable induira : (i) une **volatilité accrue des prix de l'électricité**, avec des périodes de plus en plus fréquentes de prix très élevés et de prix négatifs ; (ii) la nécessité, pour assurer l'équilibre offre-demande, d'une **modulation excessive de la production nucléaire**, entraînant des contraintes sur la gestion du parc électronucléaire et un sous-emploi de ce parc, sous-emploi coûteux économiquement et induisant des risques de dégradation des réacteurs ; (iii) des **tensions sur les réseaux électriques** qu'il faut adapter à cette variabilité de la production, ajoutant des coûts supplémentaires considérables au fonctionnement du système énergétique.

LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

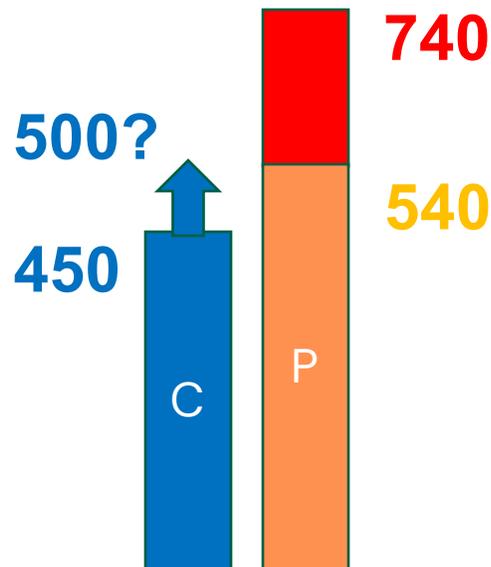
L'électricité dans le texte de la PPE3 février 2025

Avis de l'Académie des sciences - 8 avril 2025

Sur la version révisée de la programmation
pluriannuelle de l'Énergie (PPE 3)



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

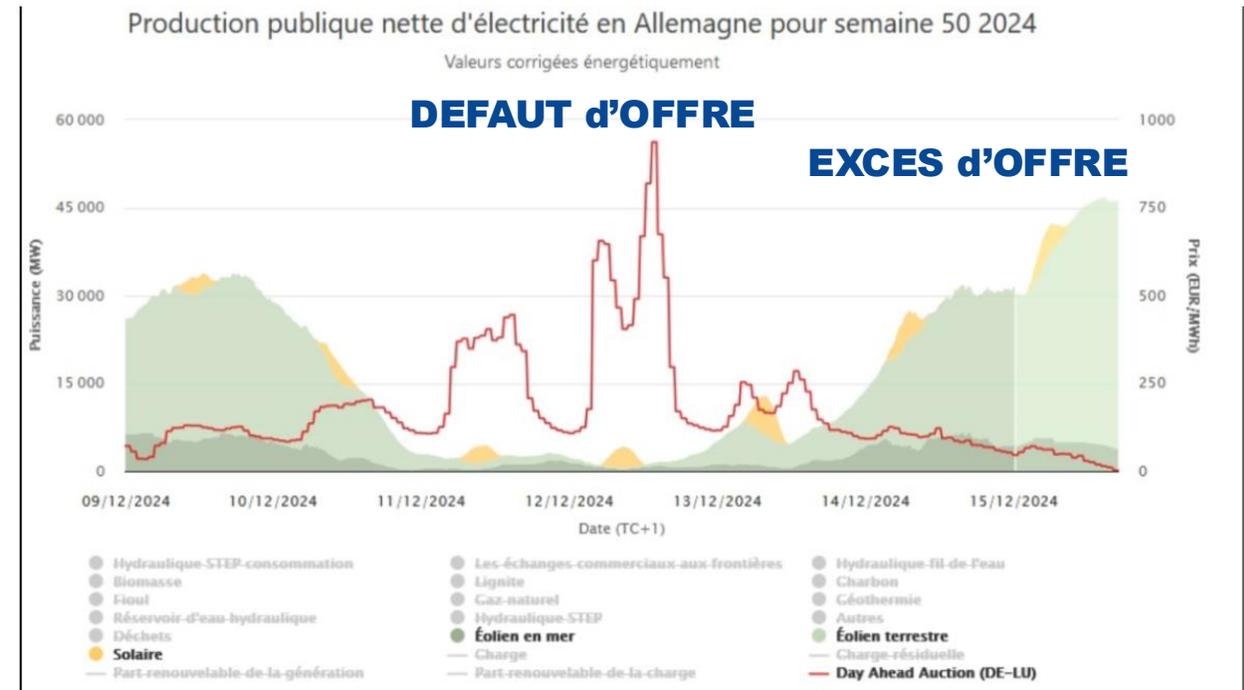


Du côté des **énergies renouvelables intermittentes**, des scénarios alternatifs doivent présenter des objectifs de production plus limités, en meilleure cohérence avec les besoins réels. L'académie des sciences recommande **un développement raisonnable de ces énergies** et de ne pas développer massivement et à la hâte des sources d'énergie non pilotables sur la base de consommations surévaluées.

L'académie des sciences recommande de réfléchir à la mise en place de mécanismes permettant de **mieux assurer la cohérence entre le rythme de développement du mix électrique et celui de la demande**, car la croissance de la production décarbonée doit aller au même rythme que l'électrification des usages, un objectif vertueux à la fois sur le plan économique et sur le plan technique.

Les ENRs intermittentes

- Perturbent le marché de l'électricité



Allemagne : illustration

Allemagne : 9 au 15 décembre 2024
Prix: de 0 à 900 €/ MWh

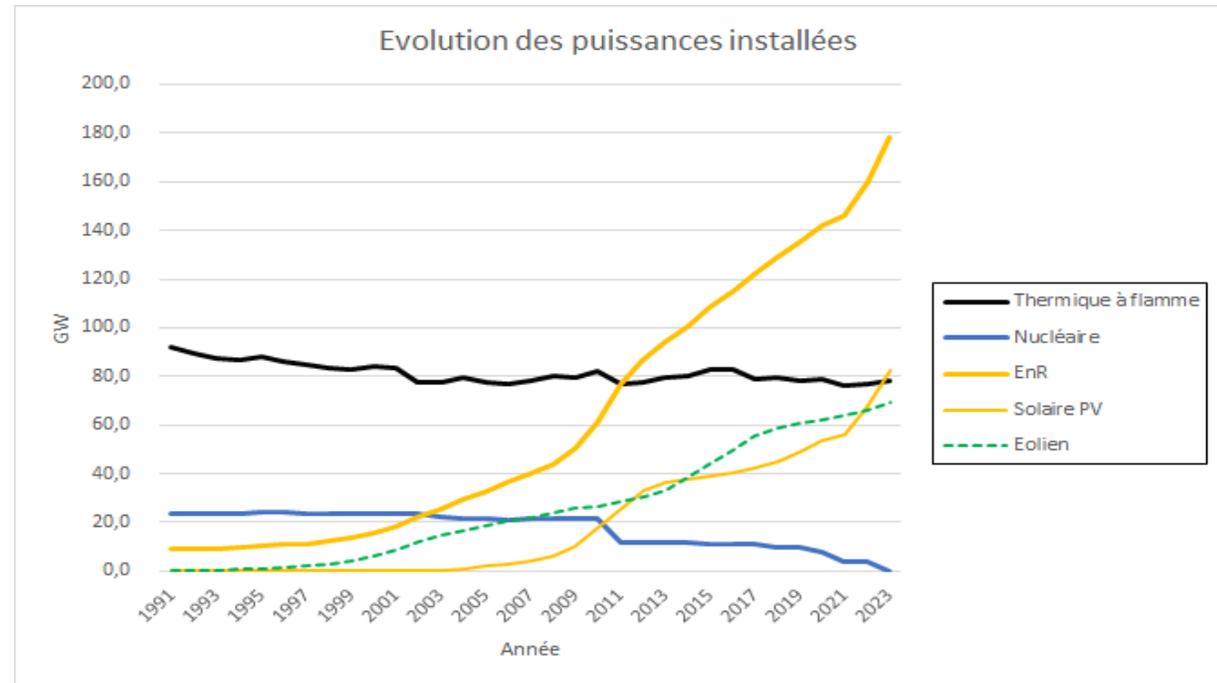
Les ENRs intermittentes

- Perturbent le **marché de l'électricité**
- **VENDREDI 20 JUIN 2025**
 - Nécessitent en parallèle des **capacités pilotables** (nucléaire, biomasse, fossiles)
 - Nécessitent des capacités de **stockage d'énergie/flexibilités** (batteries, hydrogène, STEP, demande...)
 - Nécessitent de nouvelles **infrastructures de réseaux électriques**



VENDREDI 20 JUIN 2025 en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050

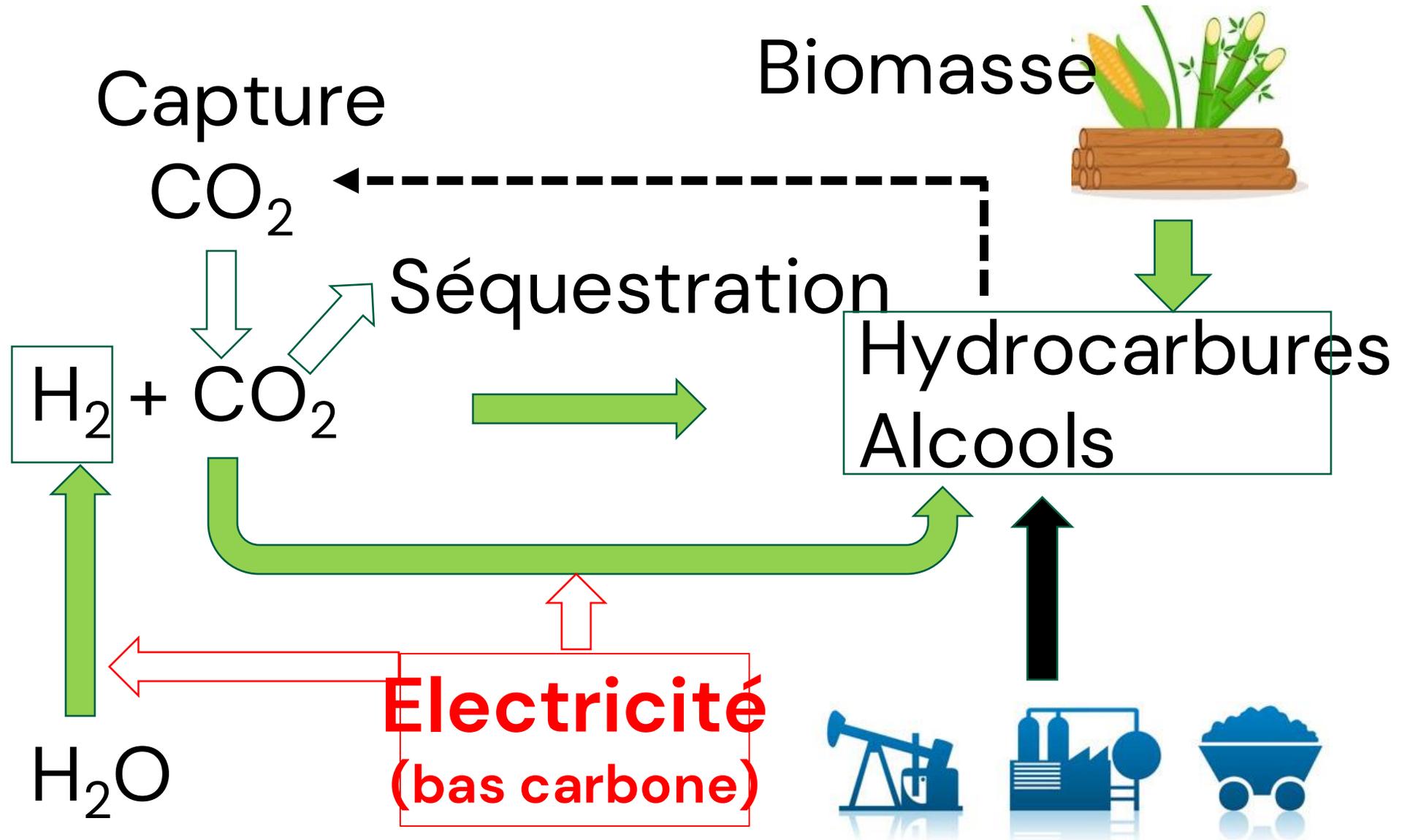
Des fossiles pour piloter



Allemagne : illustration

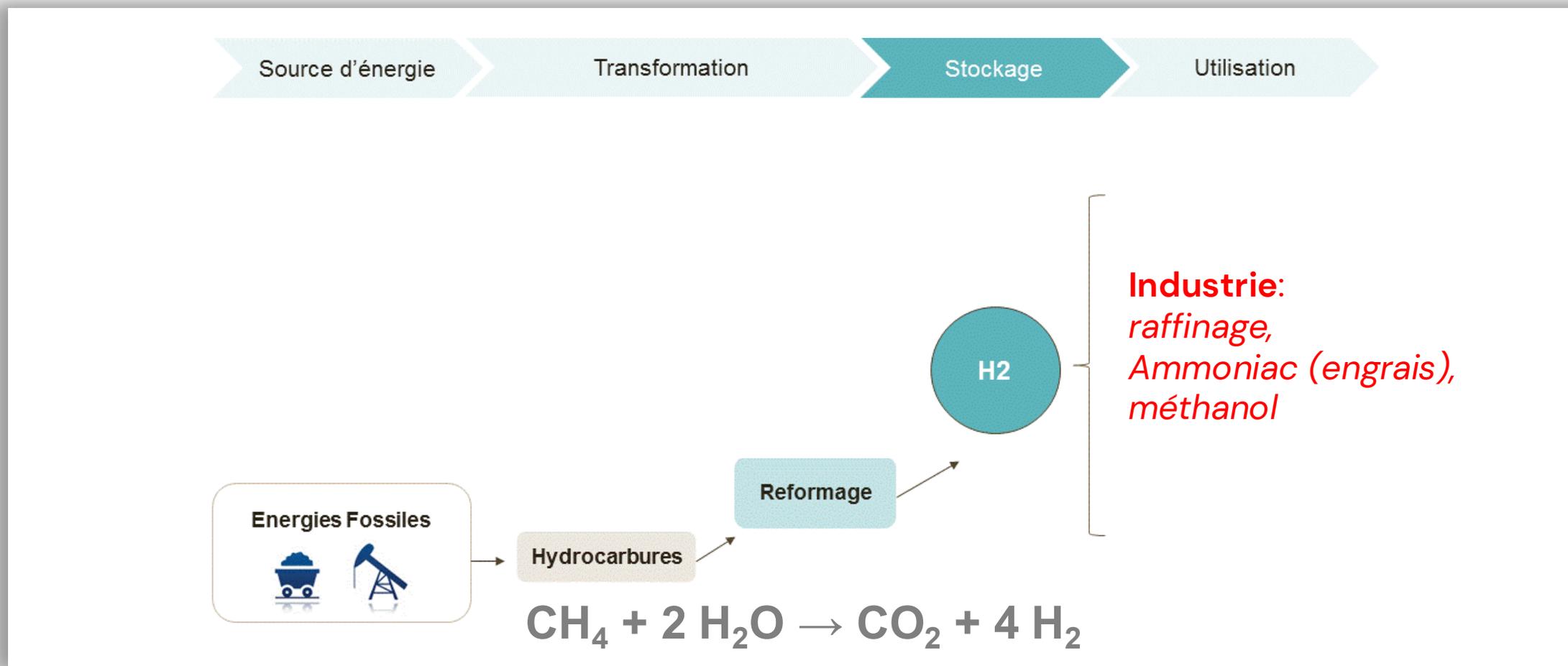
L'Allemagne est importatrice nette d'électricité. En 2024, le solde des échanges s'est encore creusé par rapport à 2023.

LES COMBUSTIBLES ALTERNATIFS (ÉLECTRIQUES)



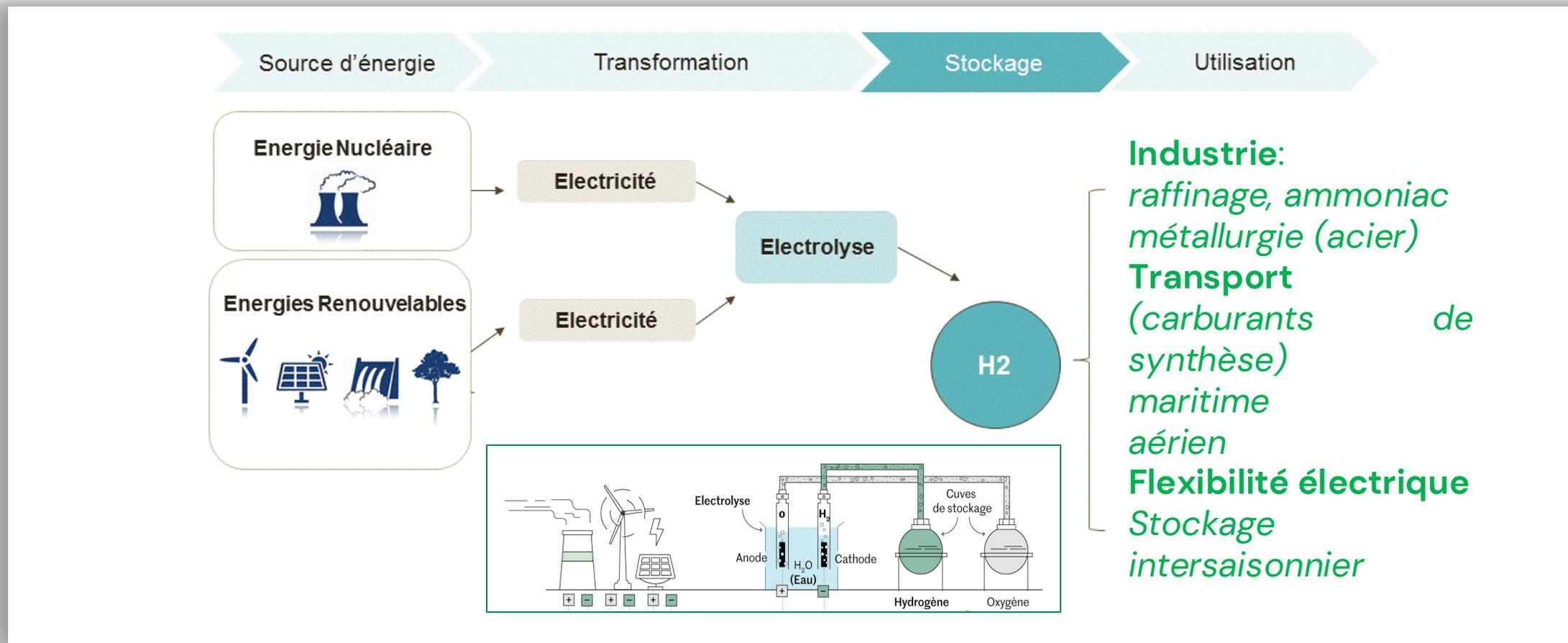
UN COMBUSTIBLE ALTERNATIF: HYDROGENE

Aujourd'hui (gris): France 1 Mt; Europe: 10 Mt



UN COMBUSTIBLE ALTERNATIF: HYDROGENE

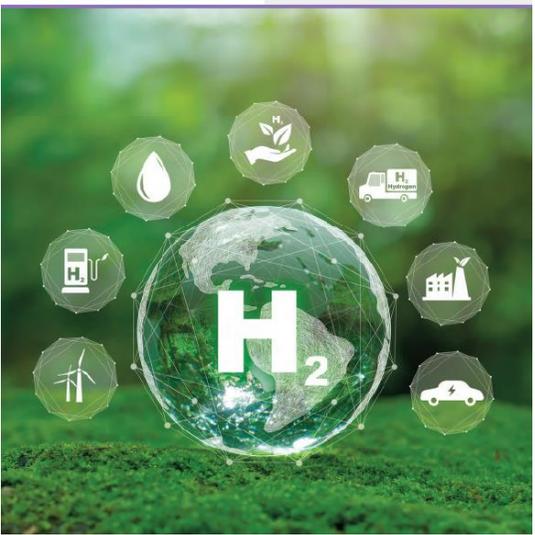
Demain (vert): France 1-4 Mt; Europe: 60 Mt



UN COMBUSTIBLE ALTERNATIF: HYDROGENE



Rapport de l'Académie des sciences - 9 avril 2024
L'hydrogène aujourd'hui et demain



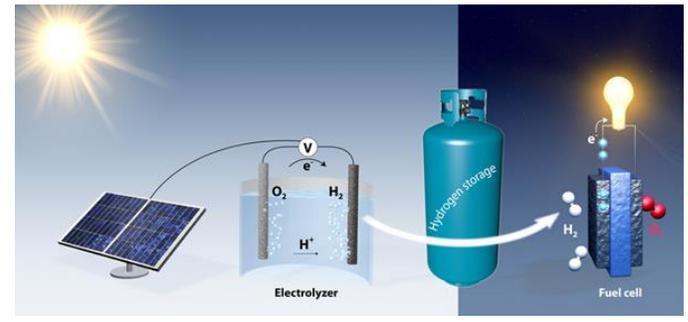
12 juin 2024



**ACCÉLÉRER
LA CARACTÉRISATION
DE LA RESSOURCE
ET L'EXPLORATION
DE L'HYDROGÈNE NATUREL
EN FRANCE**



Des rendements trop faibles

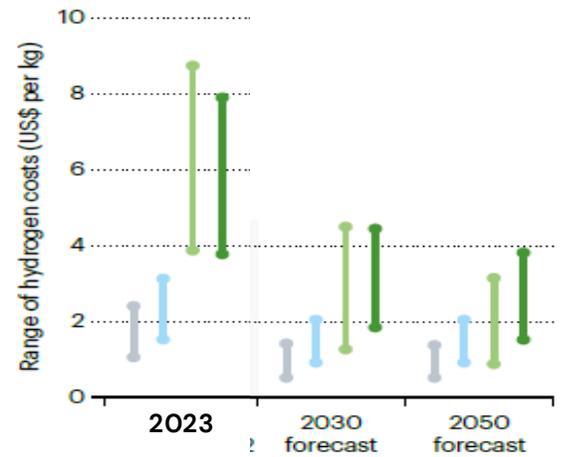


« Power-to-H₂-to-Power »
rendement : **25 %** (HT 33%)



Des coûts trop élevés

Hydrogen source
 ● Natural gas ● Natural gas with CCUS*
 ● Electrolysis from solar photovoltaic ● Electrolysis from onshore wind



Des besoins massifs d'électricité
1 Mt = 55 TWh = 5 EPR

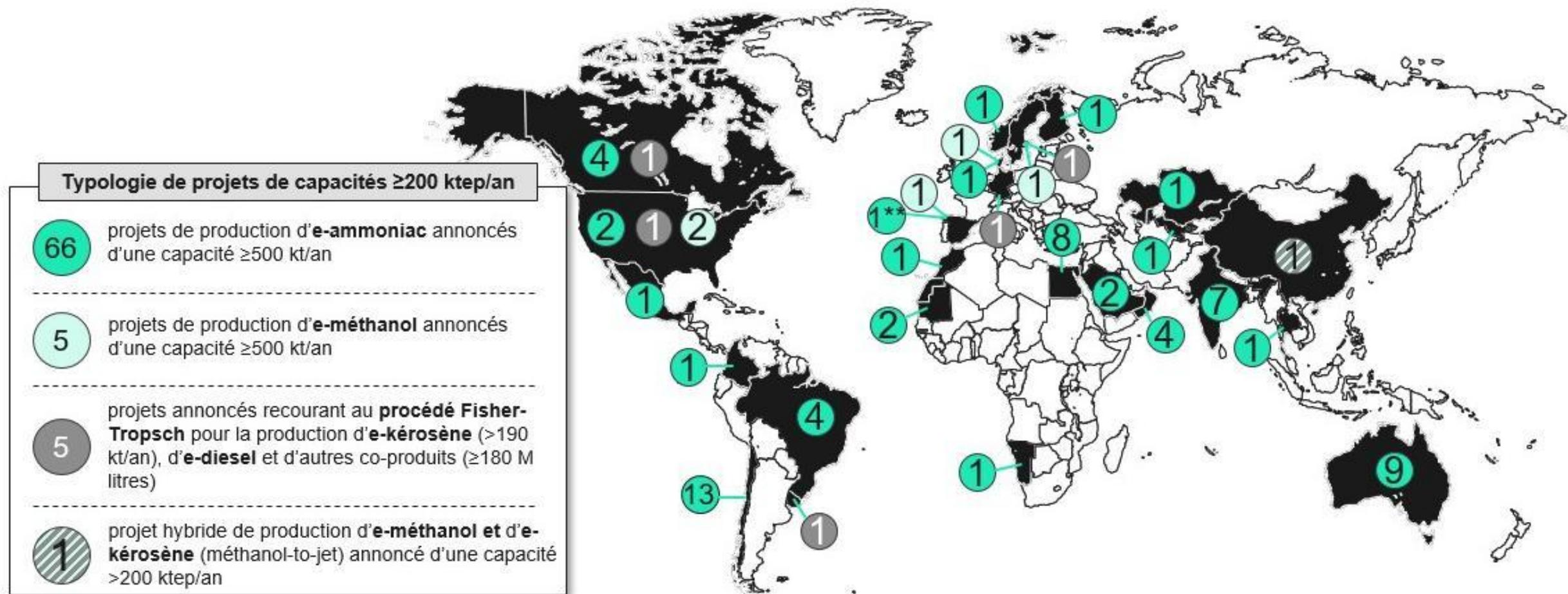


Une politique européenne irréaliste !
De 10 Mt H₂ gris à 60 Mt H₂ vert (2050)

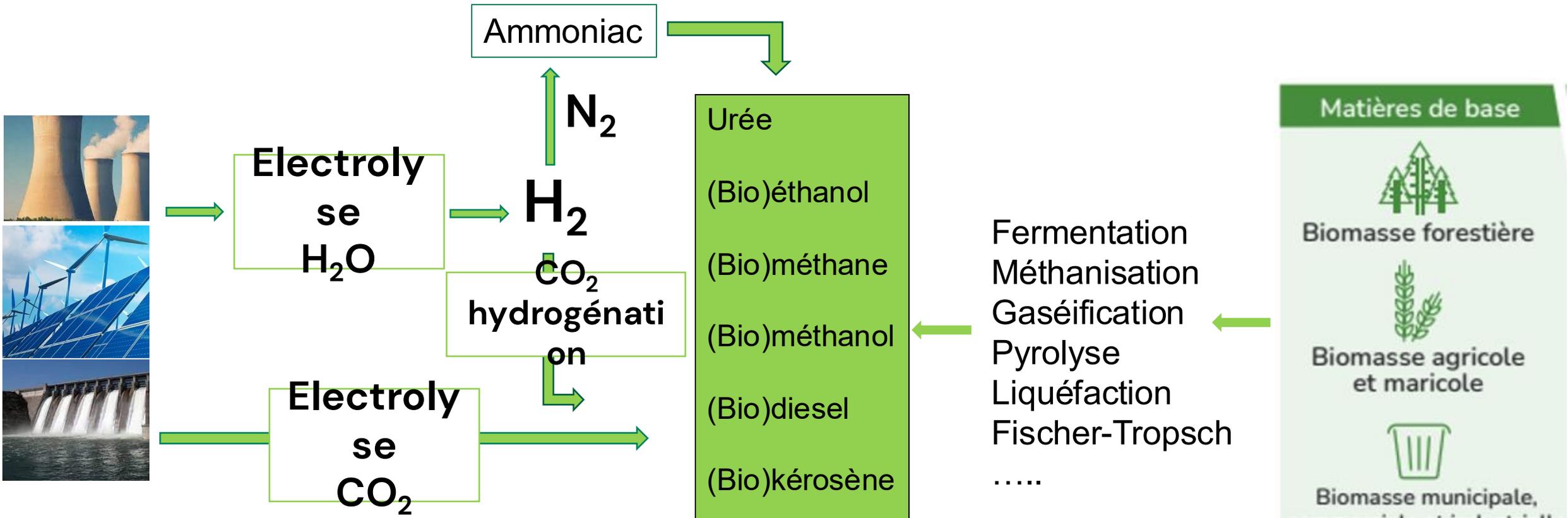


Priorité: « Verdir » les usages actuels (NH₃, MeOH, raffinage)

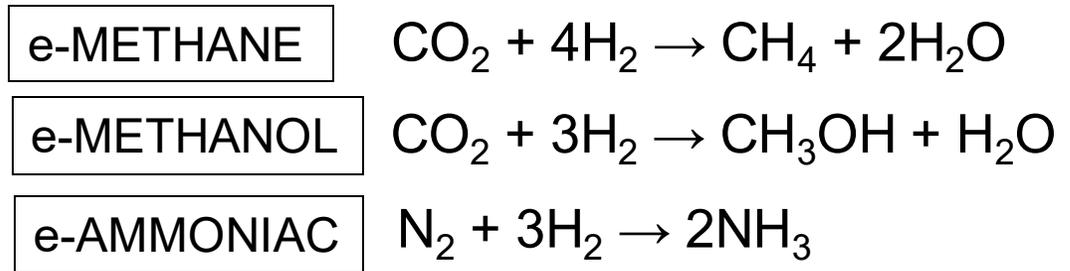
LES COMBUSTIBLES ALTERNATIFS (ÉLECTRIQUES)



UNE REVOLUTION DE LA CHIMIE ORGANIQUE



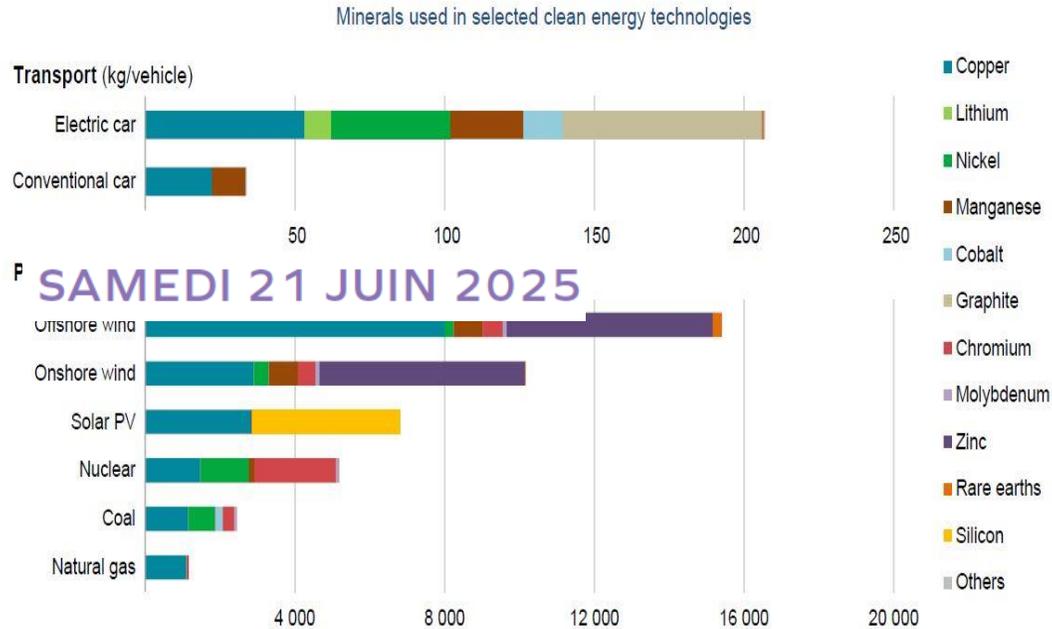
CARBURANTS DE SYNTHÈSE



SOUVERAINETE OU NOUVELLES DÉPENDANCES ?

Ressources minérales

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

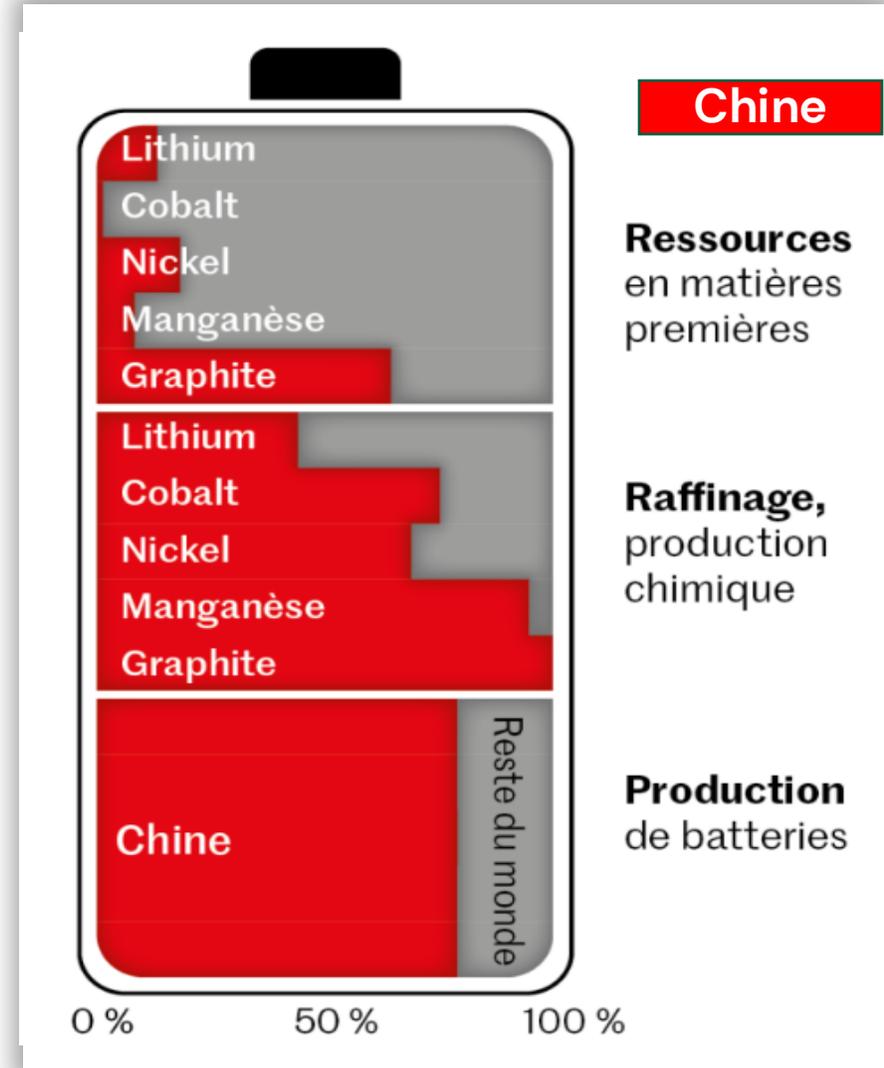


SAMEDI 21 JUN 2025

Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.

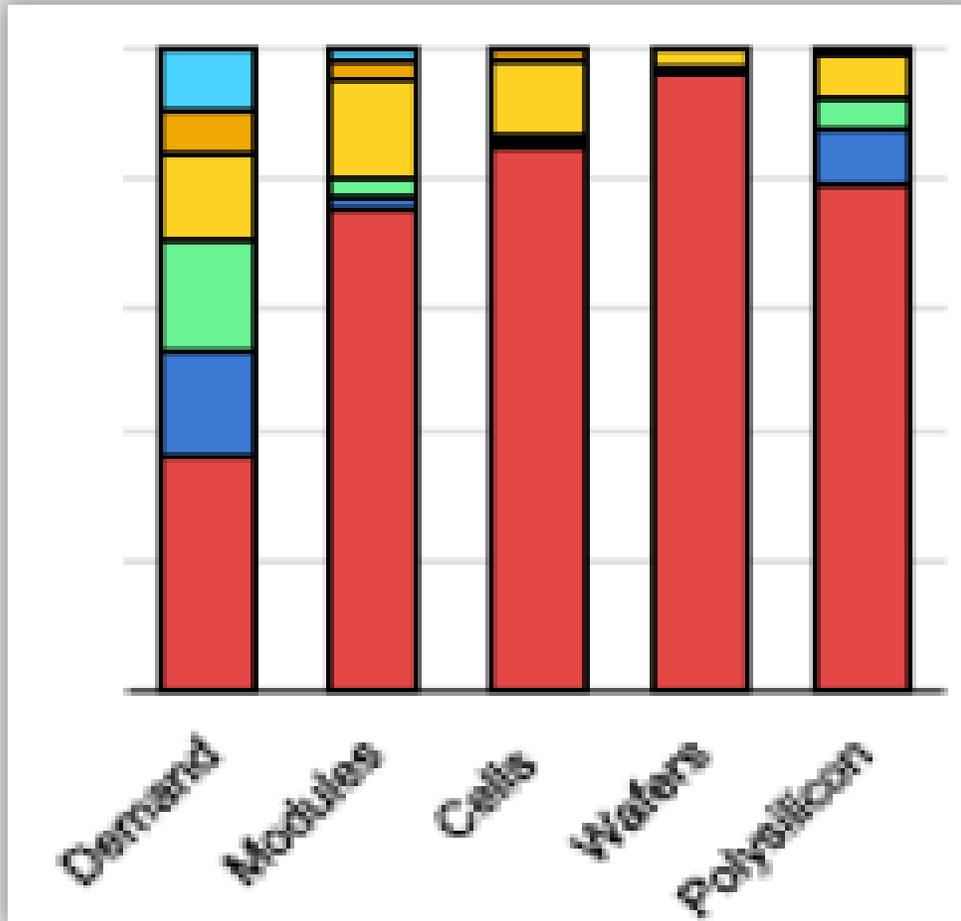
IEA. All rights reserved.

Chine: ressources minérales et batteries



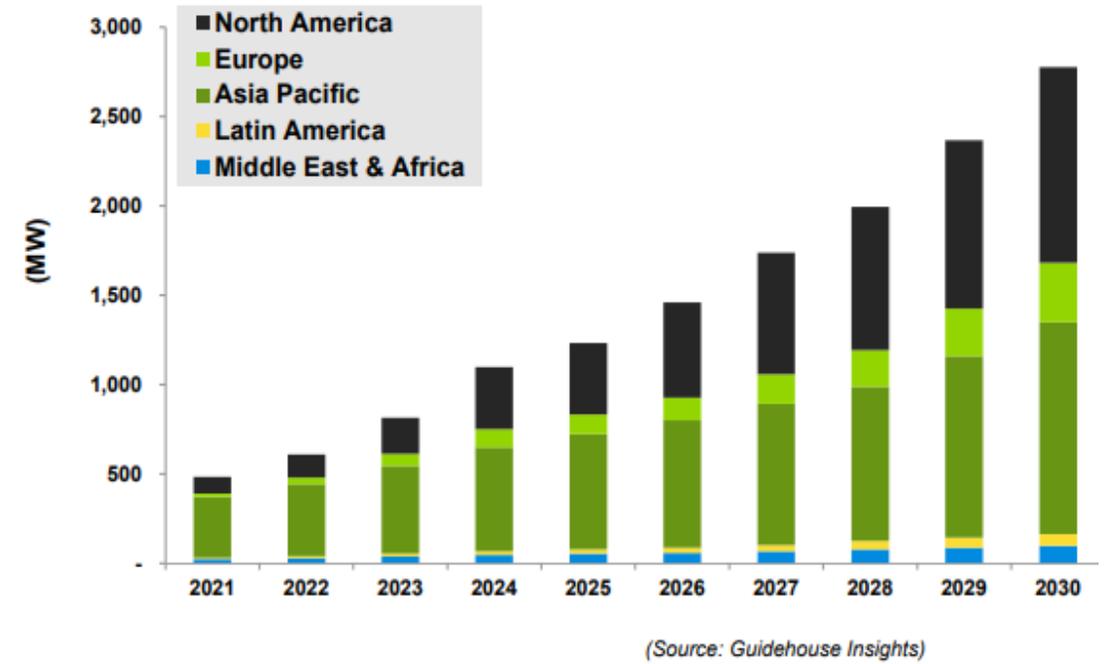
SOUVERAINETE OU NOUVELLES DÉPENDANCES ?

Le cas du solaire (Si et cellules)



Le cas des électrolyseurs

Chart 1-1. Hydrogen Power Generation Technology Capacity by Region, World Markets: 2021-2030



RECHERCHE ET INNOVATION

Recherche fondamentale,
technologique, industrielle

Production d'hydrogène vert

(électrolyse de l'eau, matériaux pour réservoirs,..)

Technologies de Récupération/Recyclage

(métaux, plastiques, batteries)

Cellules photovoltaïques

(stabilité, rendements, soutenabilité)

Extraction de métaux (mines responsables)

Décarbonation de l'industrie

(acier, ciment, béton, verre, aluminium, éthylène,...)

Valorisation de la biomasse

(méthanation, pyrogazéification, biocarburants ...)

Nouveau Nucléaire

(SMR, Réacteurs à Neutrons Rapides)

Réseaux électriques

Batteries électriques

(sécurité, écocompatibilité, durabilité, recyclage,...)

Stockage d'énergie

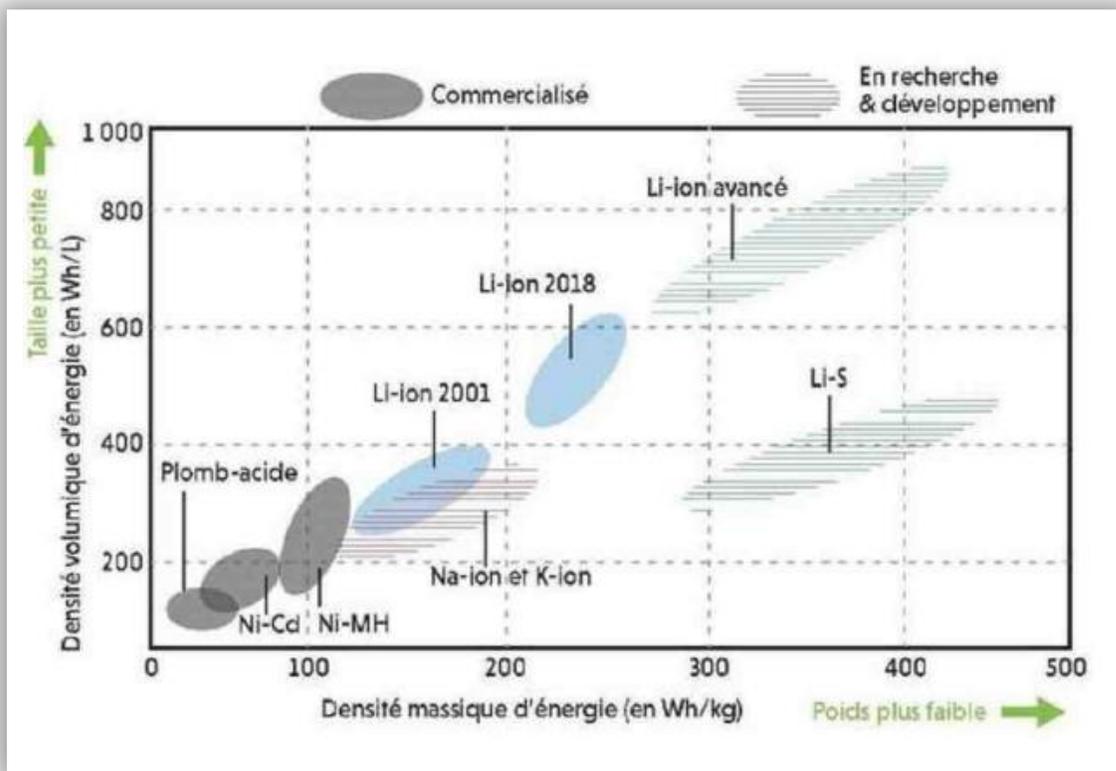
(mégabatteries, H₂, ...)

Chimie organique « verte »

(Capture et utilisation du CO₂; carburants de synthèse)

PROGRÈS (EXEMPLES)

L'énergie des batteries



Les rendements des cellules solaires

