



Marc FONTECAVE

CHAIRE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

La transition énergétique :
aujourd'hui et demain (III)

5 nov. > 17 déc. 2025

COURS & SÉMINAIRE

Amphithéâtre Maurice Halbwachs.

COURS à 14 h ; SÉMINAIRE (en lien avec le cours) à 15 h
En libre accès, dans la limite des places disponibles.

Mercredi 5 novembre 2025

COURS :

« Combustibles électriques (e-fuels) : introduction »

SÉMINAIRE :

Nouredine Hadjsaid, Professeur, Grenoble INP-UGA,
directeur G2Elab et Vice-Président IEEE PES

« Fonctionnement et planification des réseaux électriques :
une complexité accrue dans le contexte de la décarbonation »

Mercredi 12 novembre 2025

COURS :

« Electrification des usages : où en est-on ? »

SÉMINAIRE

Vincent Berger, Haut-Commissaire à l'Energie Atomique

« Quelle politique pour la production d'électricité nucléaire
en France ?»

Mercredi 19 Novembre 2025

COURS :

« CO₂, une source de carbone : 1. Le capter »

SÉMINAIRE :

Christian Serre, Directeur de Recherches CNRS,
École Normale Supérieure, ESPCI Paris, CNRS,
université PSL, France

« De nouveaux adsorbants hybrides durables pour
une capture plus efficace du CO₂ »

Mercredi 26 novembre 2025

COURS :

« CO₂, une source de carbone : 2. L'hydrogénier »

SÉMINAIRE :

Christophe Copéret, Professeur, Professeur, ETH Zurich,
Department of Chemistry and Applied Biosciences,
Zurich, Suisse

« Convertir le dioxyde de carbone en méthanol :
compréhension des processus élémentaires et exploration
de l'espace chimique »

Mercredi 3 décembre 2025

COURS :

« Perspectives françaises : la programmation Pluriannuelle
de l'Energie »

SÉMINAIRE :

Dominique Grand, Docteur en Physique, Hydro21,
Echirolles, France

« Le taux de retour énergétique, boussole pour conduire
la transition du bouquet électrique »

Mardi 17 décembre 2025

COURS :

« Autres combustibles électriques : e-NH₃, e-kérosène, .. »

SÉMINAIRE :

Daniel Ircane, Membre de l'Académie des technologies
« Défossiliser l'économie : le cas particulier de l'aviation et du
transport maritime »

À VENIR

COLLOQUE – Mercredi 14 janvier 2026

Amphithéâtre Maurice Halbwachs.

« Vivre avec le climat qui change :
enjeux et perspectives de l'adaptation »



COLLÈGE
DE FRANCE
1530

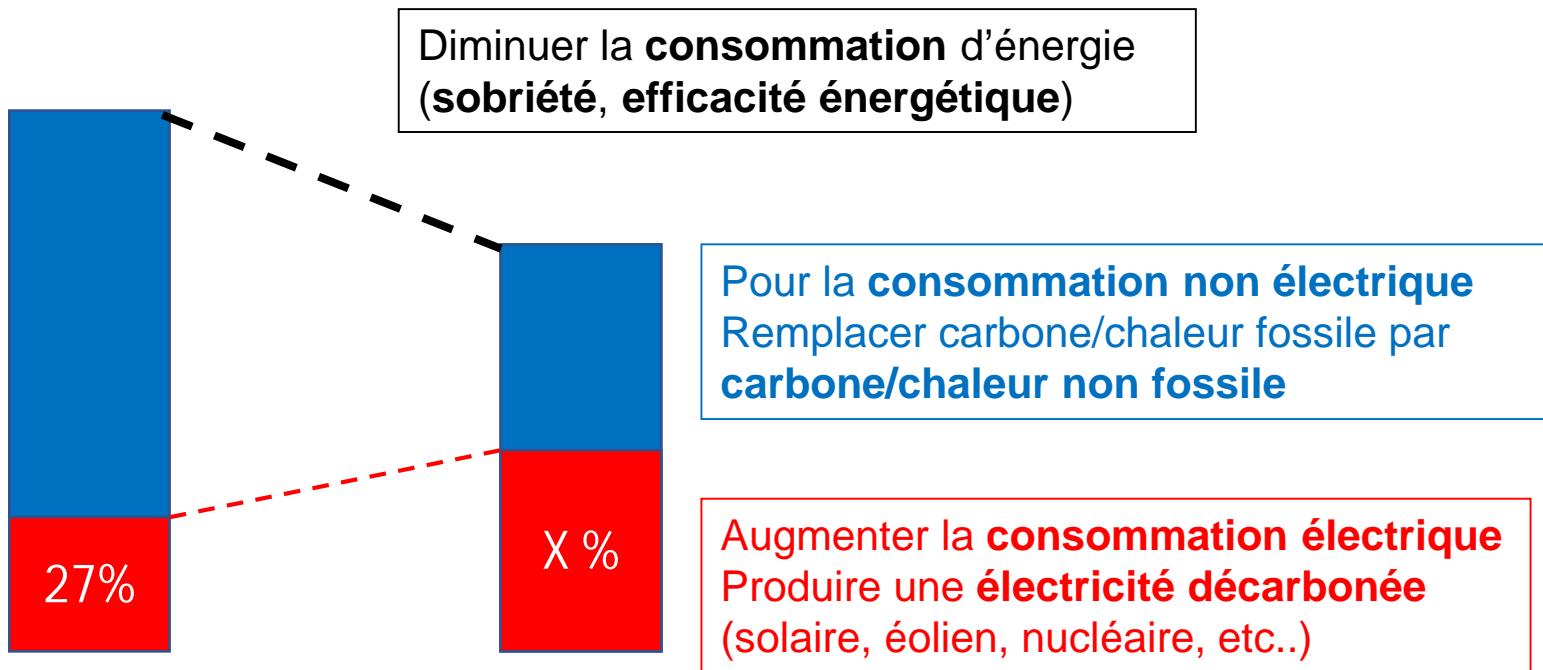
Combustibles électriques (e-fuels): introduction

Marc FONTECAVE

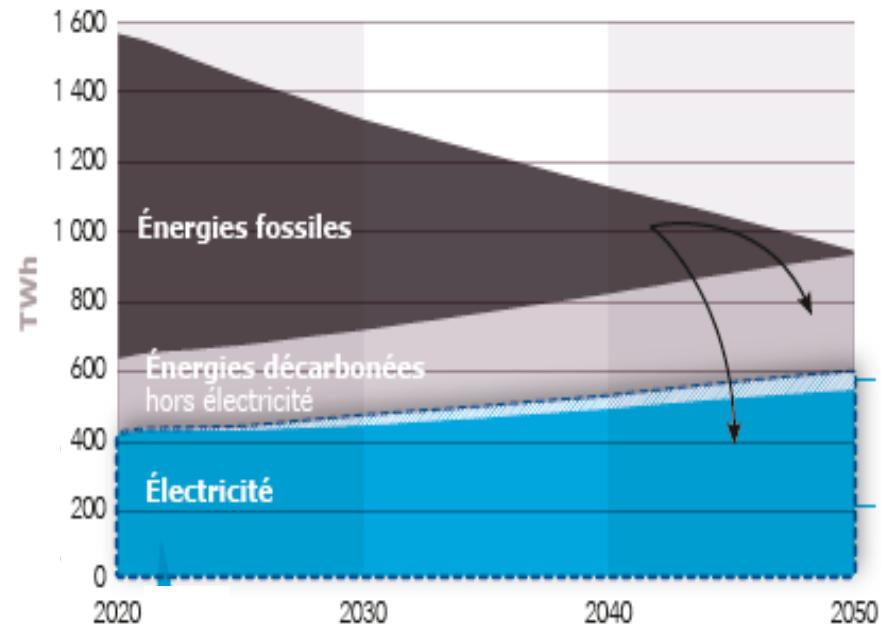
*Professeur au Collège de France
Président du Comité de Prospective en Energie
(Académie des Sciences)*



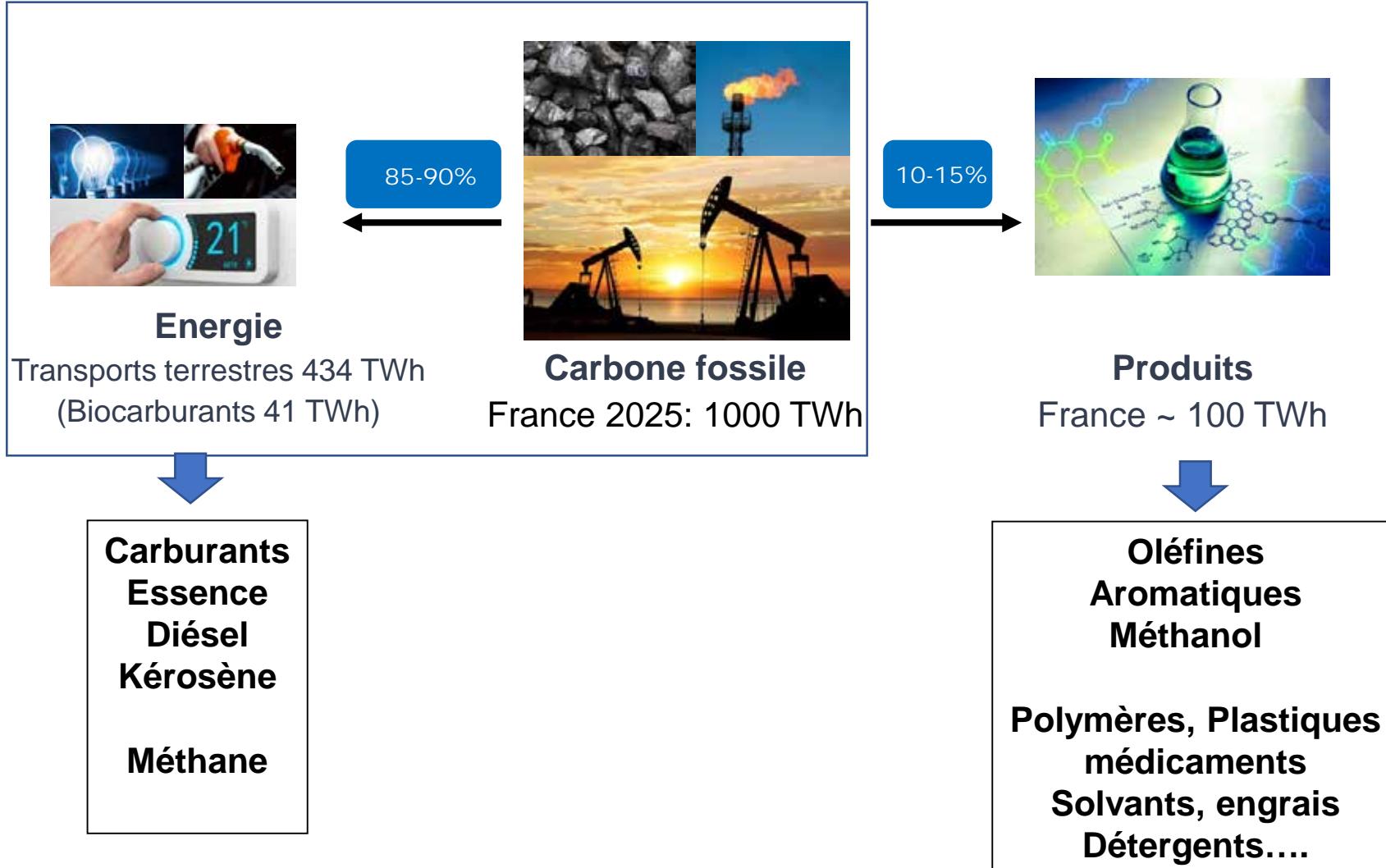
SCENARIOS 2035-2050 (France)?



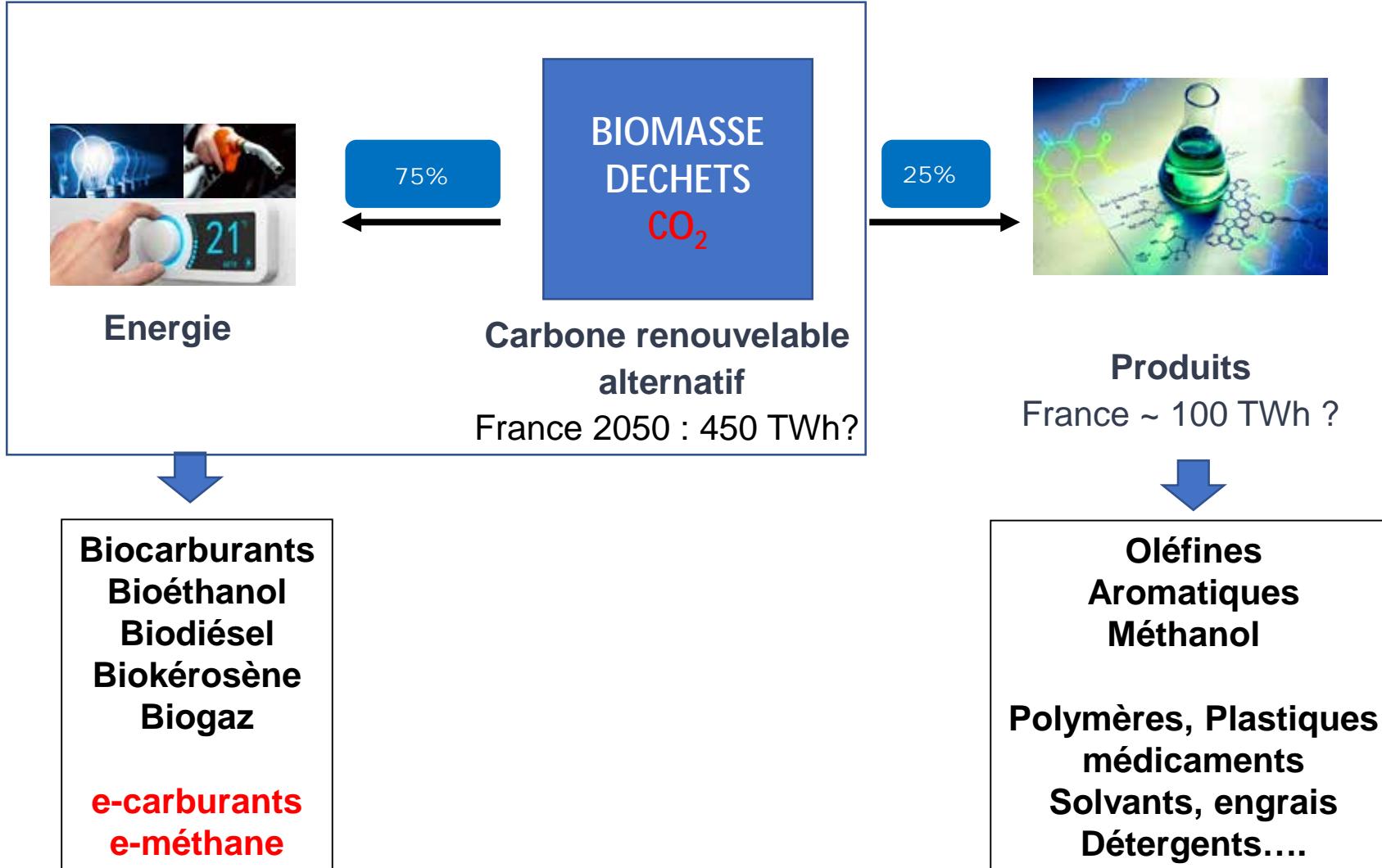
Projection de la consommation d'énergie finale en France dans la SN



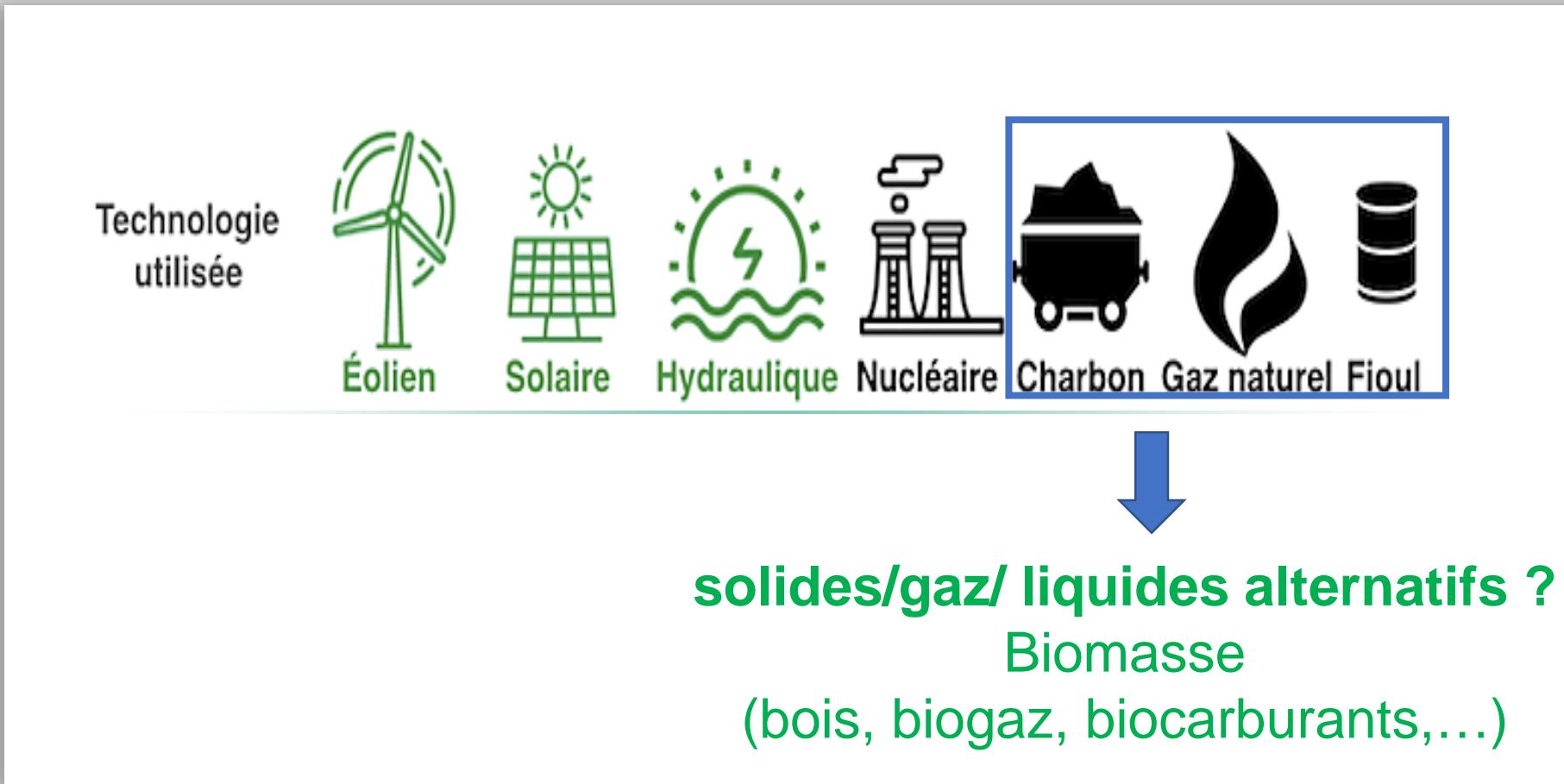
DEMAIN QUEL CARBONE ?



— DEMAIN QUEL CARBONE ?



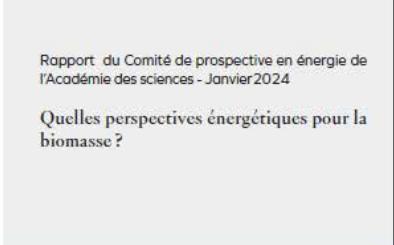
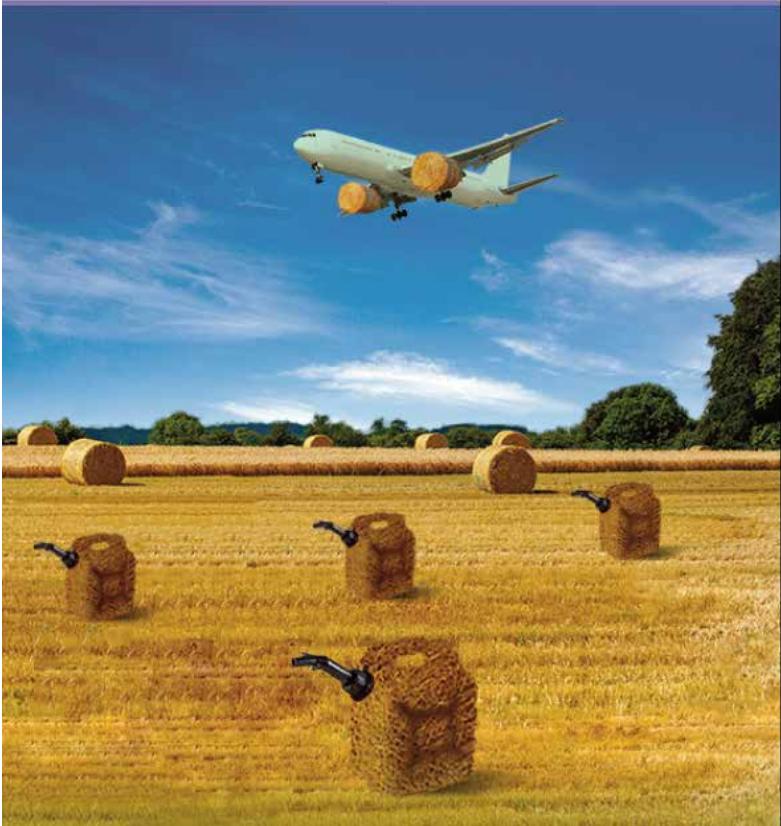
DÉFOSSILISER ET NON DÉCARBONER



Biomasse: Rapport de l'académie des sciences



ACADEMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE



La biomasse: une source d'énergie contrainte

Les gisements sont limités (et incertains)

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

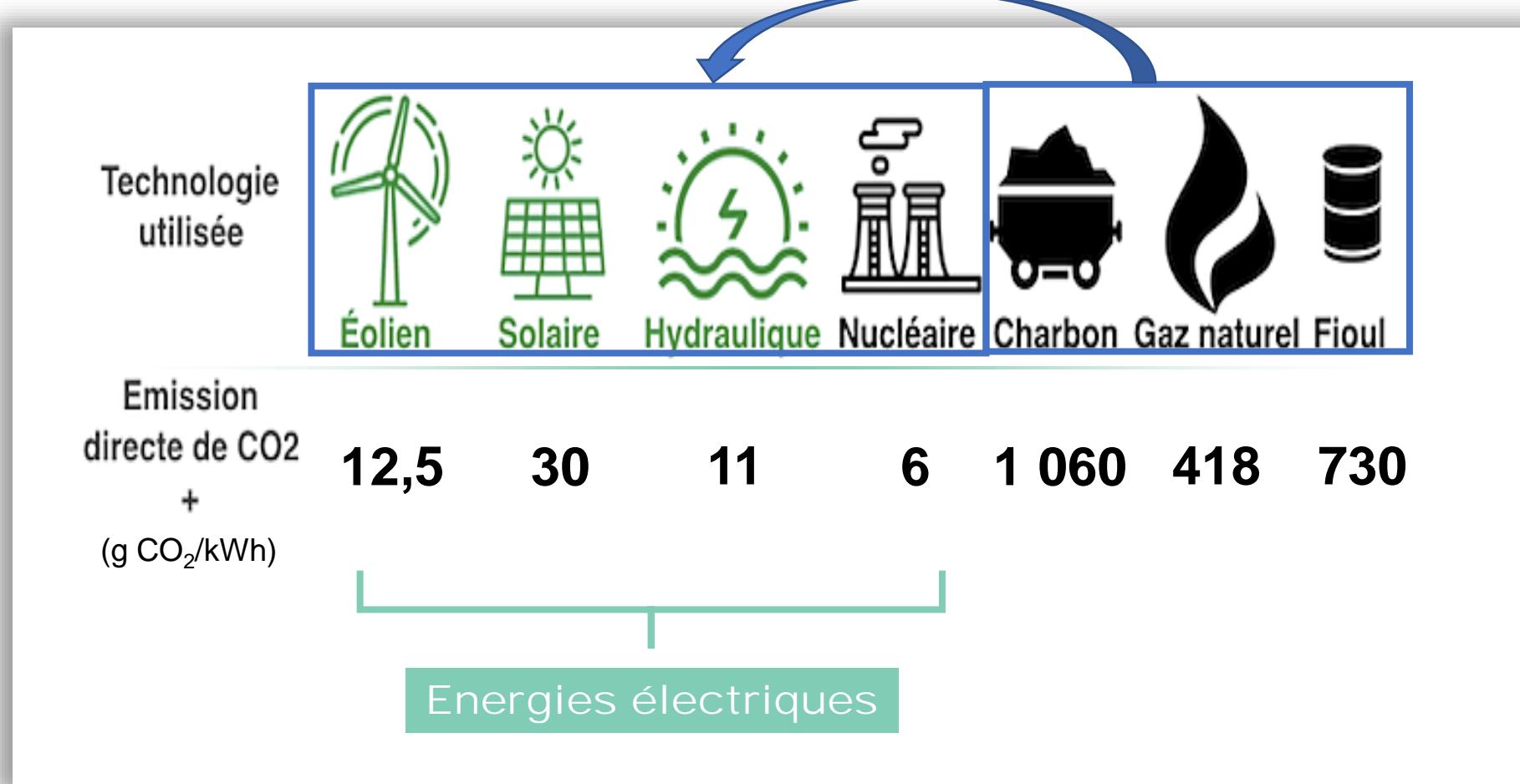
La biomasse n'est pas une source d'énergie idéale

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

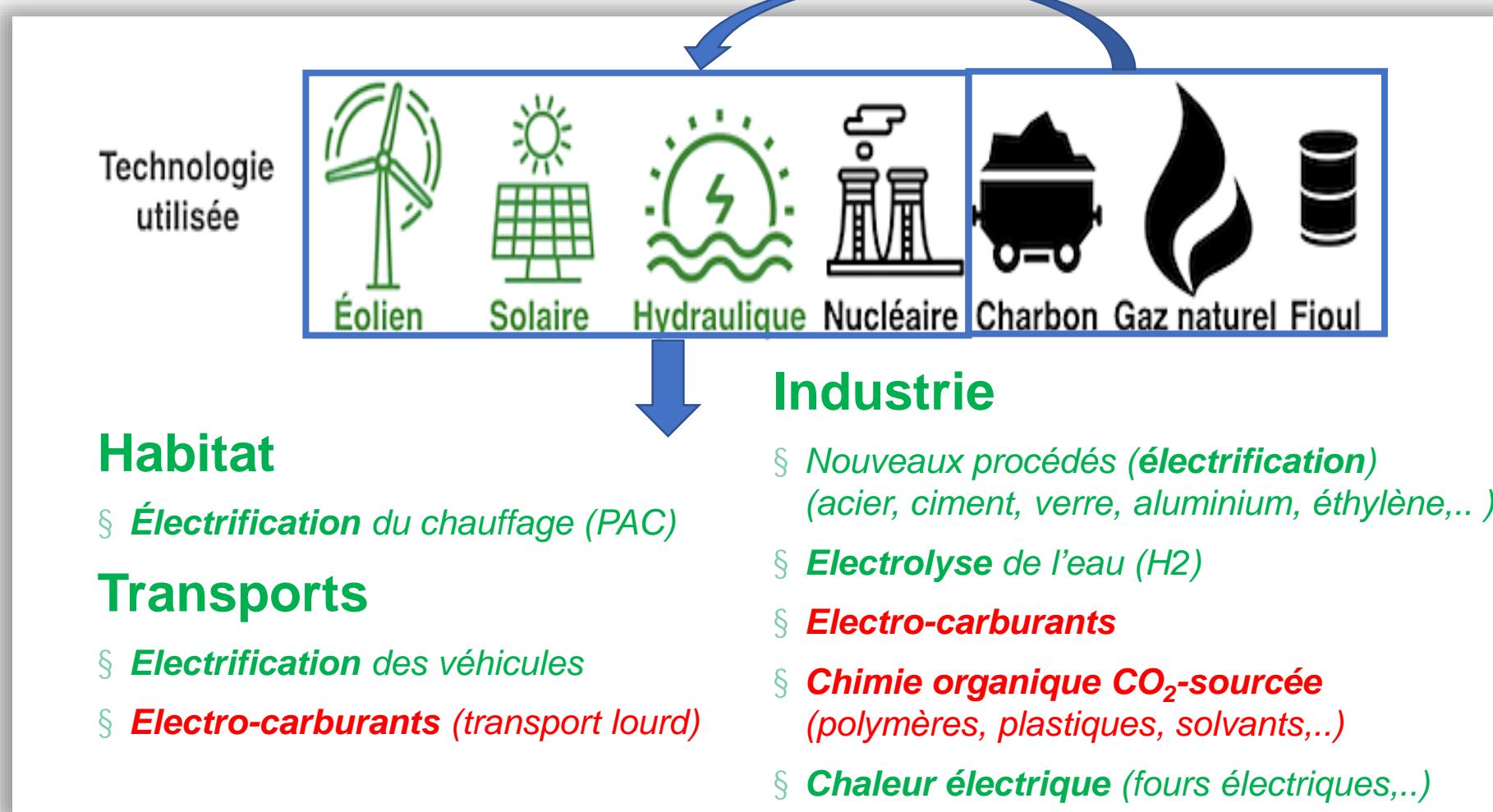
Besoins de recherche/innovation

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

POURQUOI DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER ?



POURQUOI DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER ?

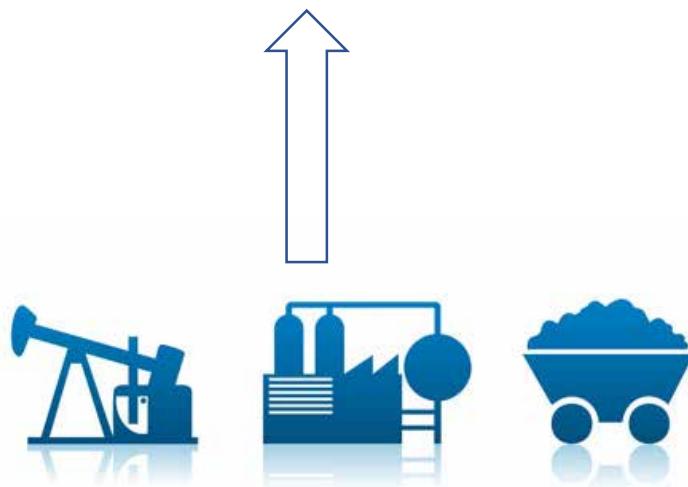


Carburants de synthèse/e-fuels

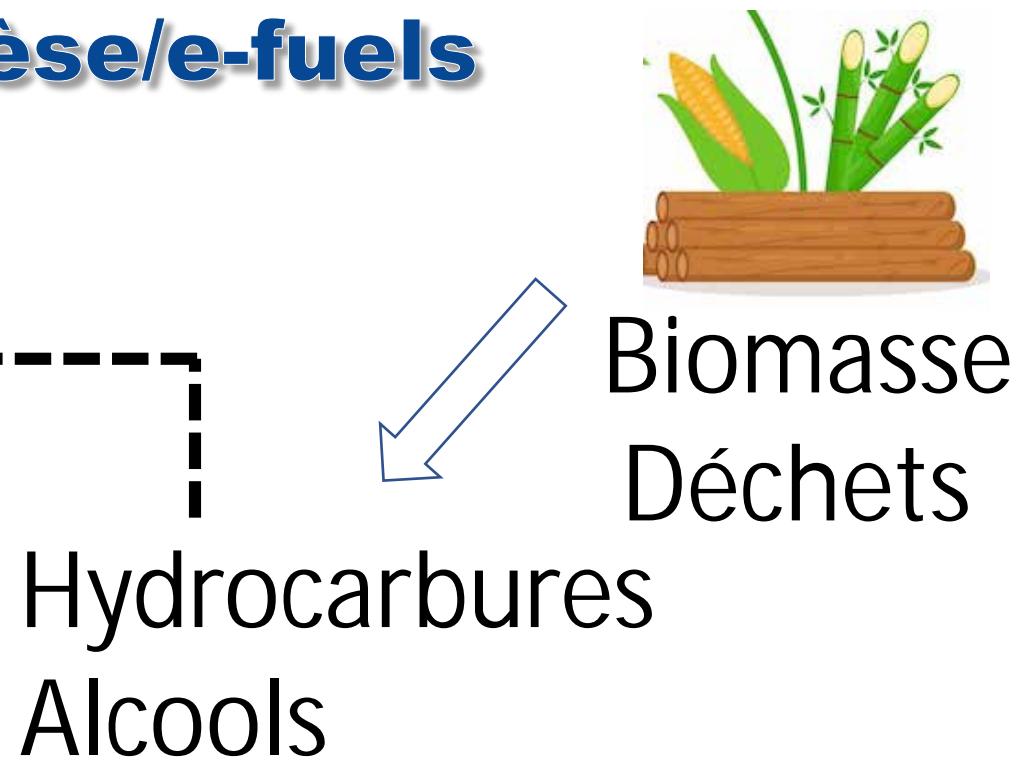
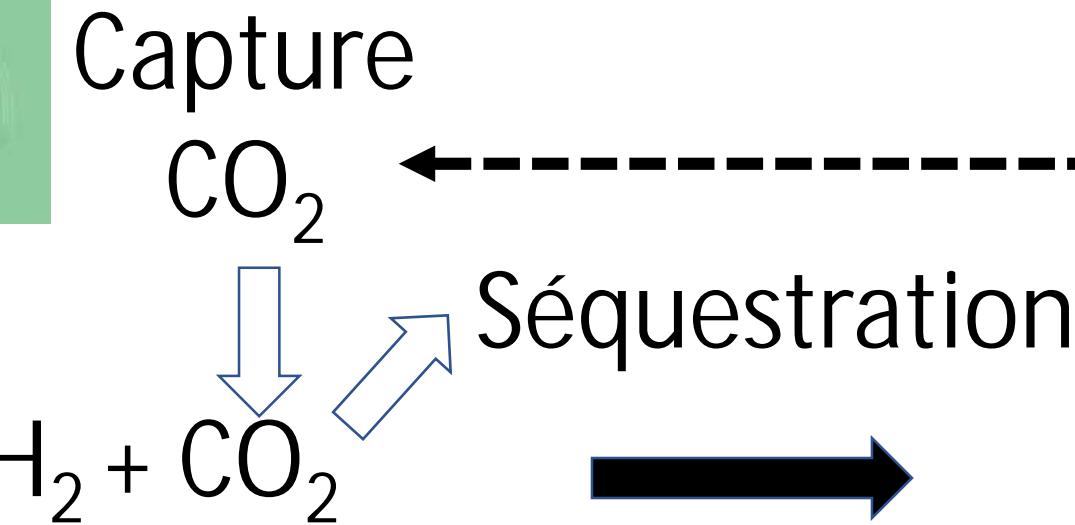
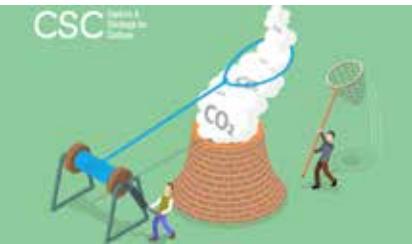


Biomasse
Déchets

Hydrocarbures
Alcools

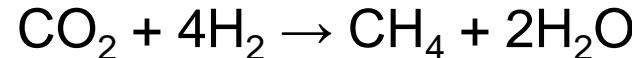


Carburants de synthèse/e-fuels

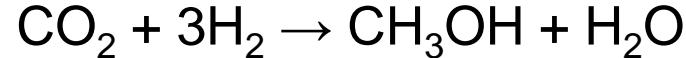


CARBURANTS DE SYNTHESE

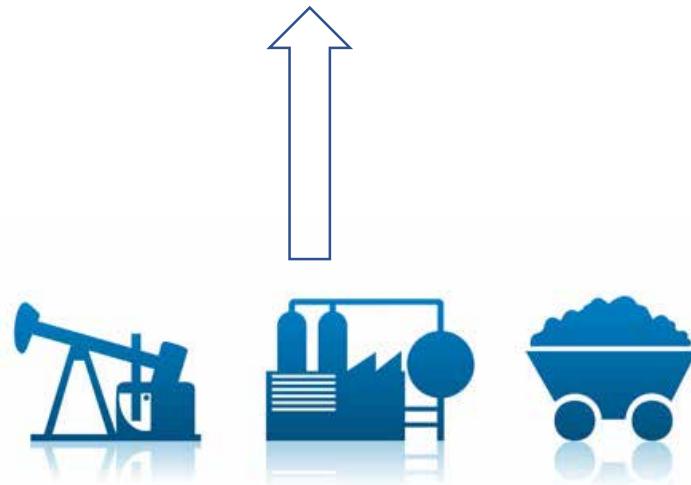
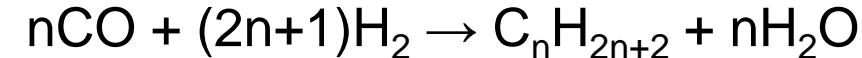
e-METHANE



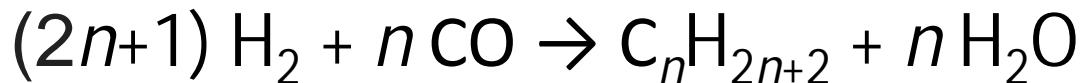
e-METHANOL



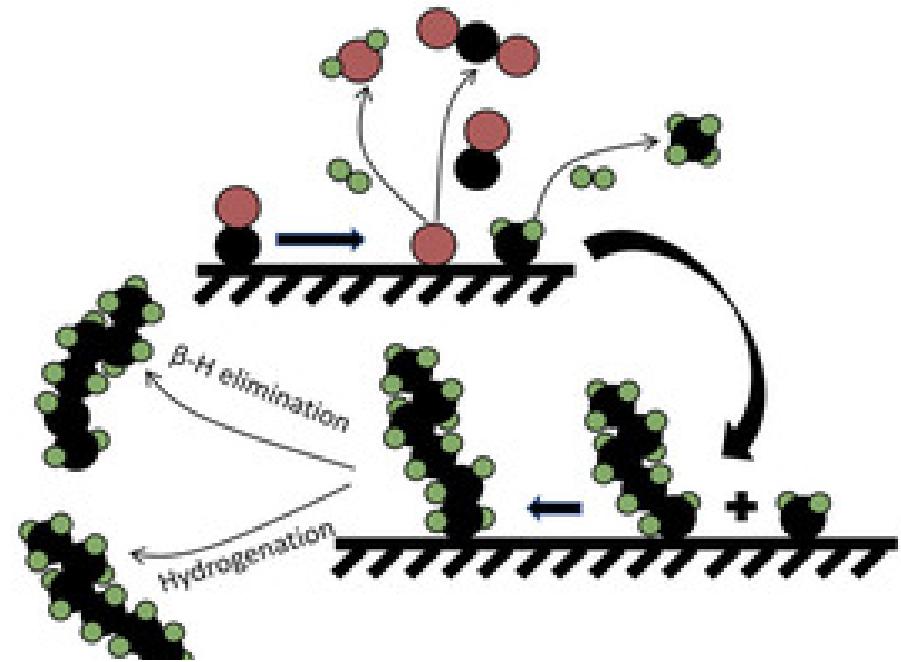
e-KEROSENE



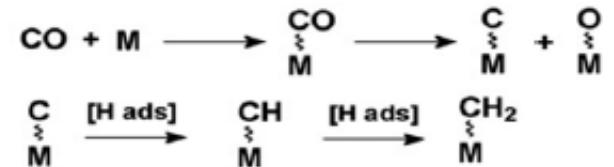
Synthèse Fischer-Tropsch



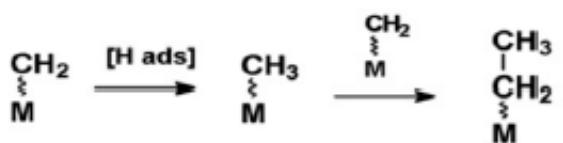
Catalyseurs: à base de Fe, Co



initiation



propagation

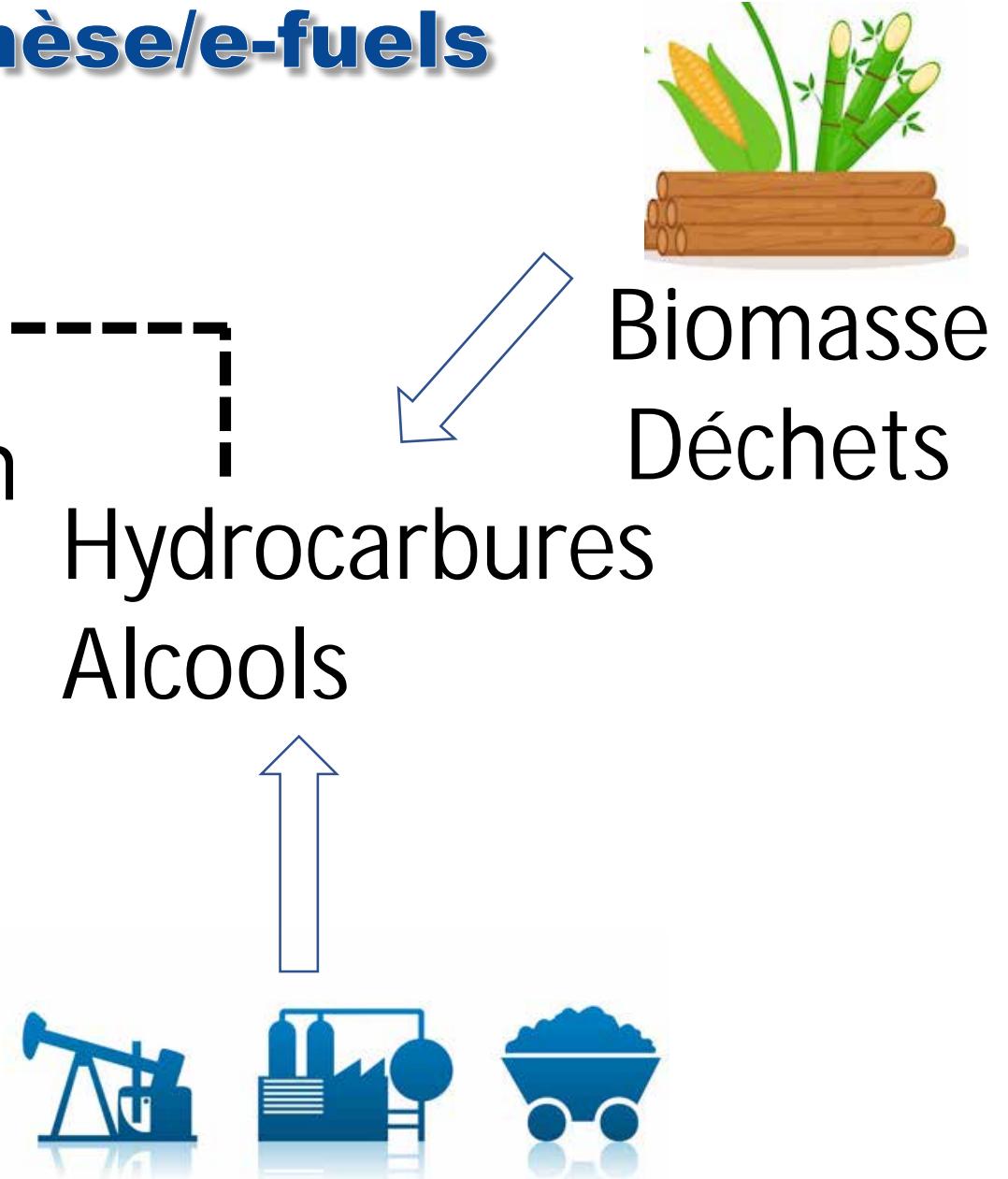
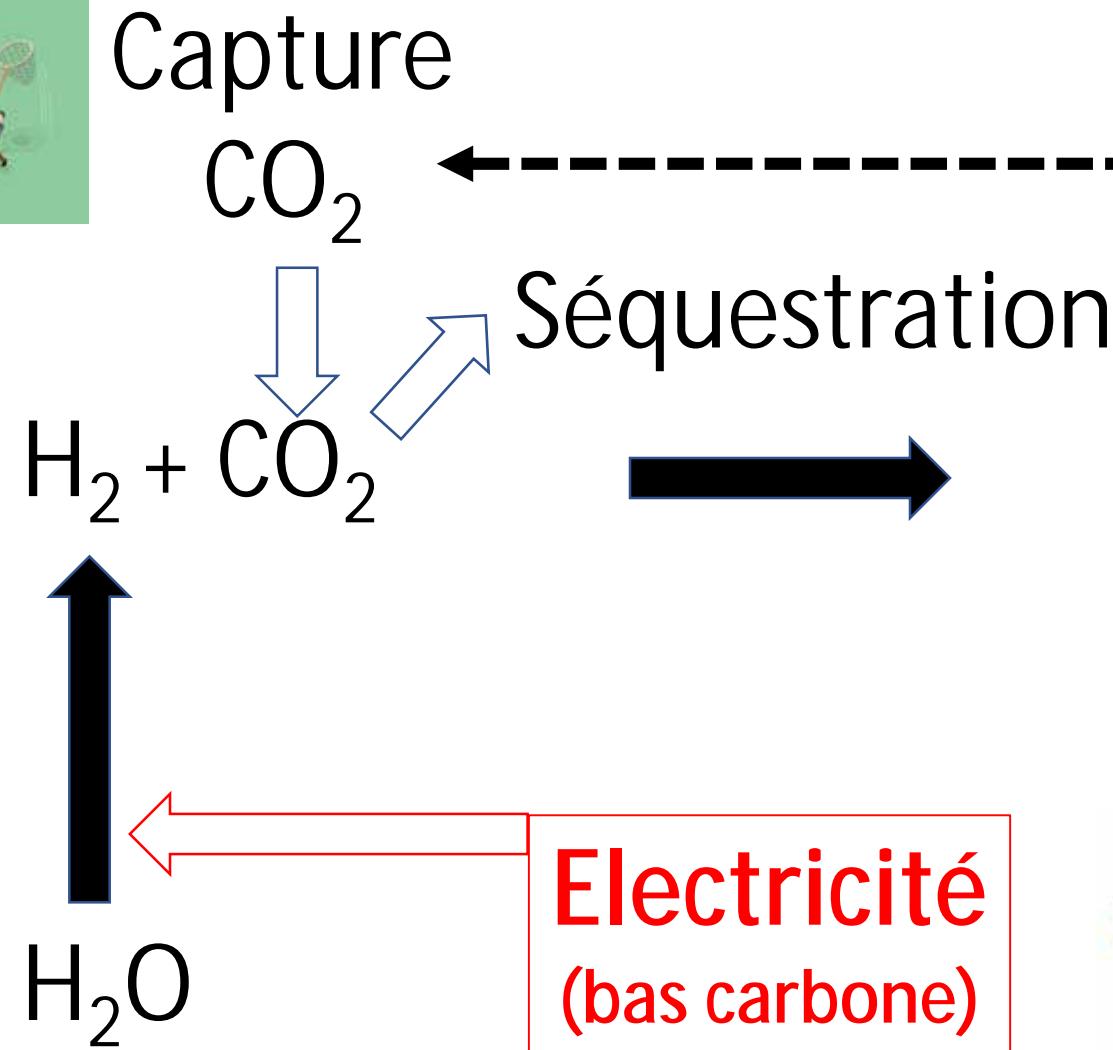
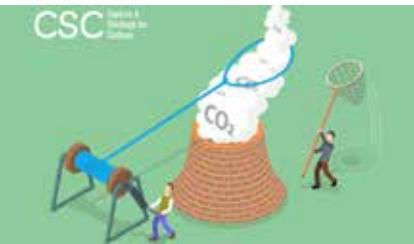


**On the Mechanism of the Fischer-Tropsch Reaction.
The Chain Propagation Step**

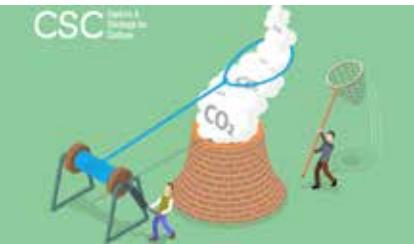
Robert C. Brady III and R. Pettit*

J. Am. Chem. Soc., Vol. 103, No. 5, 1981

Carburants de synthèse/e-fuels



Carburants de synthèse/e-fuels



Capture

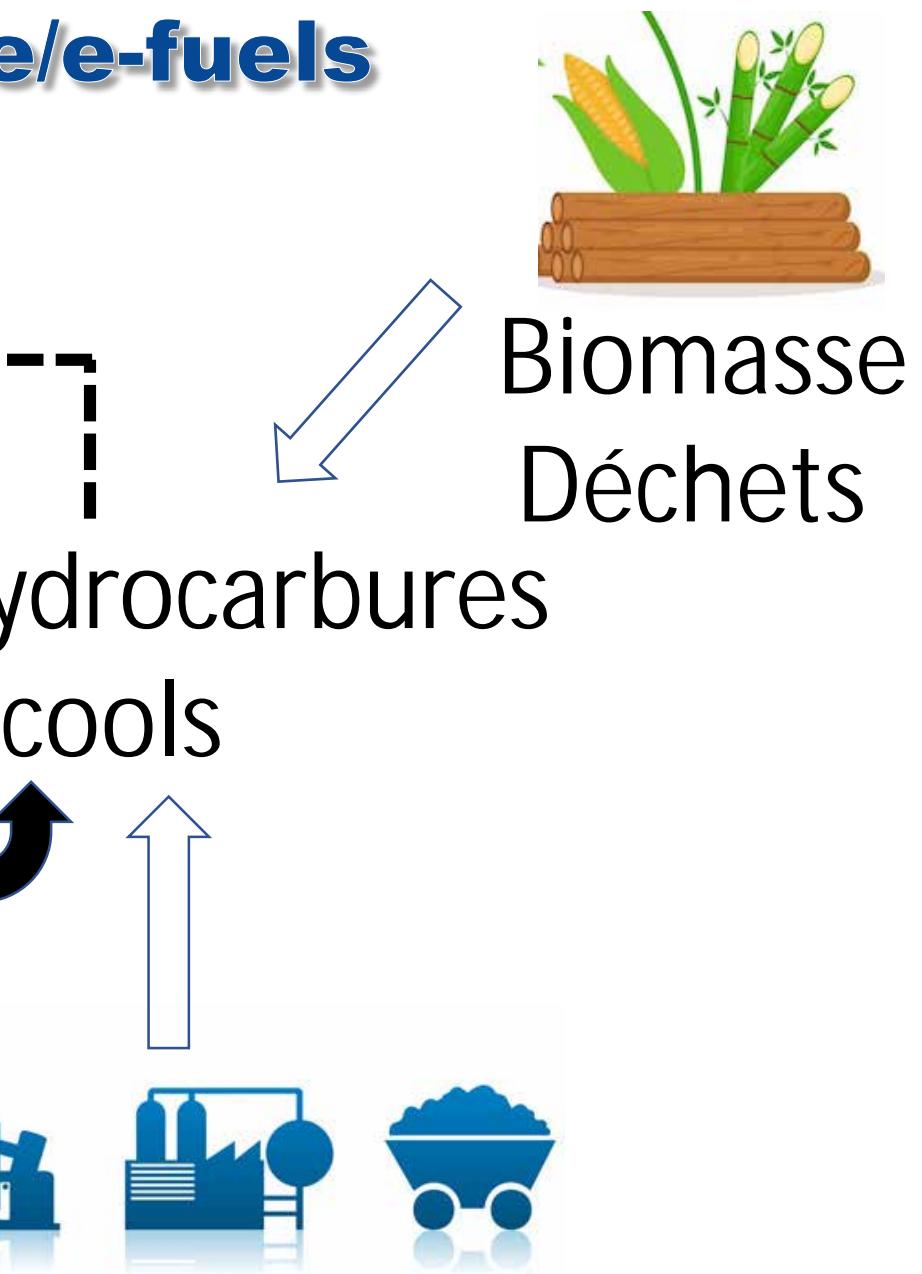
CO₂

Séquestration

CO₂



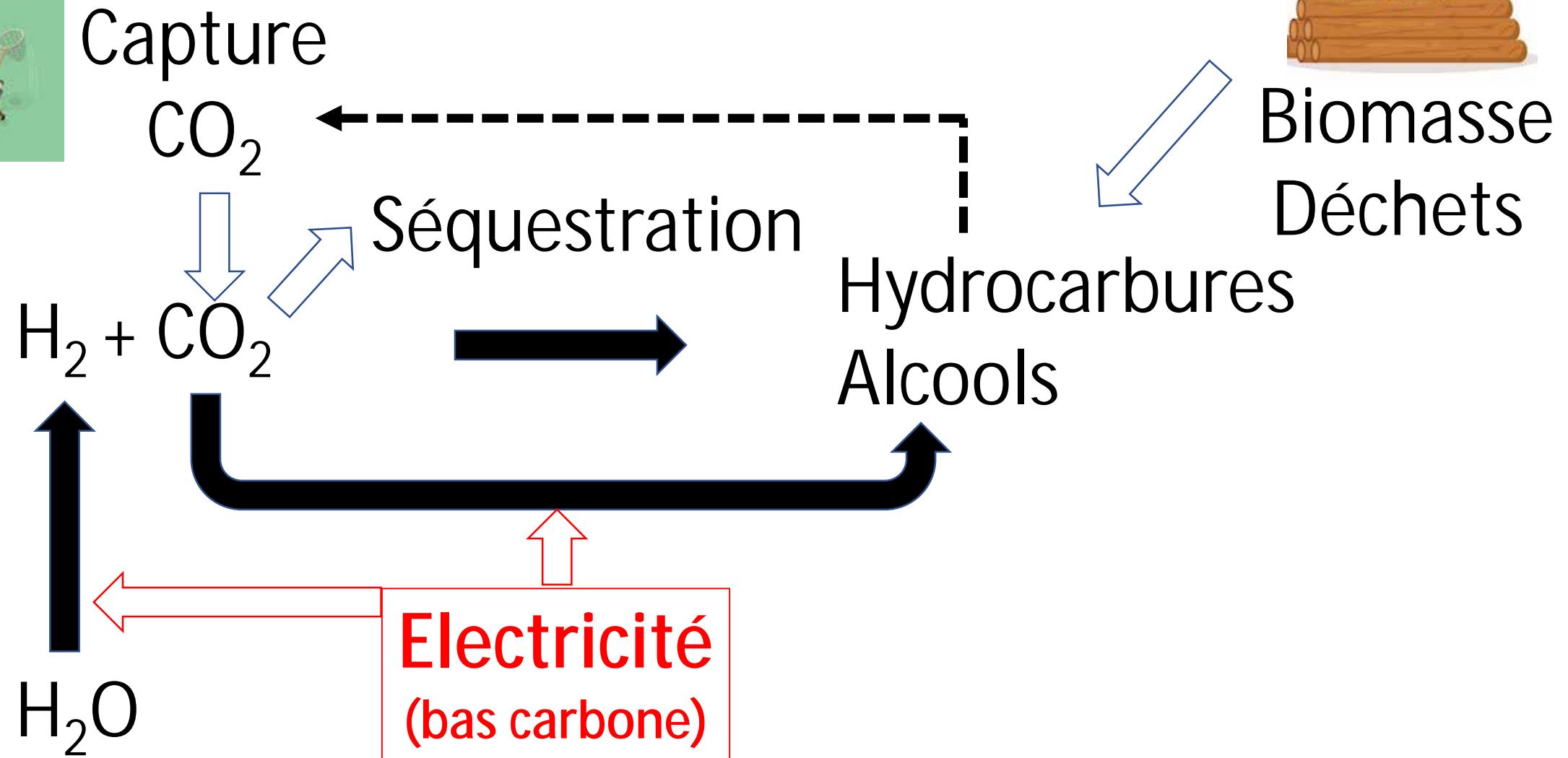
Electricité
(bas carbone)



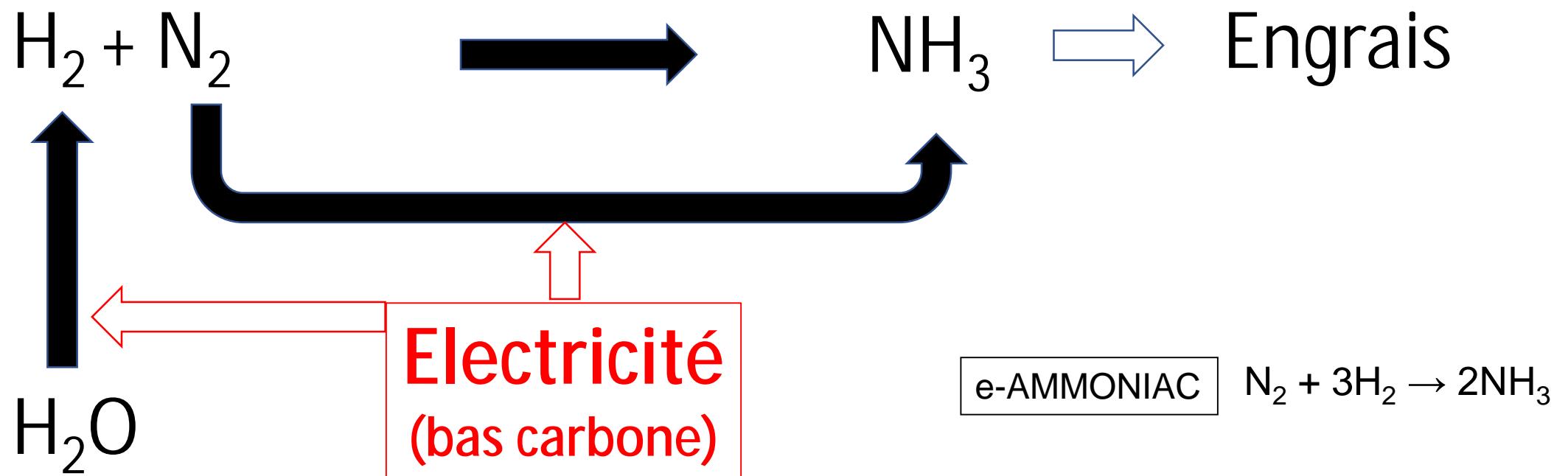
Biomasse
Déchets

Hydrocarbures
Alcools

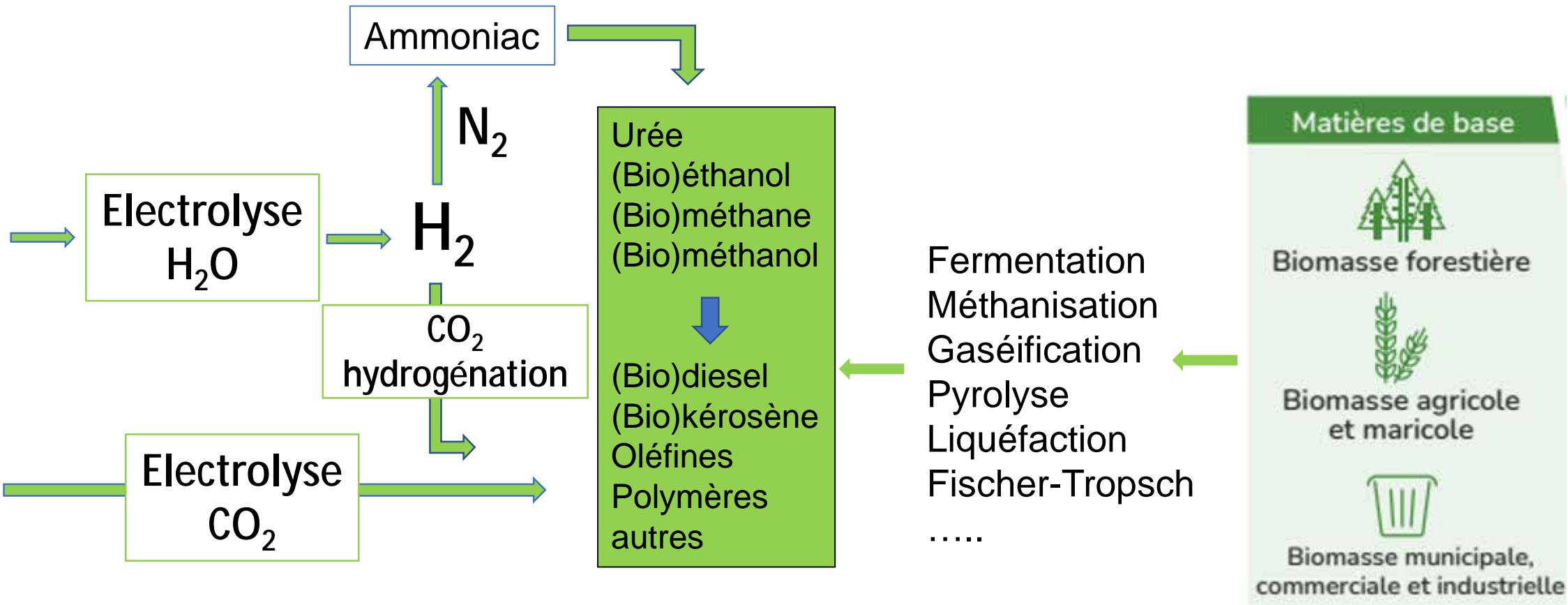
Carburants de synthèse/e-fuels



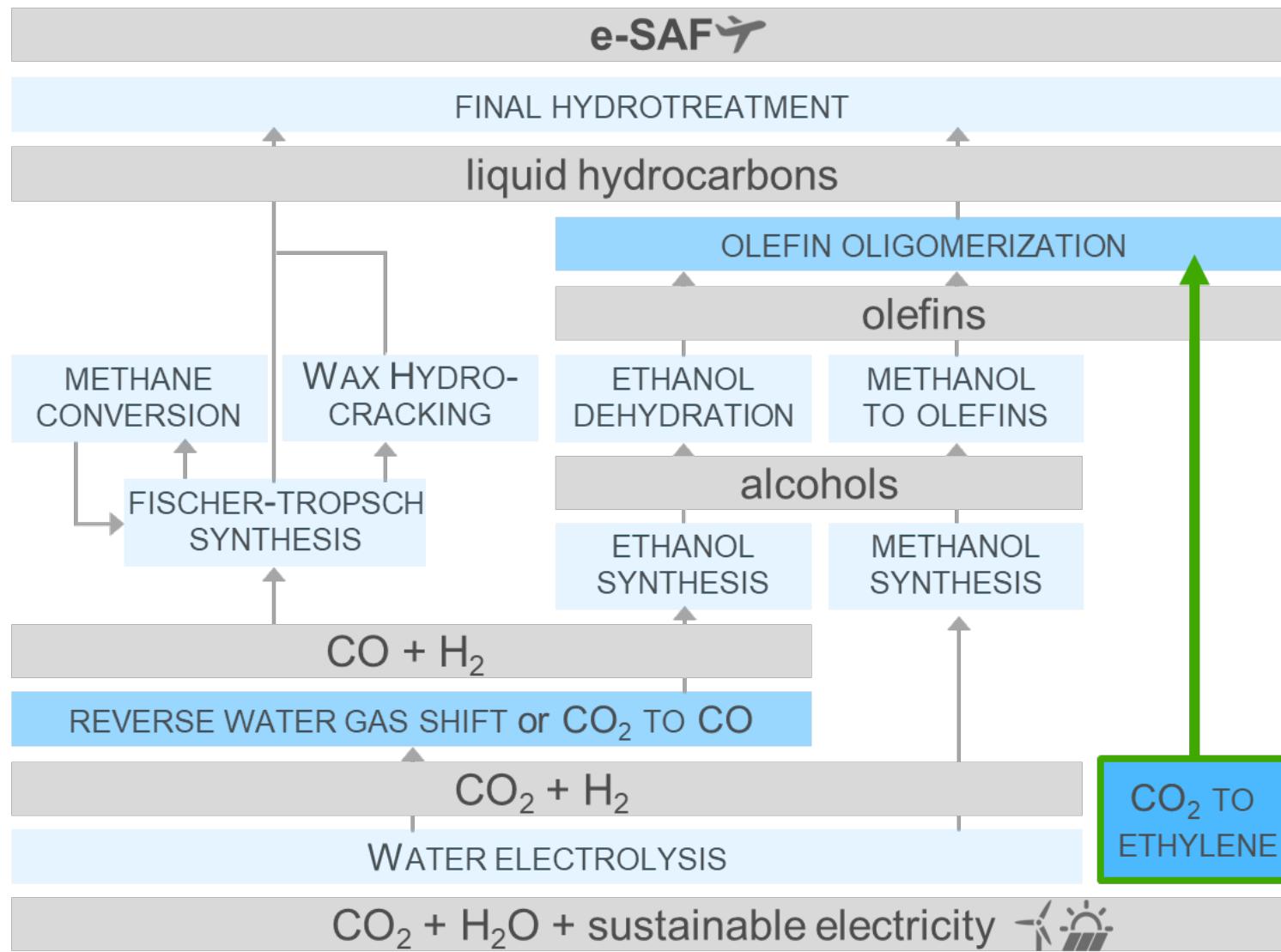
Carburants de synthèse/e-fuels



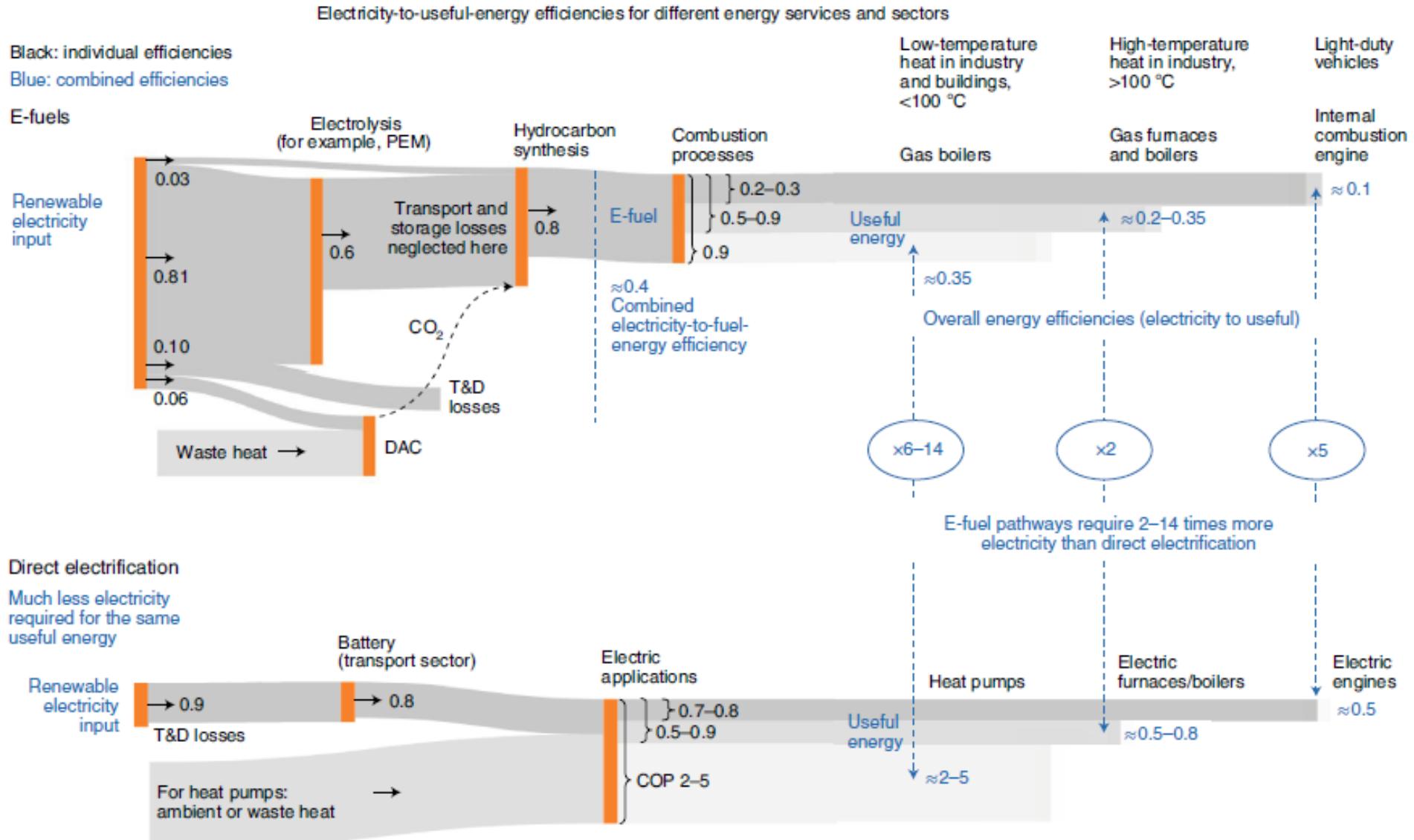
UNE REVOLUTION DE LA CHIMIE ORGANIQUE



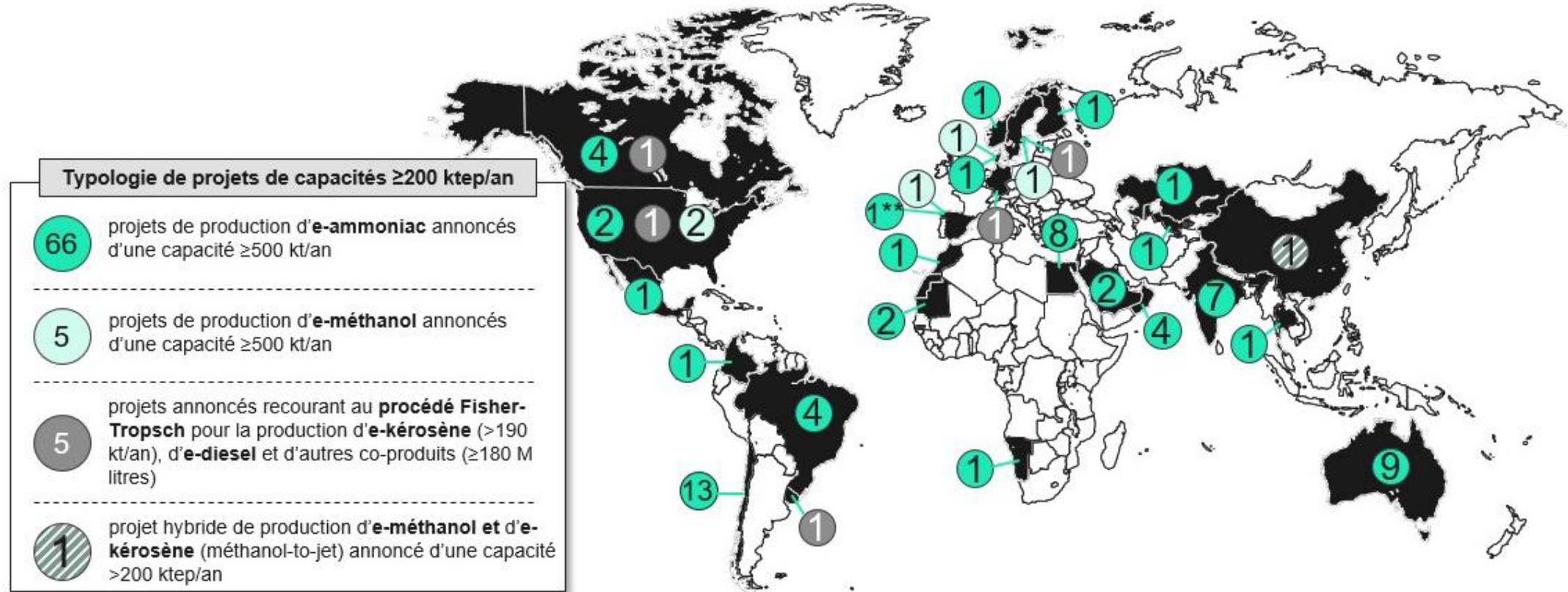
Carburants de synthèse/e-fuels



Electrification directe vs indirecte



LES COMBUSTIBLES ALTERNATIFS (ÉLECTRIQUES) .



SIAPARTNERS ✓

Source : Recensement de projets Sia Partners

e-METHANE	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
e-METHANOL	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
e-AMMONIAC	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$
e-KEROSENE	$n\text{CO} + (2n+1)\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n\text{H}_2\text{O}$

200 ktep = 2,3 TWh



Fossiles: où en est-on ?

Marc FONTECAVE

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

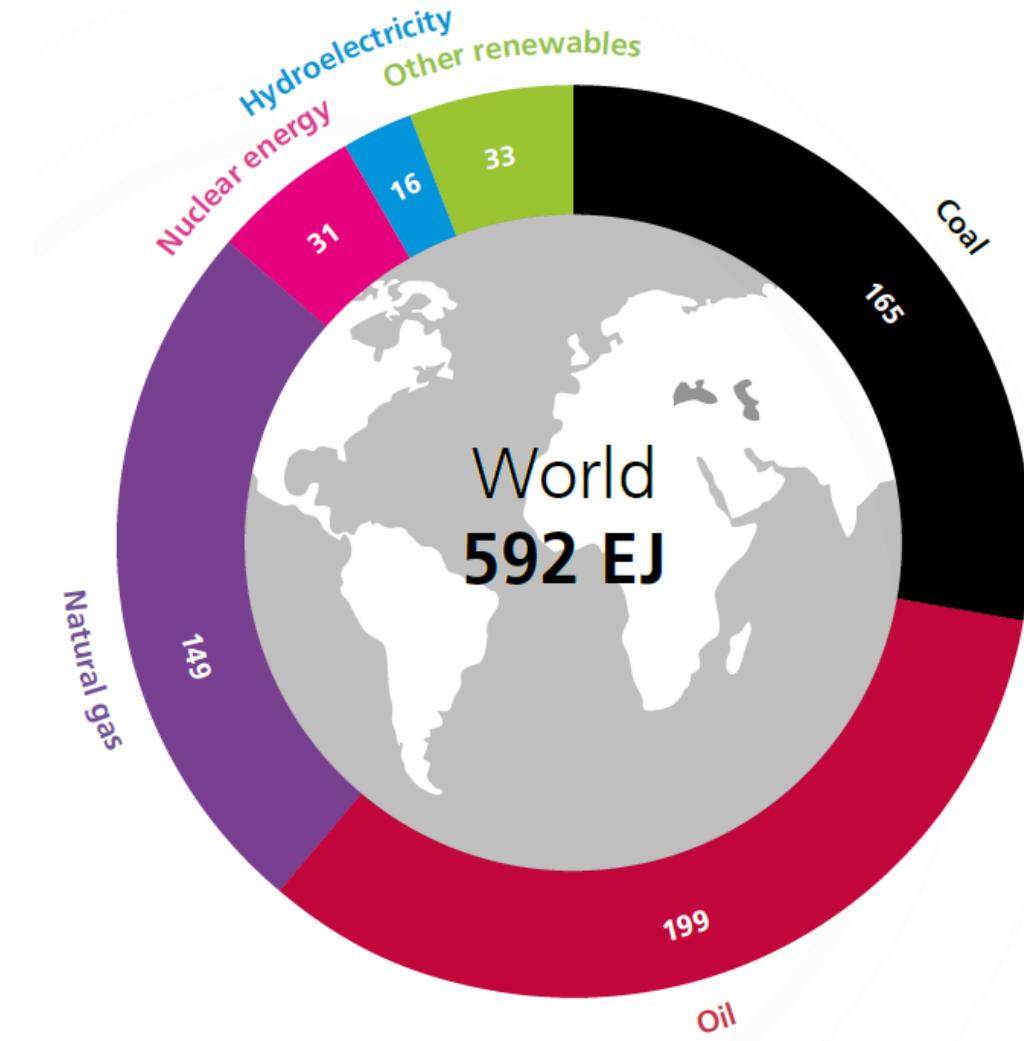


L'ENERGIE DANS LE MONDE

2025 | 74th edition

Statistical Review of World Energy

Global energy demand increased 2% in 2024 with non-OECD countries dominating both the share of absolute demand and annual growth rates. Fossil fuels continue to underpin the energy system accounting for 87% of the energy mix.



Les fossiles: toujours présents

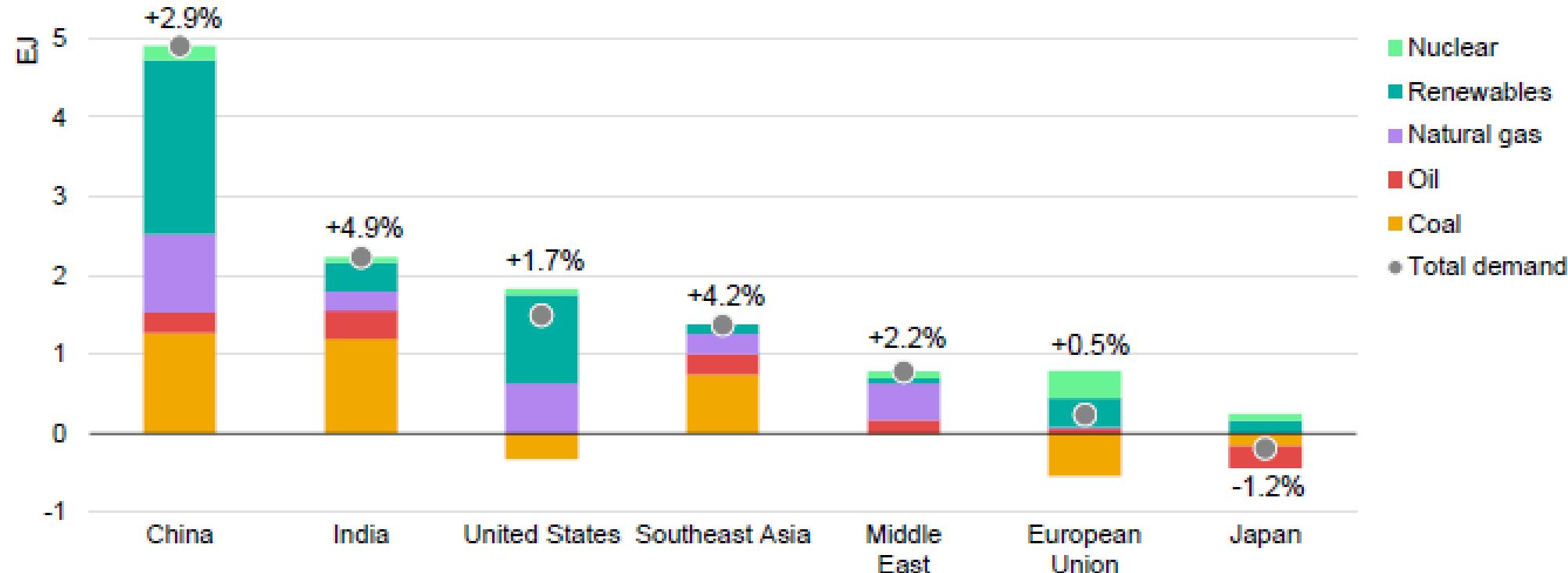


2000 projets d'extraction de combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) !!!

Les données utilisées proviennent de plusieurs sources : [la base de Kühne et al. \(2022\)](#) pour les plus grands projets d'extraction de combustibles fossiles, [Rystad Energy](#) pour les projets pétroliers et gaziers et pour le charbon.

Les fossiles: toujours présents

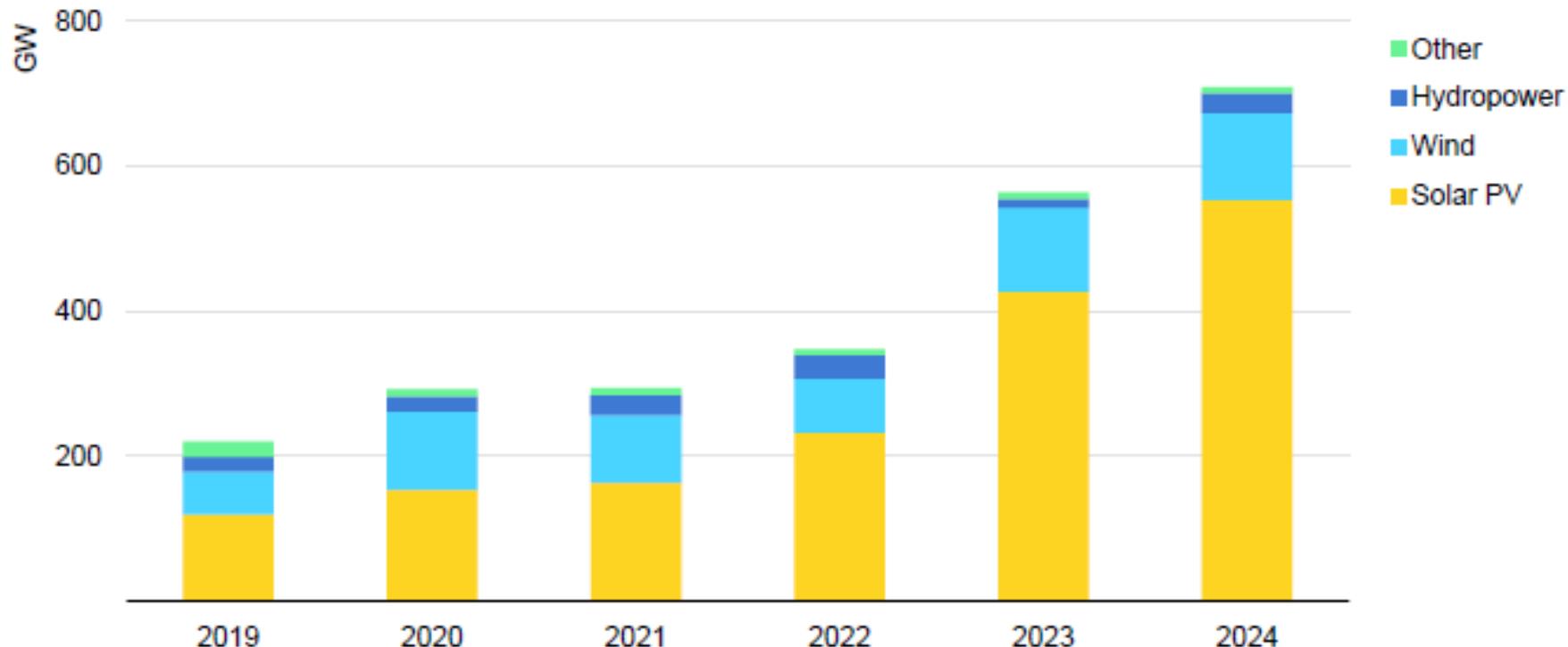
Change in energy demand, selected regions, 2023-2024



IEA. CC BY 4.0.

Croissance des énergies renouvelables électriques

Total renewable capacity additions by technology, 2019-2024



IEA. CC BY 4.0.

Note: 2024 values are based on both actual and estimated additions.

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). »

Ø Europe: baisse de 3,8 %

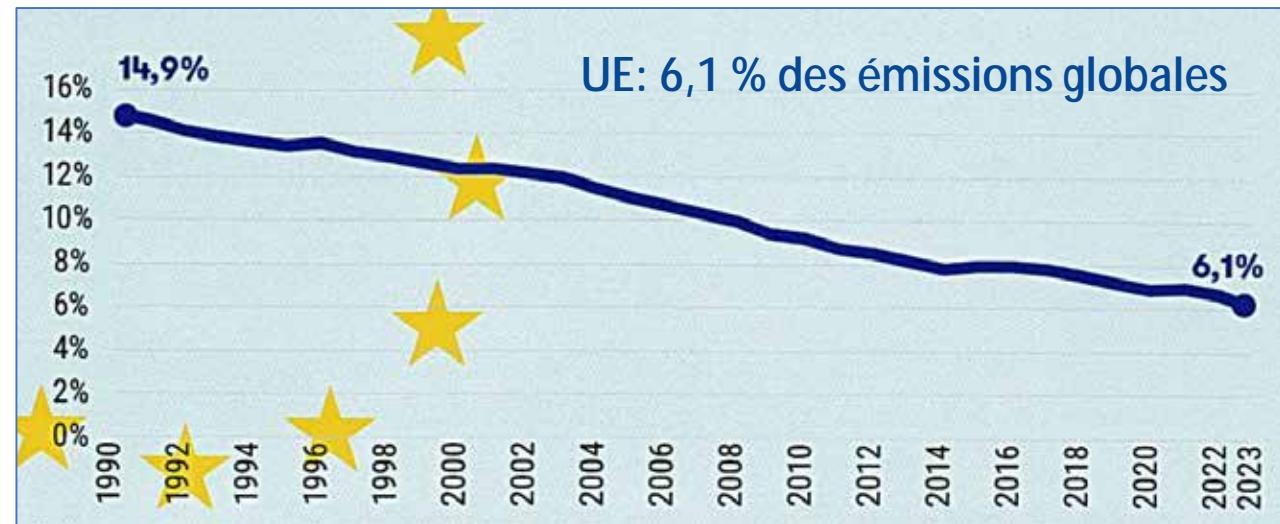
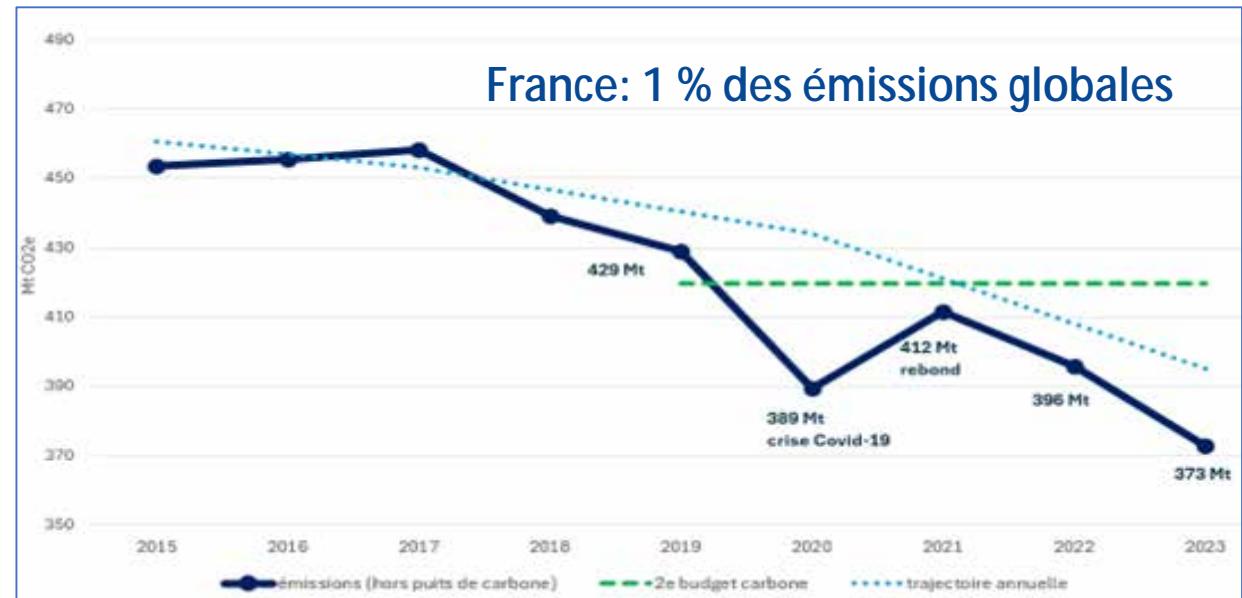
Ø Etats Unis: baisse de 0,6 %

Ø Chine: hausse de 0,2 %

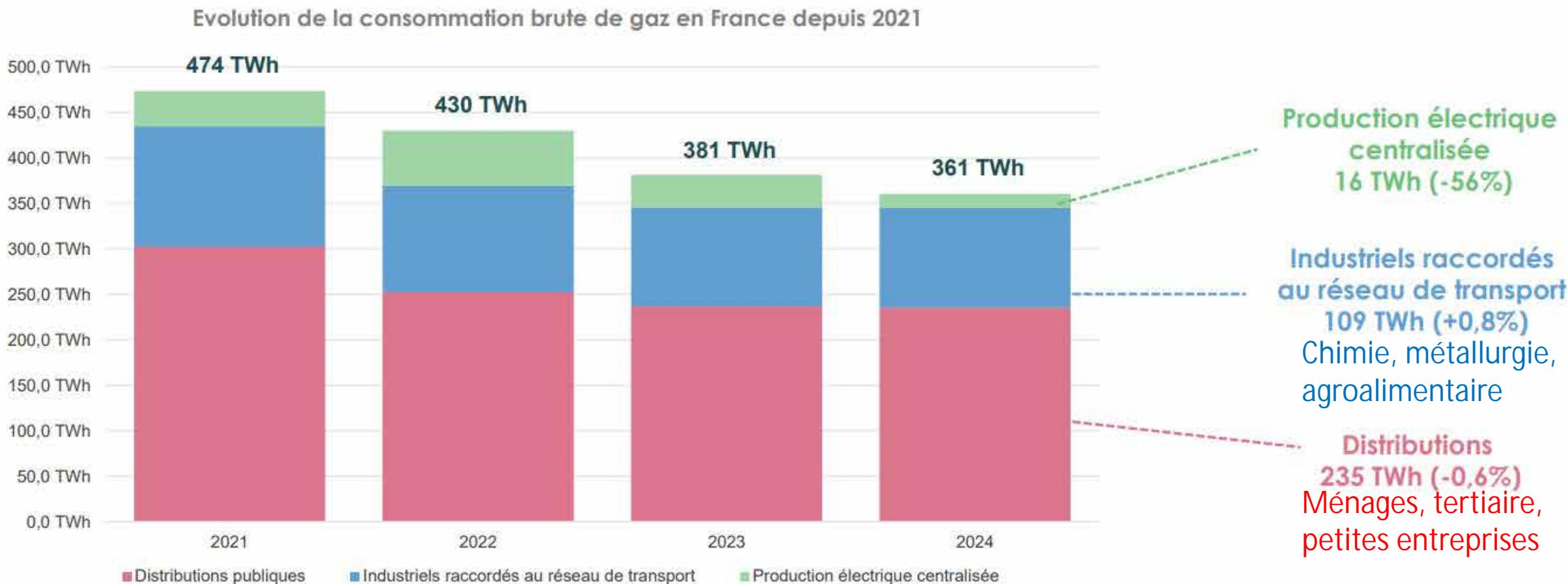
Ø Inde: hausse de 4,6 %

Ø France: baisse de 1,8 % (6,8% en 2023)
empreinte C : 644 Mt
(2025- baisse de 0.8%-CITEPA)

* + 0,7 % 1^{er} sem 2025 vs 1^{er} sem 2024



LE GAZ EN FRANCE



Sources : NaTran, Teréga, GRDF - Analyse : NaTran

Le niveau le plus bas de la consommation de gaz en France depuis 1990

ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?

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)

Chine 21 GW de charbon mis en service au 1^{er} semestre 2025 (record depuis 2016)

Global Energy Monitor août 2025.

Demain, encore des fossiles

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 »

Shell 2025

« La demande mondiale de GNL « devrait augmenter d'environ 60% d'ici 2040 »

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** »

L'ÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE

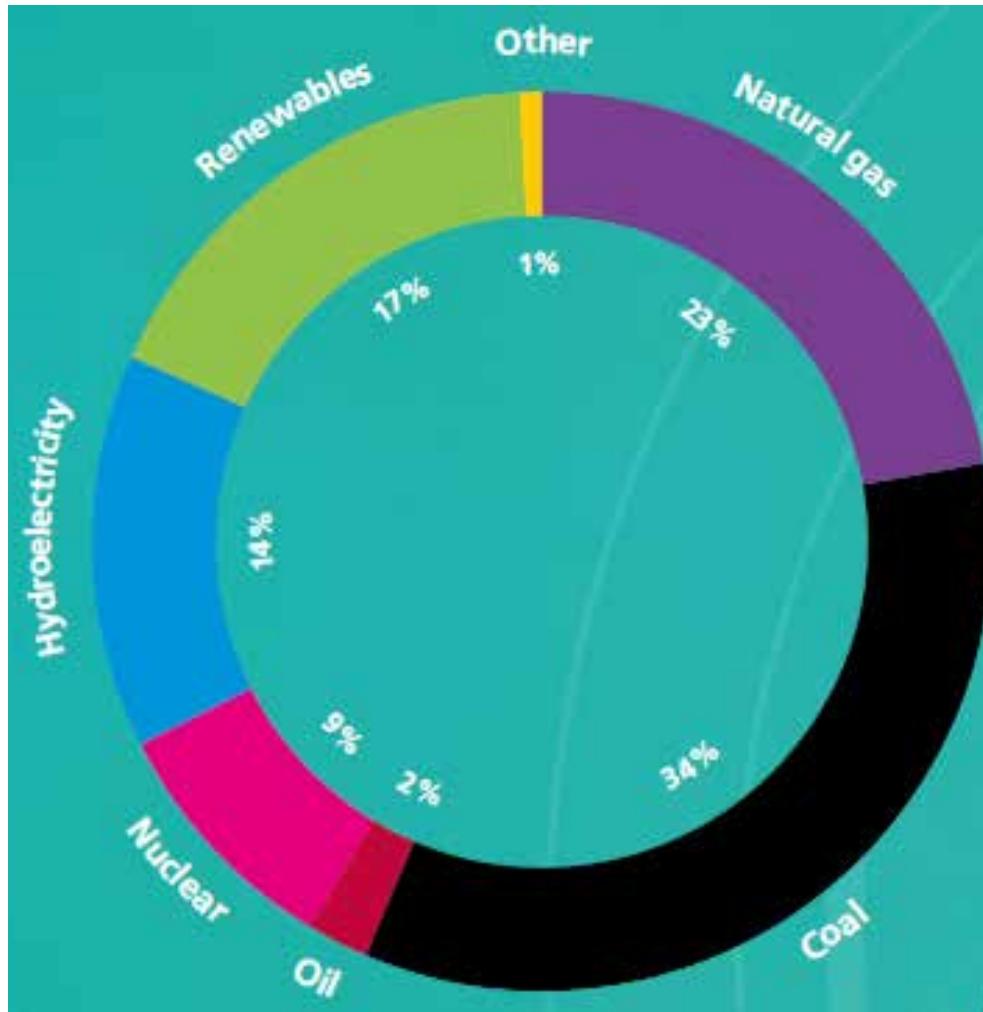
2025 | 74th edition

Statistical Review of World Energy

Electricity generation increased by 4% in 2024, to reach a record level of 31,256 TWh. In the last decade, global electricity generation has grown at 2.6% per annum, which is double the annual growth rate of total energy demand over the same period (1.3%). This highlights how the global energy system is electrifying at pace.

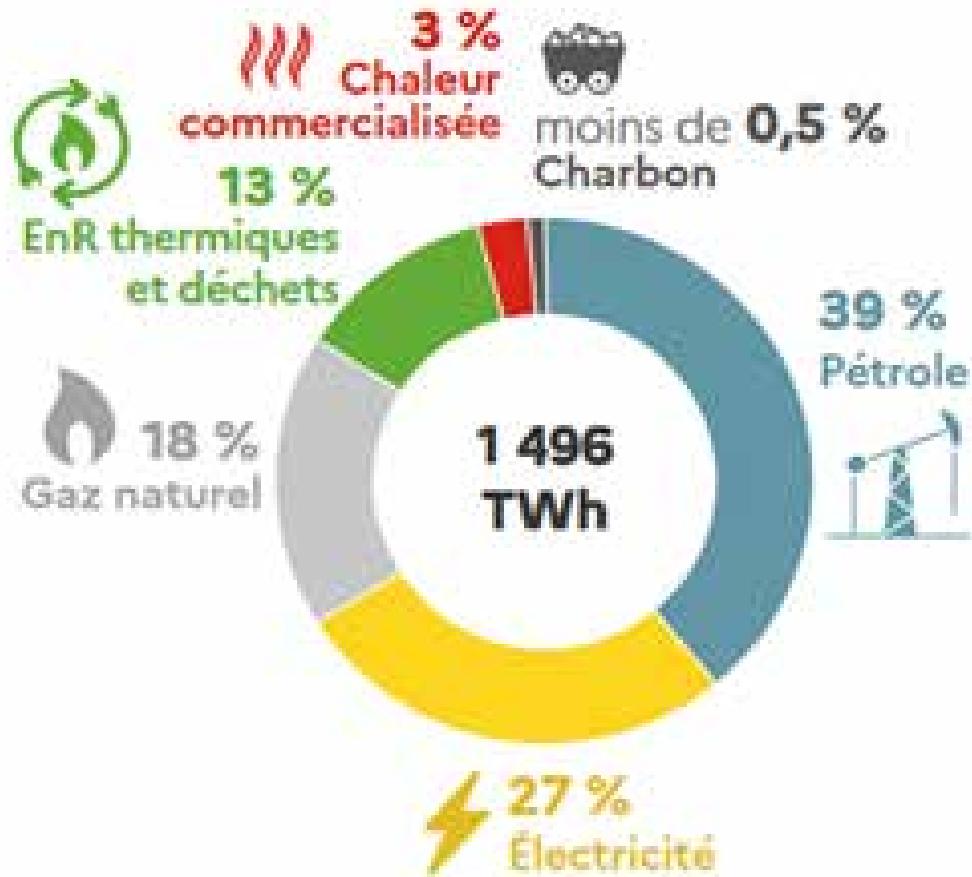
With the exception of oil, electricity generation from all sources increased globally in 2024. Amongst fossil fuels, gas saw the biggest increase in generation, growing 2.5% and coal grew by 1.2% to reach 10,613 TWh and remained the largest source of generation. Generation from renewables, excluding hydro, increased by 14% and now accounts for 17% of total generation – when including hydroelectricity, it accounted for 31%. In 2024, total installed solar capacity increased by 32%, and total installed wind capacity increased by 11%.

Global biofuels production grew by over 8%, with the US the largest global producer with a 37% share of global production. Additionally, the US, Brazil, and Europe combined account for around 75% of global biofuels use.

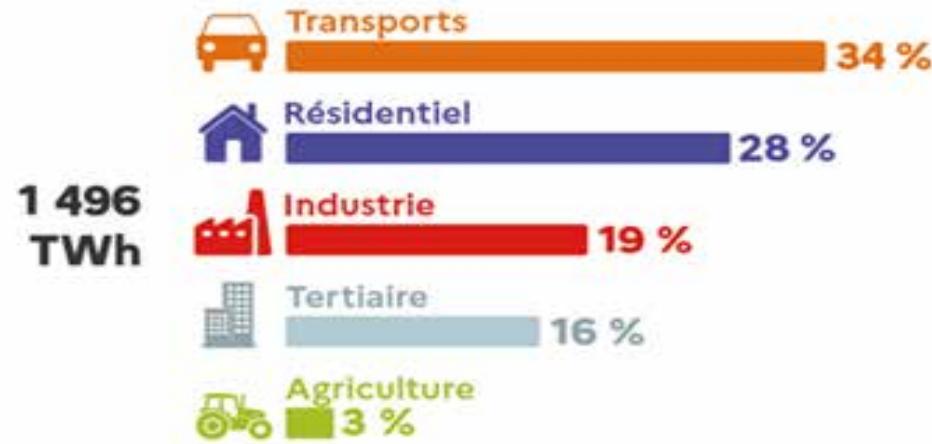


L'ENERGIE en France (2023)

Consommation finale à usage énergétique par énergie en 2023



Consommation finale énergétique par secteur en 2023



1496 TWh*

Electricité 27%; Fossiles: 58 %

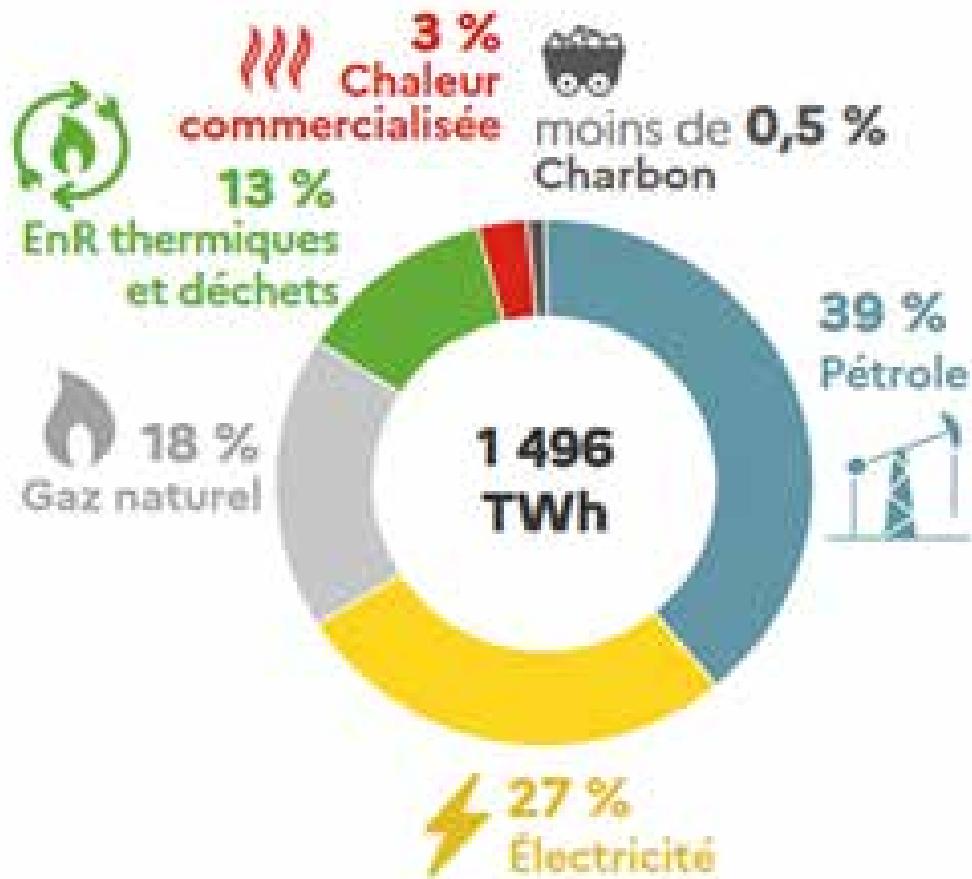
Électricité: 95 % décarbonée

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

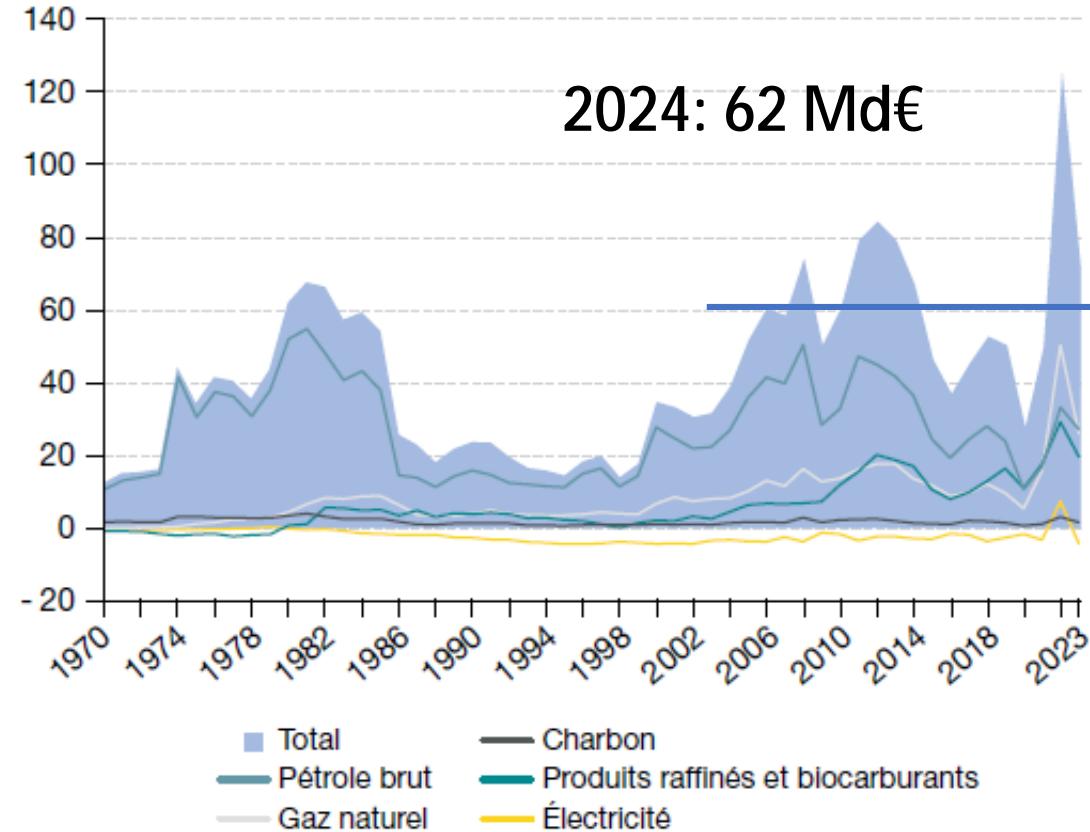
* 1498 TWh en 2024

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



Électricité (France): où en est-on ?

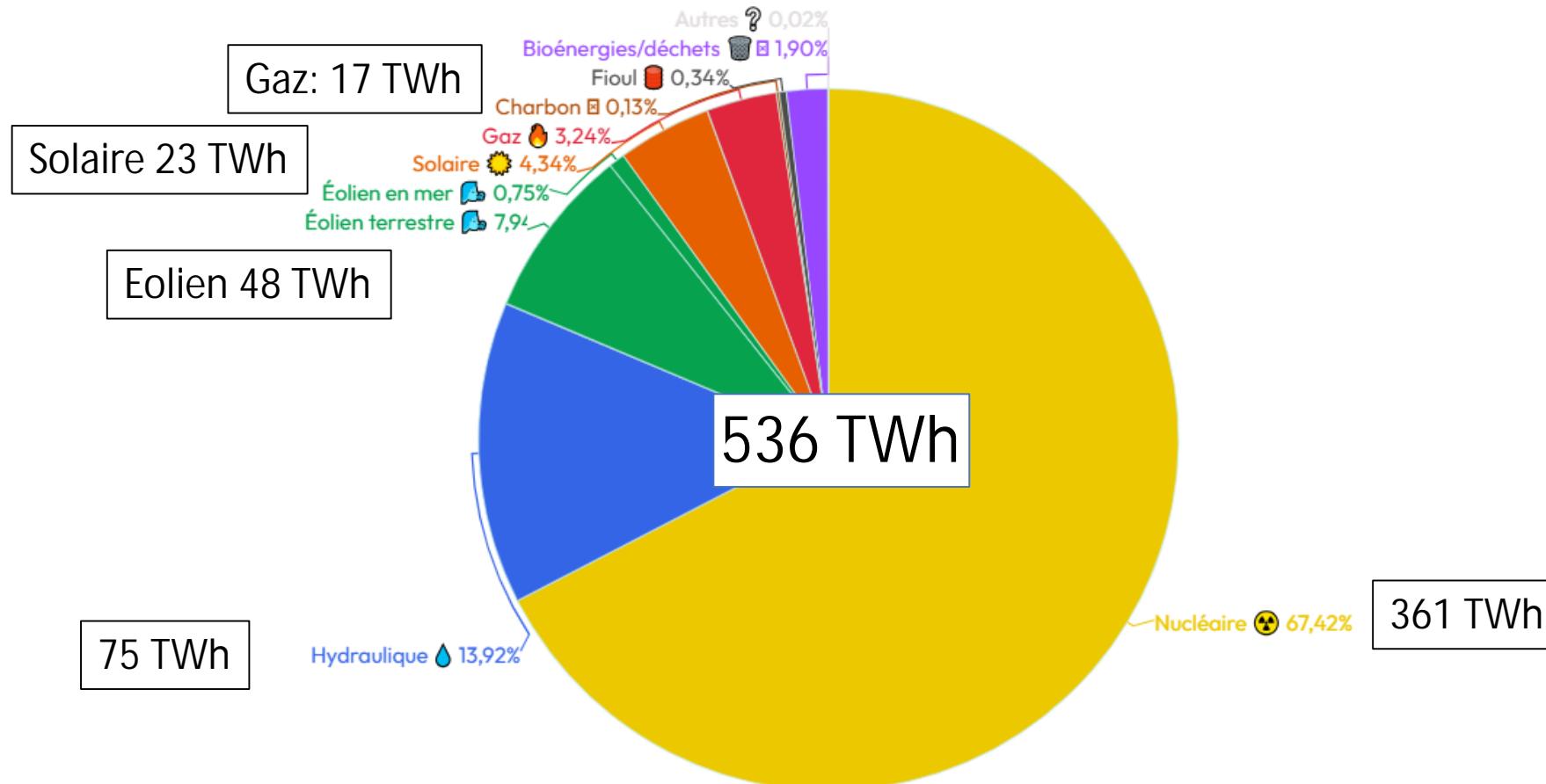
Marc FONTECAVE

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



Production électrique 2024 (France)

Production électrique par filière en France
en 2024



L'ELECTRICITE en France (2024): décarbonée

Production	536 TWh	Bilan électrique 2024; RTE (2025)
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

* Capacité d'interconnexion 24 GW; maximum 100-110 TWh (limites physiques des lignes entre pays)

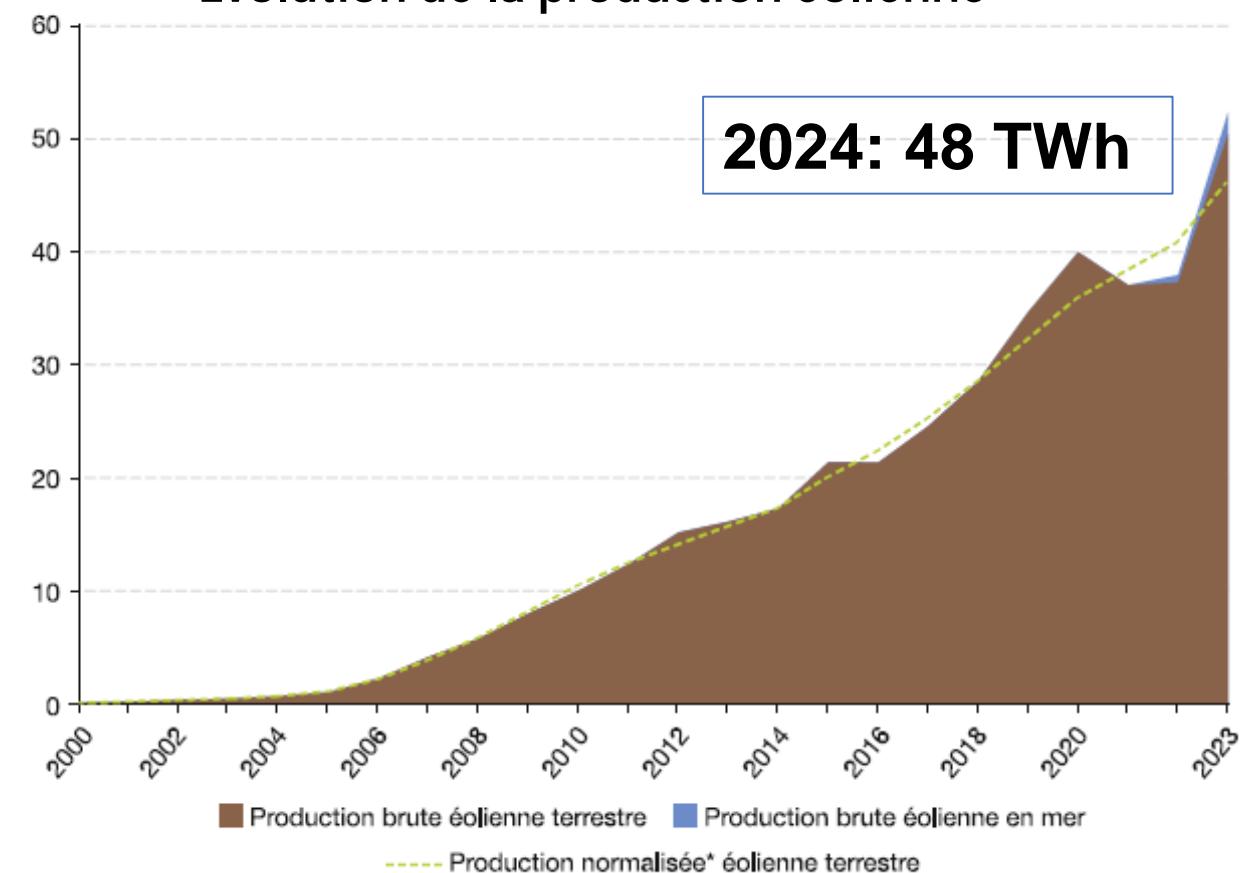
Energies renouvelables (solaire, éolien)

France

Evolution de la production photovoltaïque

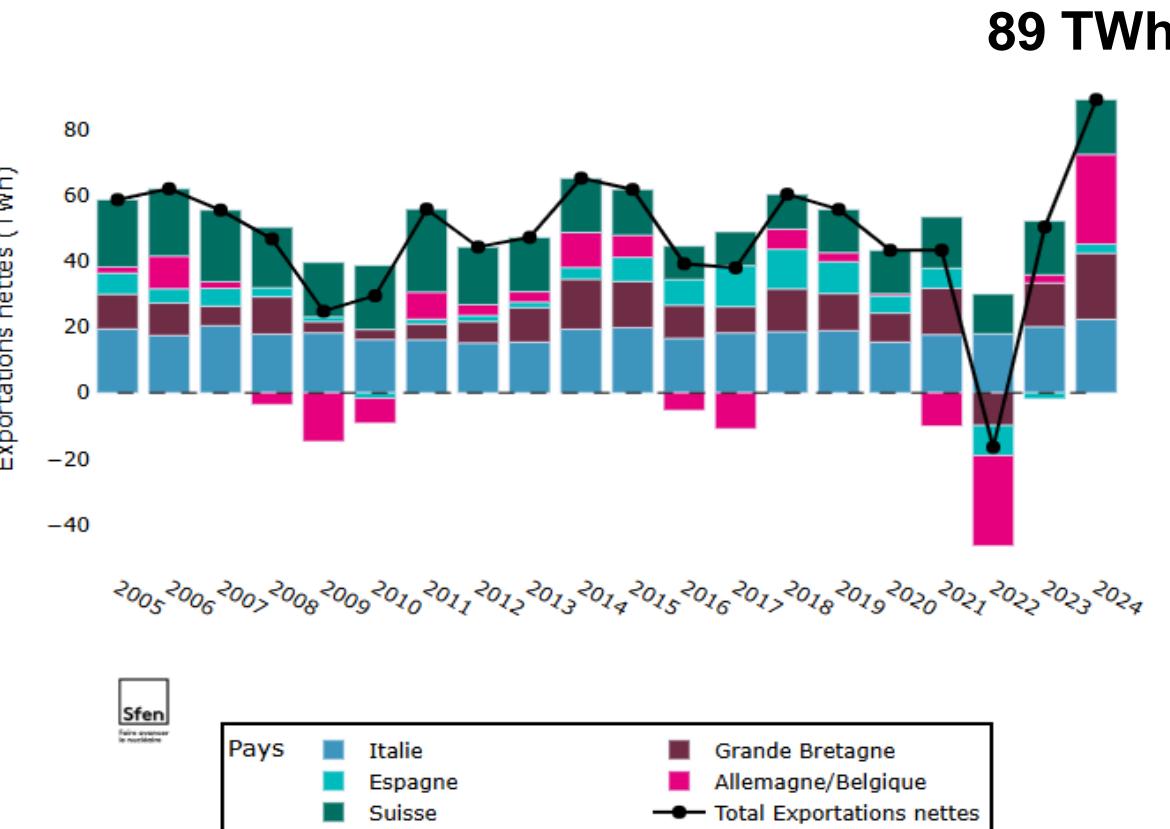


Evolution de la production éolienne

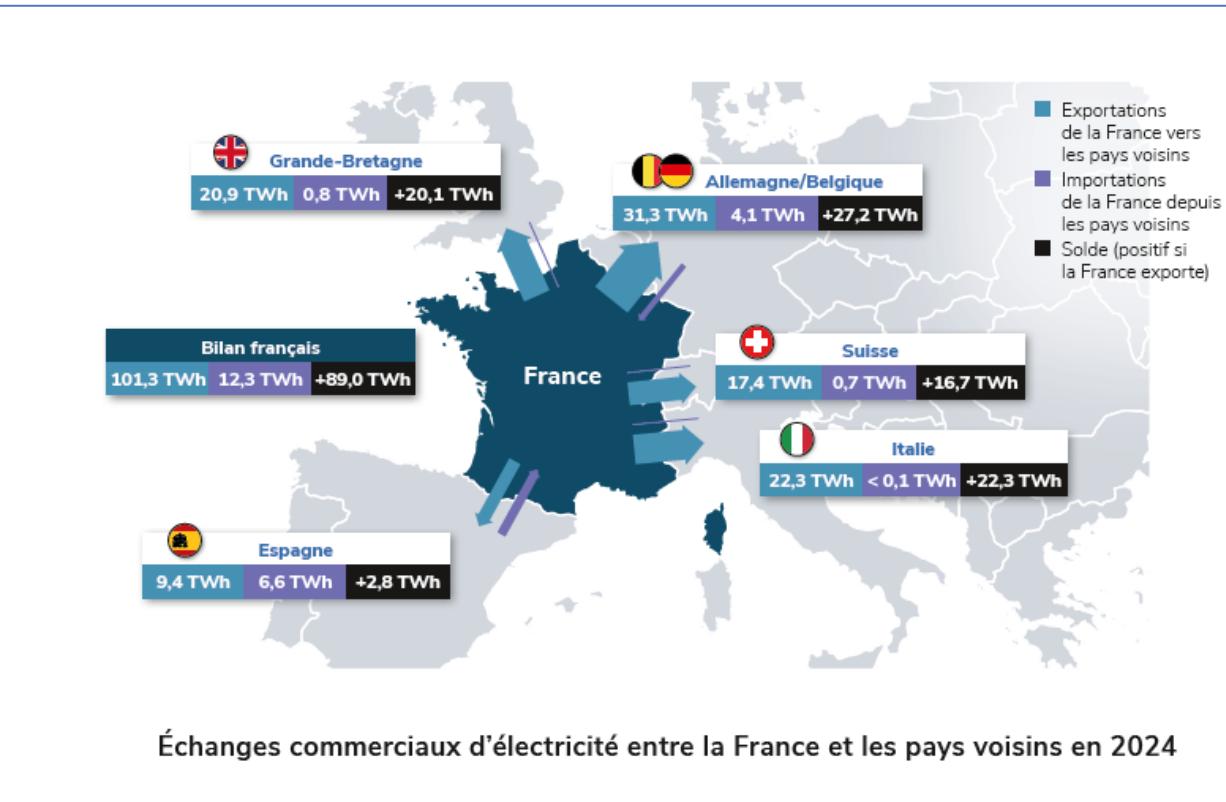


Production > Consommation = exportations

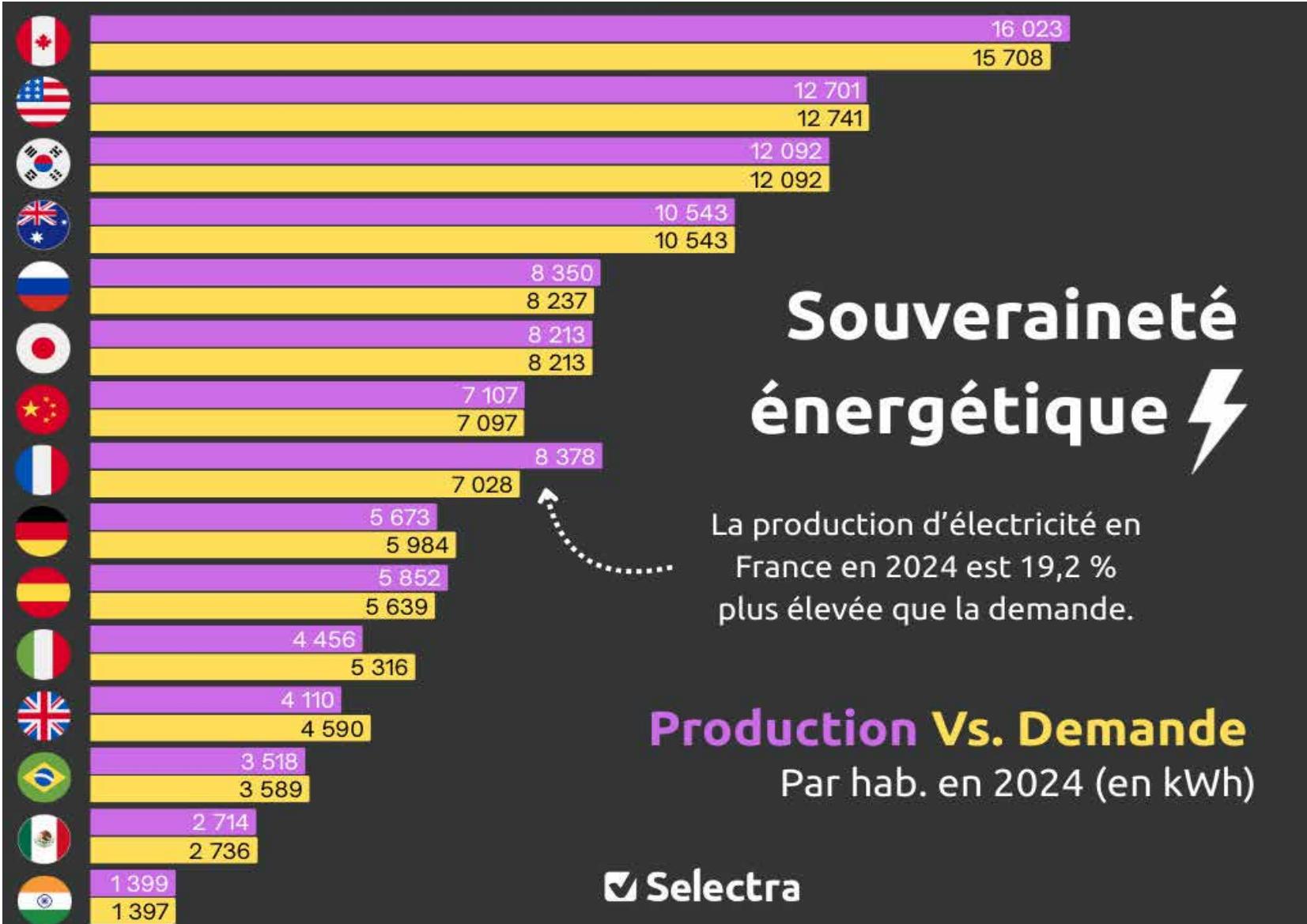
Exportations nettes d'électricité de la France (2005-2024)



Pays
Italie
Espagne
Suisse
Grande Bretagne
Allemagne/Belgique
Total Exportations nettes



Production > Consommation = exportations



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

Nucléaire: Conseil de politique nucléaire 17 mars 2025*

1. Point d'étape **programme EPR2**: mise en œuvre **2038**; EDF chiffrage coûts, délais d'ici fin de l'année; Financement: prêt de l'Etat bonifié couvrant au moins la moitié des coûts de construction et un contrat pour différence sur la production à un prix maximal de 100 euros/MWh
2. Validation du plan d'action visant à sécuriser **l'approvisionnement en uranium** (stratégie de développement des activités minières d'Orano).
3. **Aval du cycle**: Renouvellement des installations de la Hague pour entreposage/recyclage des combustibles usés (Orano: nouvelle piscine en 2040). Financement EDF principalement.
4. Confirmation des orientations visant la **fermeture du cycle du combustible** dans la 2^e moitié du siècle. Maitrise de: (i) la fabrication des combustibles à partir d'U et Pu; (ii) maitrise des RNRs; (iii) maitrise du retraitement des combustibles
5. Soutien aux **technologies SMR**. Mission au SGPI de poursuivre son soutien (France 2030)

* Discours de Belfort (E. Macron) février 2022

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

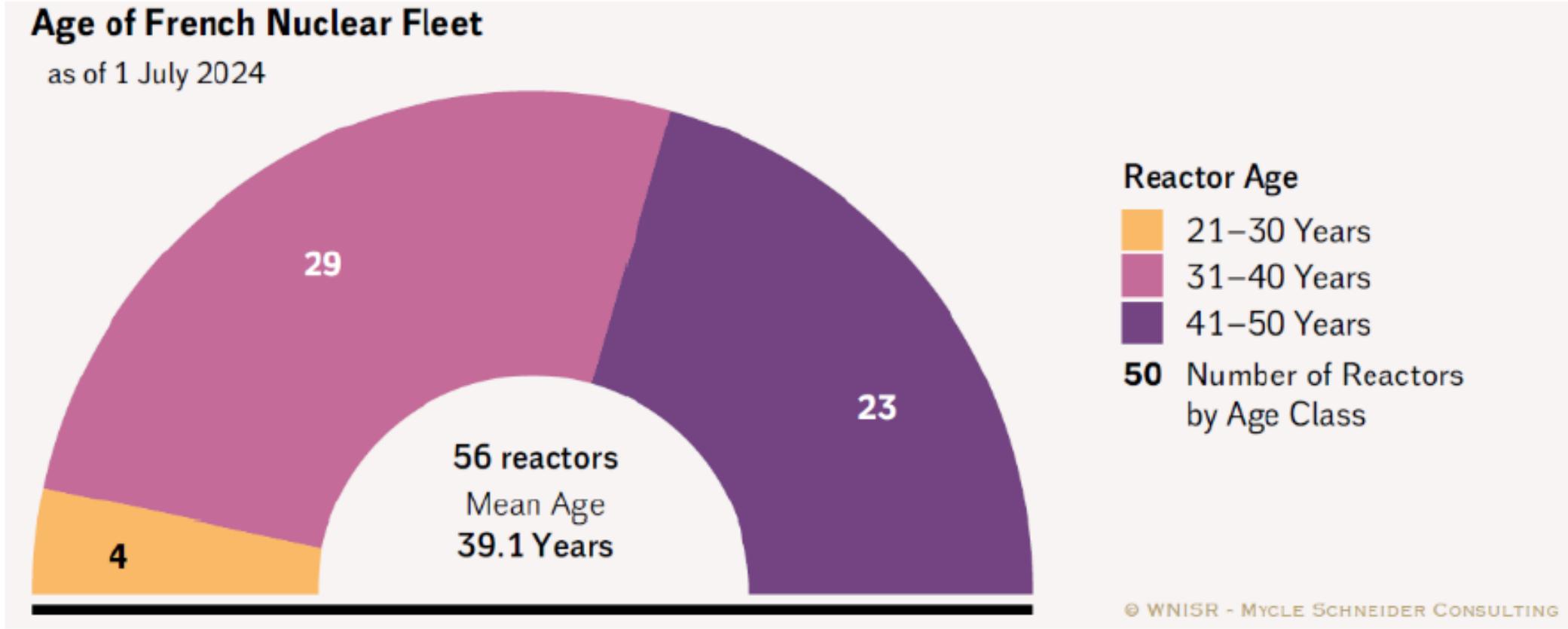
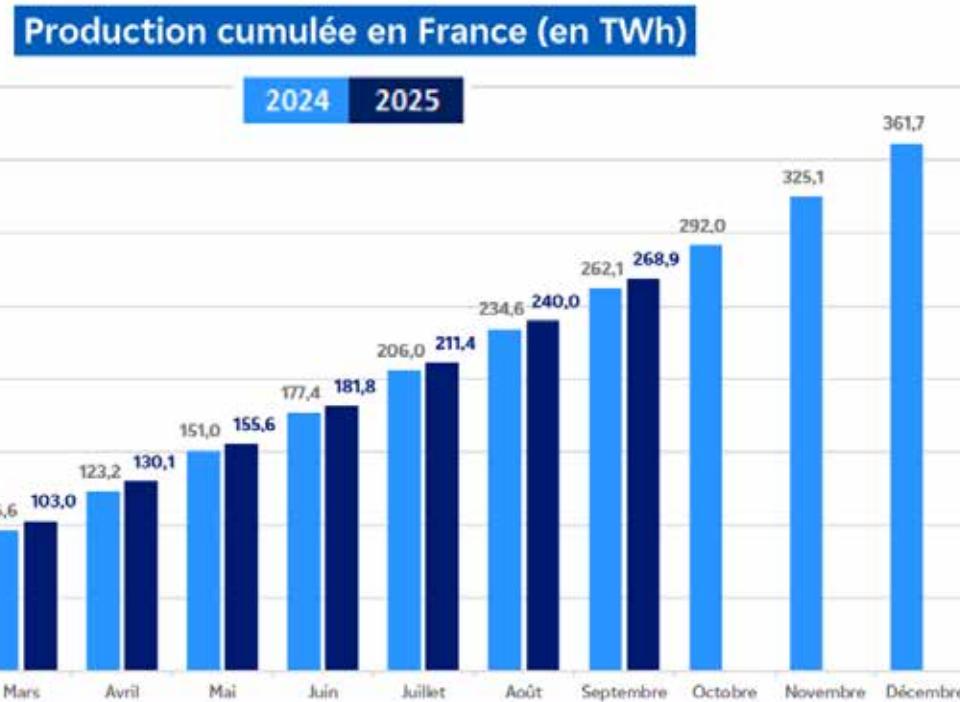


Fig. 2. Âge du parc nucléaire en France en 2024 (WNISR, d'après RTE et EDF).

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

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

*Conseil de Politique Nucléaire



Réacteurs nucléaires

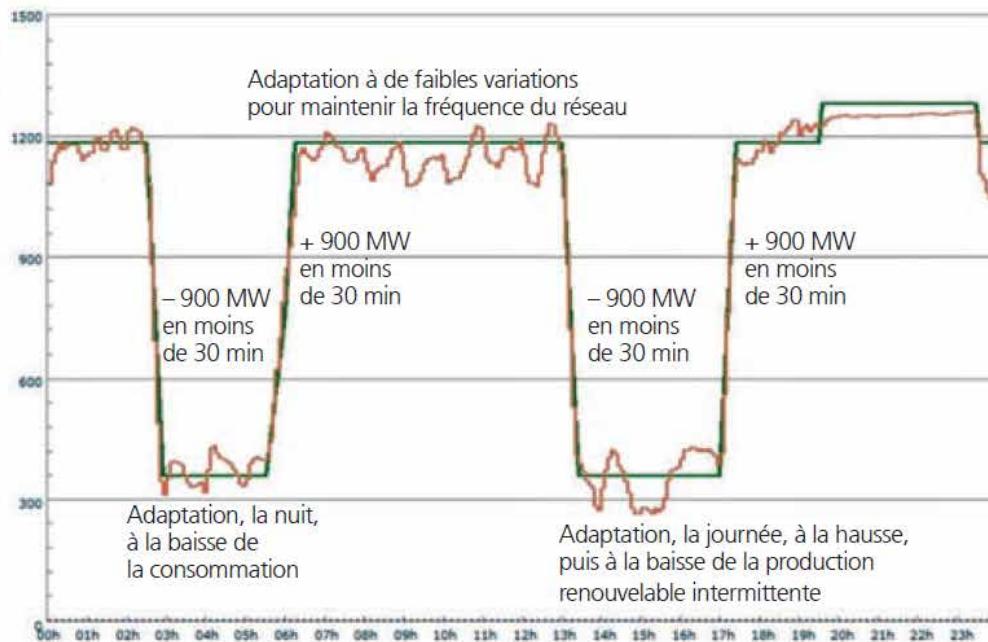
- ü Énergie de stock bas carbone*
- ü Pilotables (dans une certaine limite et sur toutes les échelles de temps)
- ü Stabilisent la fréquence du réseau (inertie mécanique des turbines)
- ü Contribuent à réguler la tension

* 1 kg U = 160 tonnes de charbon

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

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

PIUSSANCE PRODUITE PAR UN DES RÉACTEURS (1300 MW) DE LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE GOLFECH SUR UNE PÉRIODE DE VINGT-QUATRE HEURES, UN JOUR DE SEPTEMBRE 2015, EN RÉPONSE AUX VARIATIONS DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ ET DE LA PRODUCTION D'ORIGINE RENOUVELABLE INTERMITTENTE.



Réacteurs nucléaires

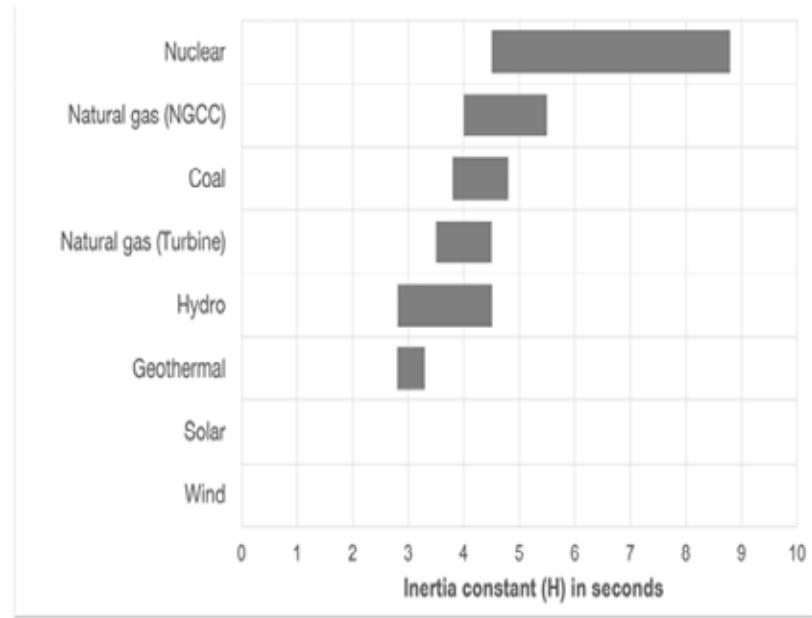
- ü Énergie de stock bas carbone
- ü Pilotables (dans une certaine limite et sur toutes les échelles de temps)*
- ü Stabilisent la fréquence du réseau (inertie mécanique des turbines)
- ü Contribuent à réguler la tension

*variations de 90% de la puissance jusqu'à 2 fois par jour.
(arrêt complet > redémarrage plus complexe et plus long)

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

- Ø 56 réacteurs et démarrage de l'EPR de Flamanville
- Ø 361,7 TWh en 2024; 370 en 2025 (EDF)
- Ø 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

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

* 1 kg U = 160 tonnes de charbon

Le faible facteur de charge du nucléaire français

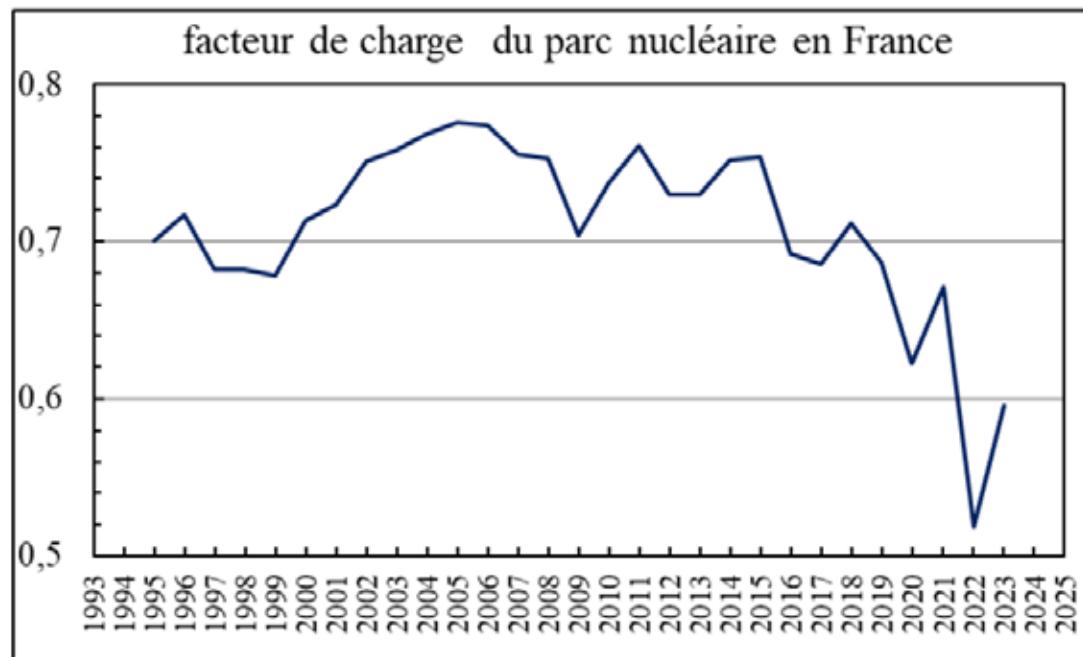
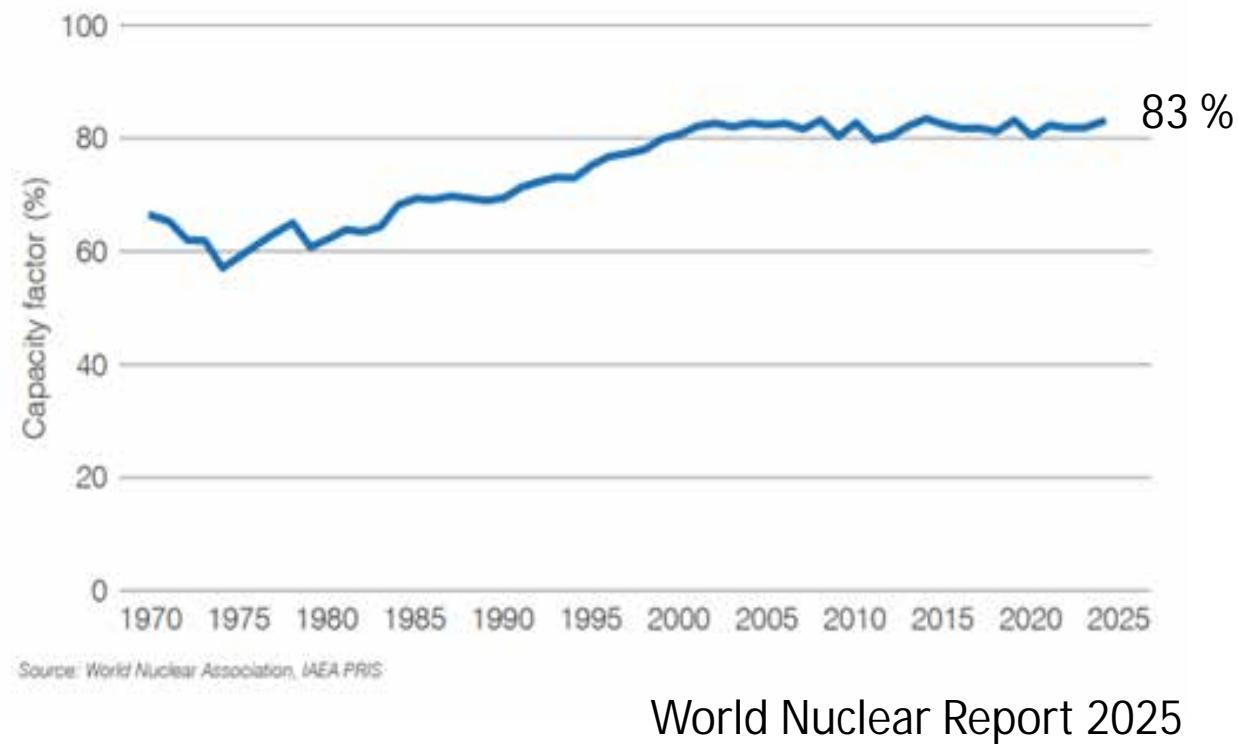


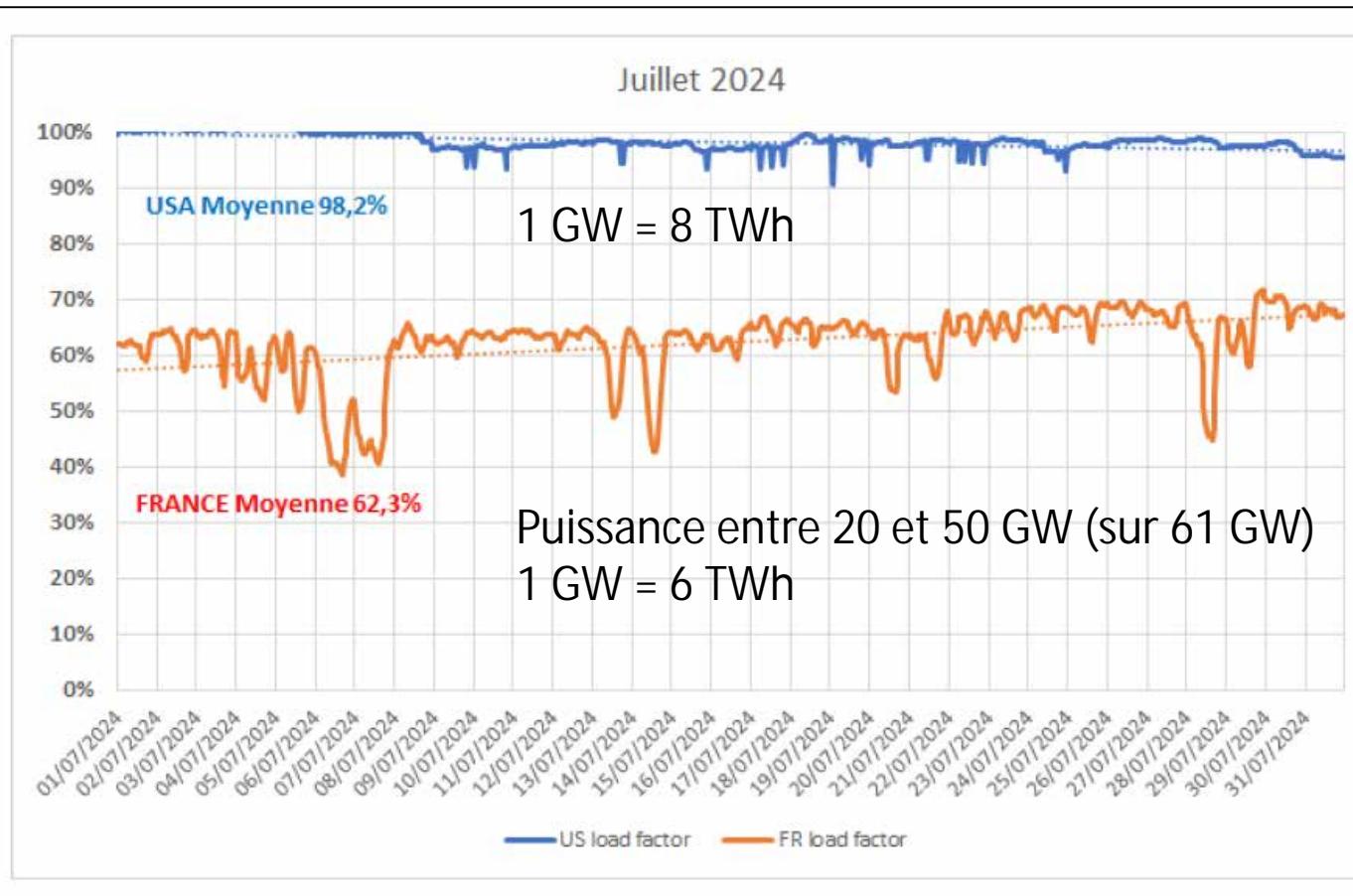
Fig. 1. Évolution du facteur de charge moyen annuel du parc nucléaire en France (d'après RTE).

Figure 8. Global average capacity factor



World Nuclear Report 2025

Le faible facteur de charge du nucléaire français



En 2023 on est 31^{ième} sur 33 (il manque l'Ukraine)
le dernier est l'Afrique du Sud qui n'a que 2 réacteurs

Arrêts/diminution de puissance

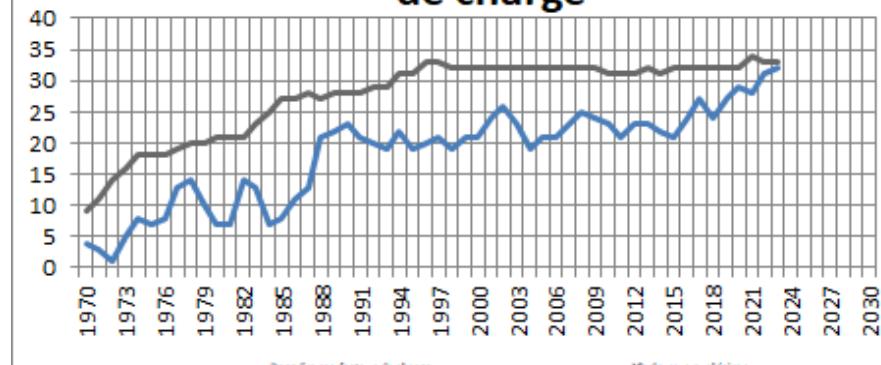
- Rechargement du combustible
- Maintenance et remplacement des composants (générateurs de vapeur,...)
- Grand carénage- examens décennaux
- Exigences croissantes sur la sûreté (ASN)
- **Modulation (suivi de charge)**

B. Fontana (audition au parlement 30 avril 2025)

« poursuivre le rétablissement de la production nucléaire à des niveaux cohérents avec les meilleurs standards internationaux »

FC= 85% > production: 450 TWh (360 TWh en 2024)

Rang de la France en terme de facteur de charge



— 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)

* L'ASN a donné son feu vert à la prolongation de 10 ans des 20 réacteurs de 1300 MW (juillet 2025) Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection



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

iea

The Path to a New Era
for Nuclear Energy



440 réacteurs

- Ø Prévisions 2025: 2900 TWh (2024:2700)-9 % du mix
- Ø 2è des énergies bas-carbone (après hydro)
- Ø 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)
- Ø **Italie**: loi de relance du nucléaire (02 10 2025)
- Ø **Belgique**: abrogation la loi du 31 01 2003 sur « la sortie de l'énergie nucléaire » (15 05 2025)
- Ø **Japon**: loi de décarbonation de l'électricité (juin 2025)
Réacteurs >60 ans; 2040: nucléaire 20% du mix (2025: 10%)
- Ø 63 réacteurs en construction (75 GW) (½ Chine)
- Ø 10 nouveaux réacteurs approuvés en Chine (27 04 2025)



Marc FONTECAVE

CHAIRE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

La transition énergétique :
aujourd'hui et demain (III)

5 nov. > 17 déc. 2025