

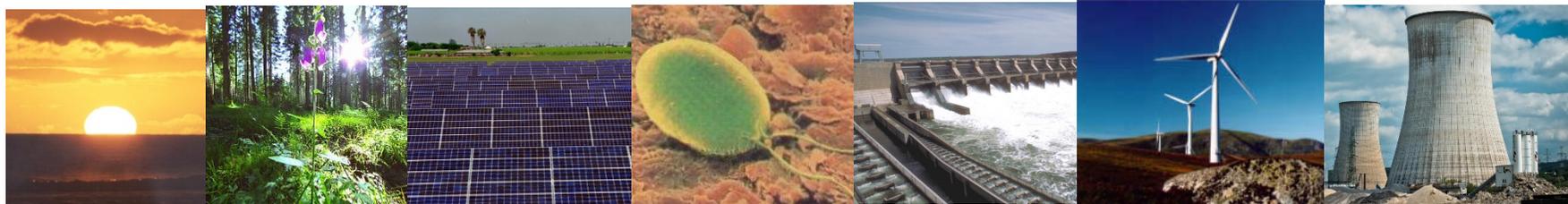


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Le défi et les contraintes de la transition énergétique:

Marc FONTECAVE

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





✓ La **transition énergétique** est engagée, même en France (Etats, entreprises, individus)

✓ Une partie de la solution est dans la **connaissance**, la **recherche**, la **technologie** et l' **innovation** pour:

- Défossiliser (décarboner)*
- électrifier avec des énergies bas-carbone*
- améliorer l'efficacité énergétique/économies d'énergie*
- respecter l'environnement (récupération/recyclage)*

CROISSANCE VERTE vs DECROISSANCE

✓ Il faudra du **temps** pour remplacer les fossiles par les énergies bas-carbone, en raison de contraintes physiques, économiques, sociales,...

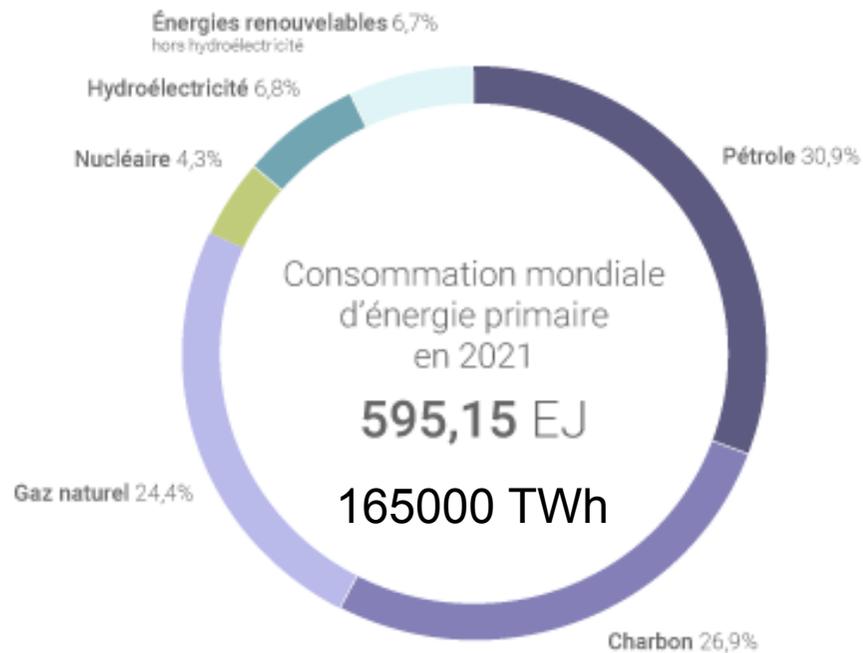
✓ La **catastrophe** ? Imminente ?

✓ Afficher des objectifs irréalistes et inatteignables est une **erreur politique**

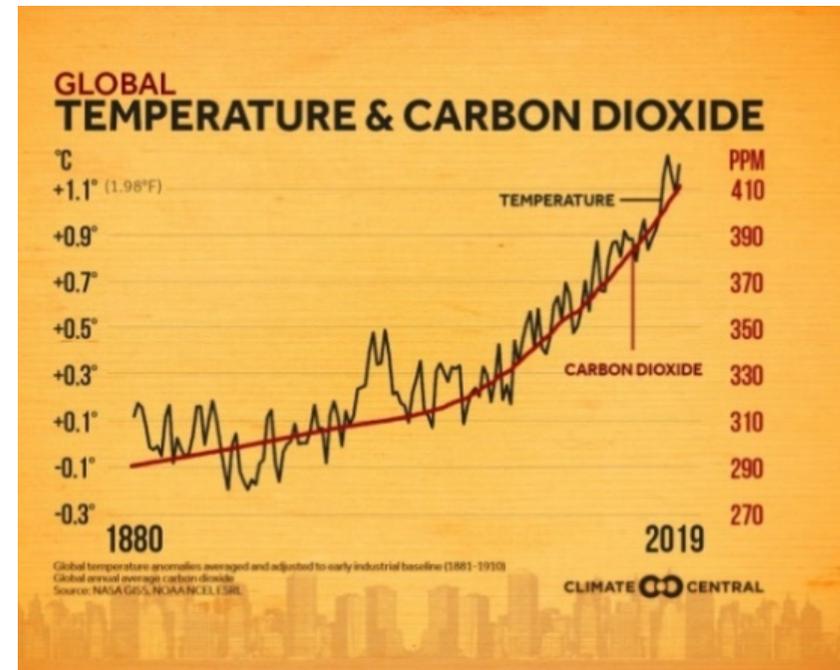
✓ **Adaptation** à des $T > 2-3^{\circ}\text{C}$! (GIEC février 2022)

La transition énergétique: Les bonnes questions

FOSSILES > CO2 > Température

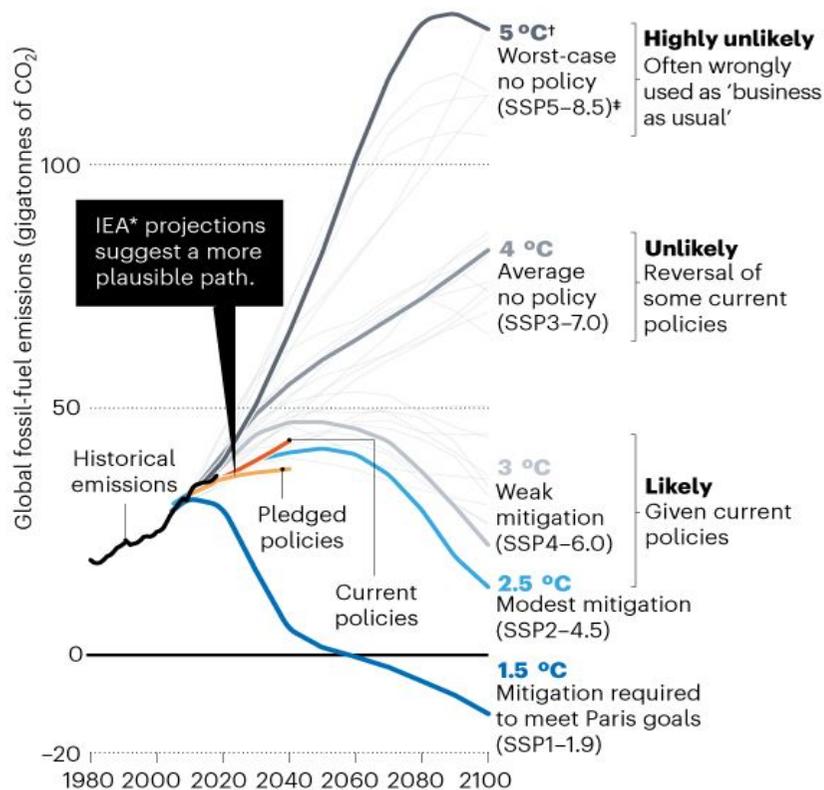


80 % de cette énergie vient des ressources fossiles



Net Zero et + 1,5°C en 2050: 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,..)

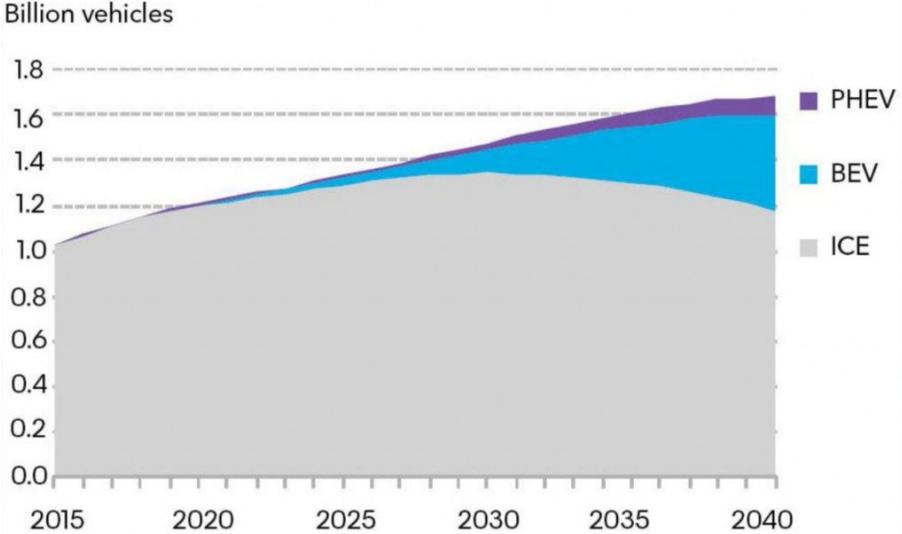
Net Zero et + 1,5°C en 2050: vraiment ?

- 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 et + 1,5°C en 2050: vraiment ?

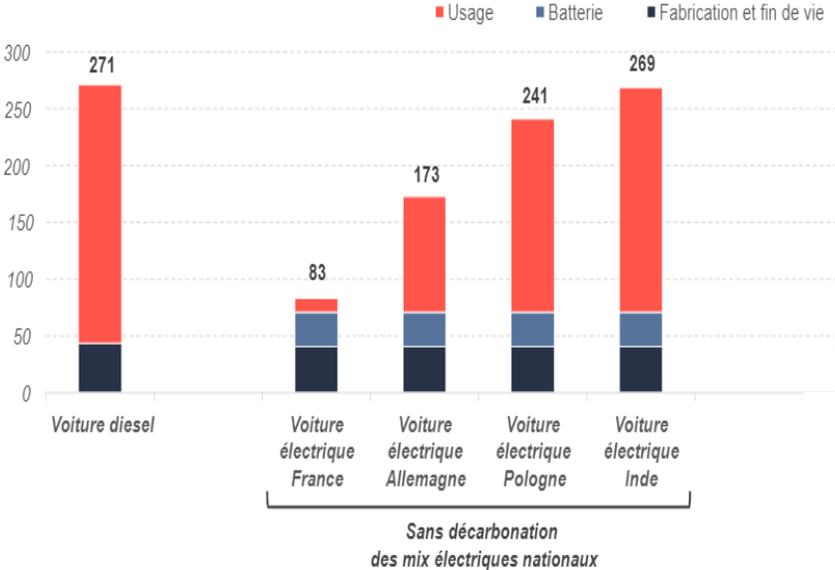
- **2040: le véhicule? thermique!**

Global long-term passenger vehicle fleet by drivetrain



Source: BloombergNEF

- **Le véhicule électrique: zéro C?**



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

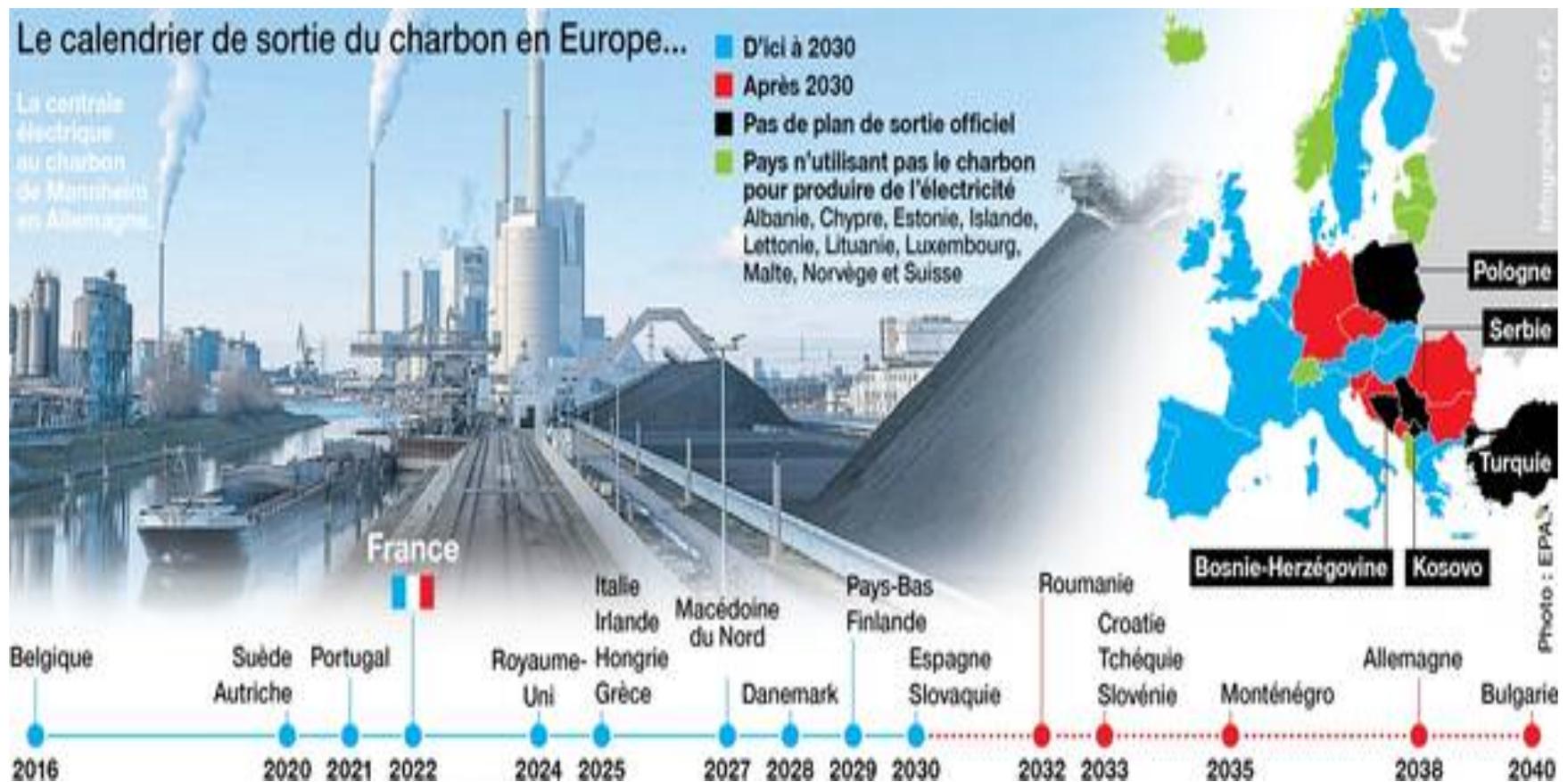
Paris - Malgré les dommages causés au climat, la planète compte encore des projets de construction ou d'extension de centrales électriques au charbon dans 34 pays différents, surtout en Chine, L'Express avril 2022 rapport annuel du Global Energy Monitor

Climat : 600 projets de centrales à charbon en Asie

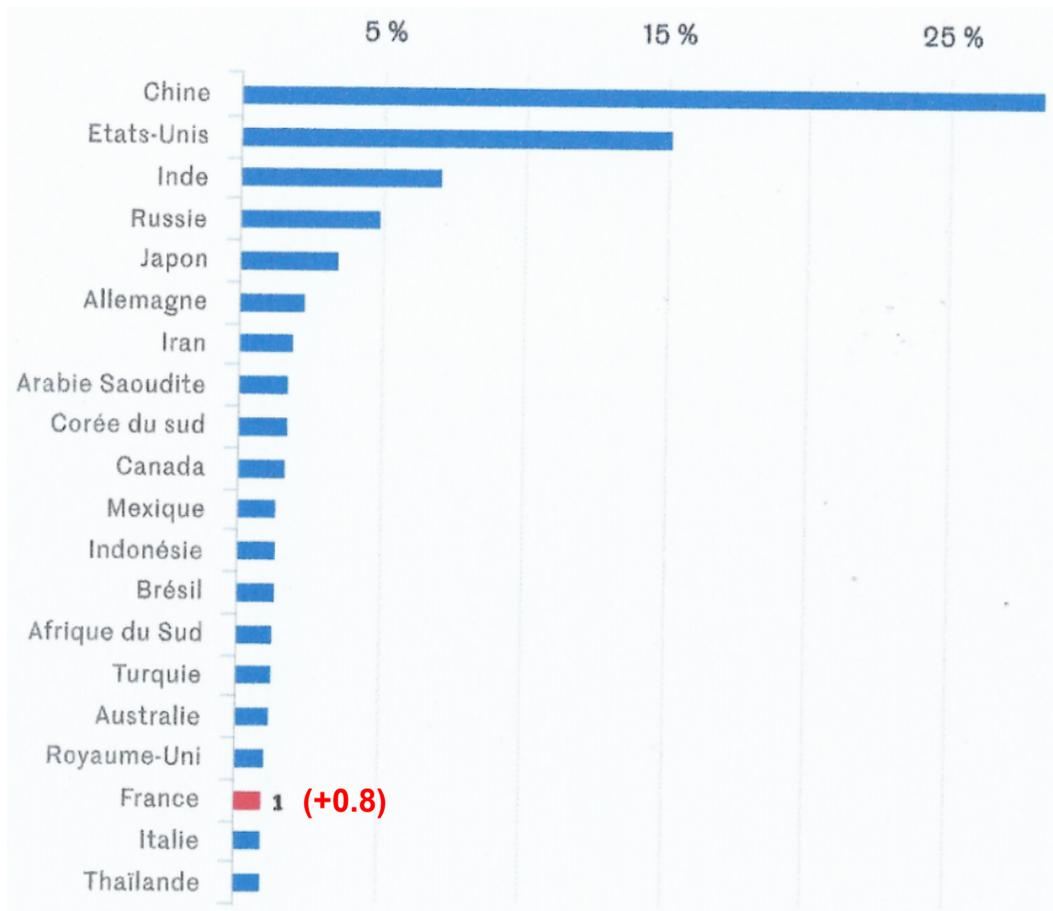
La Chine, l'Inde, l'Indonésie, le Japon et le Vietnam ont au total plus de 600 nouvelles centrales à charbon en pro
France Info/AFP juin 2021

Emissions de CO₂ : un problème global

Ex: la sortie du charbon



Emissions de CO₂ : un problème global



France: désindustrialisation !



■ Émissions associées aux importations (hors importations ré-exportées) en millions de tonnes de CO₂ éq
 ■ Émissions intérieures (ménages et activités économiques intérieures hors exportations) en millions de tonnes de CO₂ éq
 ● Émissions moyennes annuelles par habitant en tonnes de CO₂ éq

(e) : estimation.

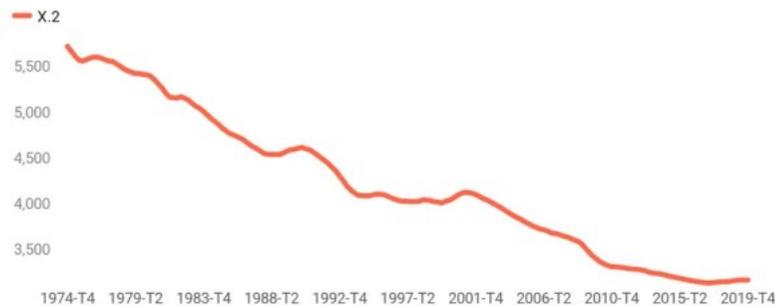
Note : l'empreinte carbone porte sur les trois principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O). Données non corrigées des variations climatiques.

Champ : France + Drom (périmètre Kyoto).

Sources : Citepa ; AIE ; FAO ; Douanes ; Eurostat ; Insee. Traitement : SDES, 2019

2 millions 500 000 emplois industriels en moins depuis 1974...

...du fait des gains de productivité, l'externalisation vers les services, la concurrence étrangère accrue, et les délocalisations



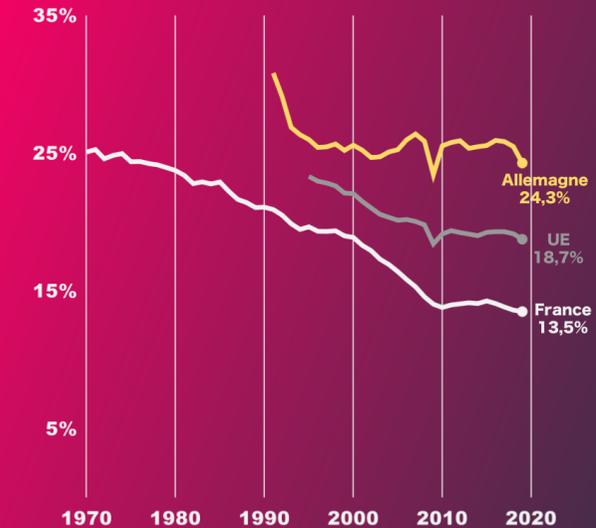
Il y avait 5,720 millions emplois industriels en 1974, 3,167 millions fin 2019

Chart: Marie Viennot • Source: Insee • Created with Datawrapper



La lente érosion de l'industrie française

Evolution de la part de l'industrie dans la valeur ajoutée totale du pays (en %)



Source : OCDE

©Devizu.news

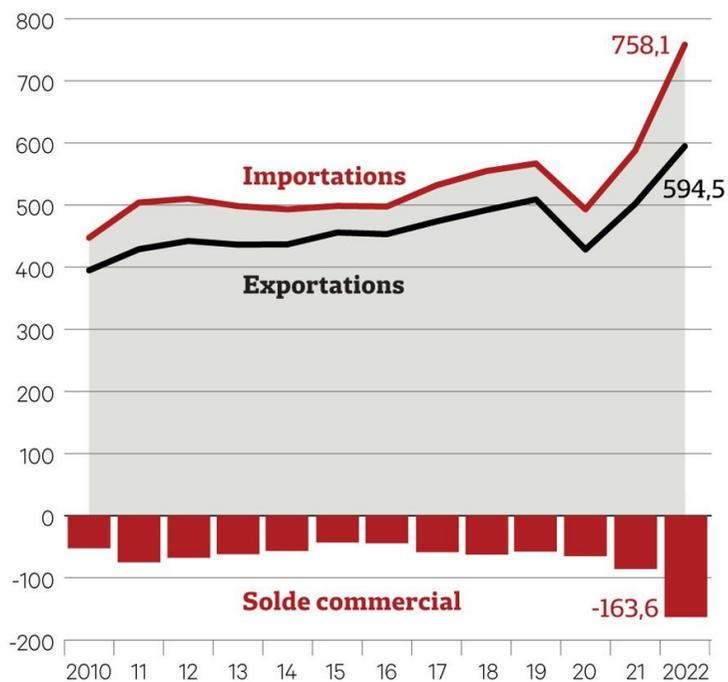
- perte de 50% des usines
- Perte de 45 % des emplois industriels depuis 1970

France: se débarrasser des fossiles.. Pourquoi ?

- Émissions de CO2
- dépendance extérieure
- facture énergétique (40-60 milliards d'euros)

Un déficit historique du commerce extérieur pour la France en 2022

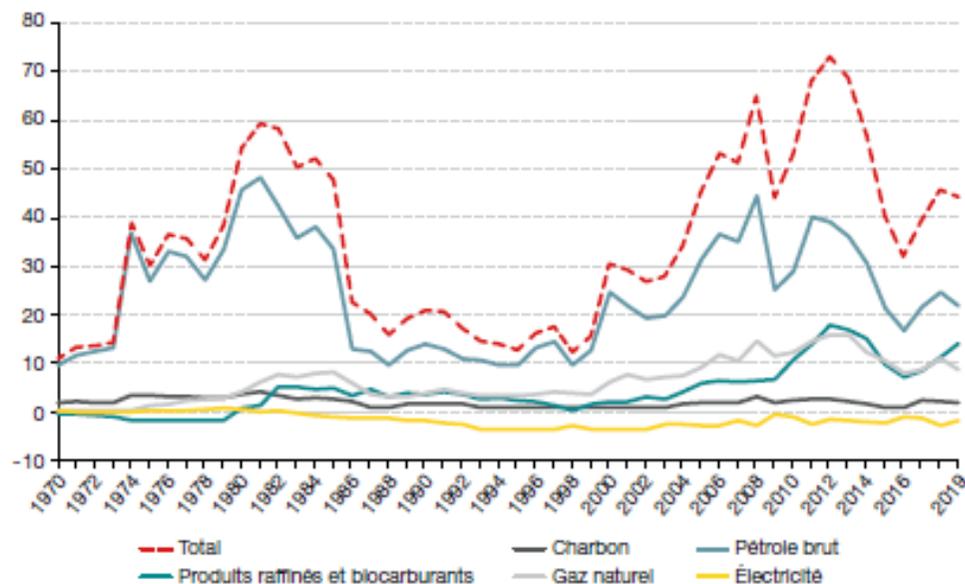
En milliards d'euros



SOURCE : DOUANES

FACTURE ÉNERGÉTIQUE PAR TYPE D'ÉNERGIE

En milliards d'euros 2019

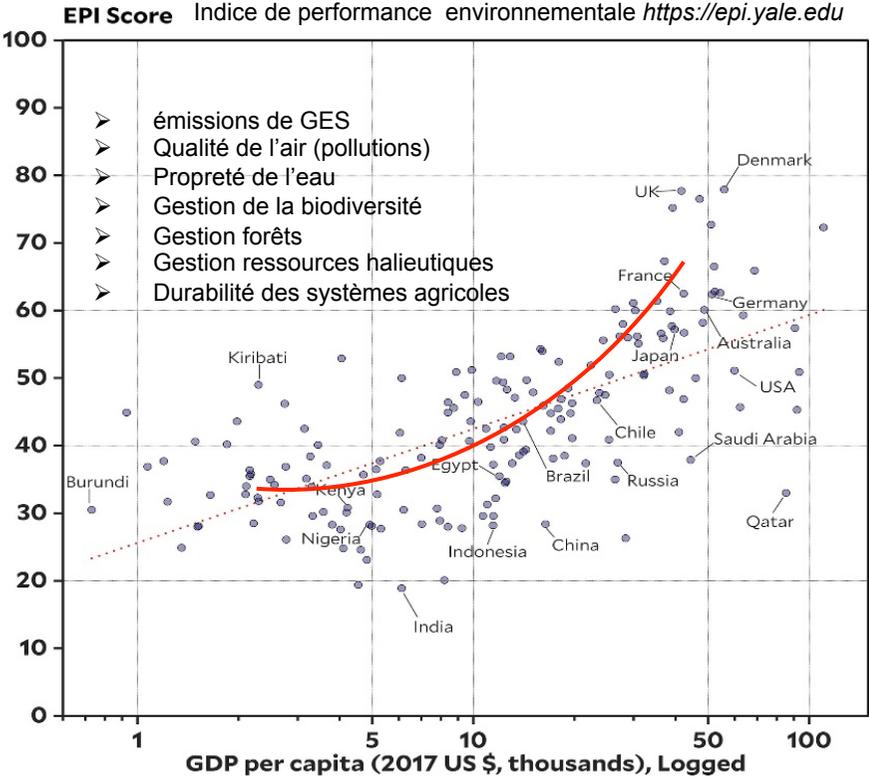


Champ : France entière (y compris DOM).

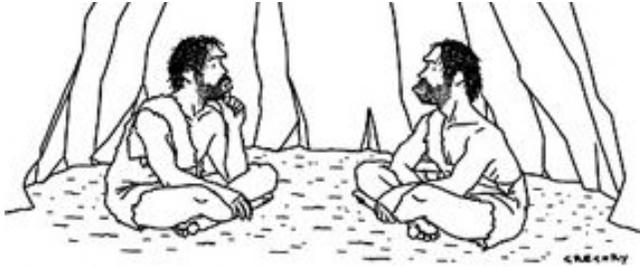
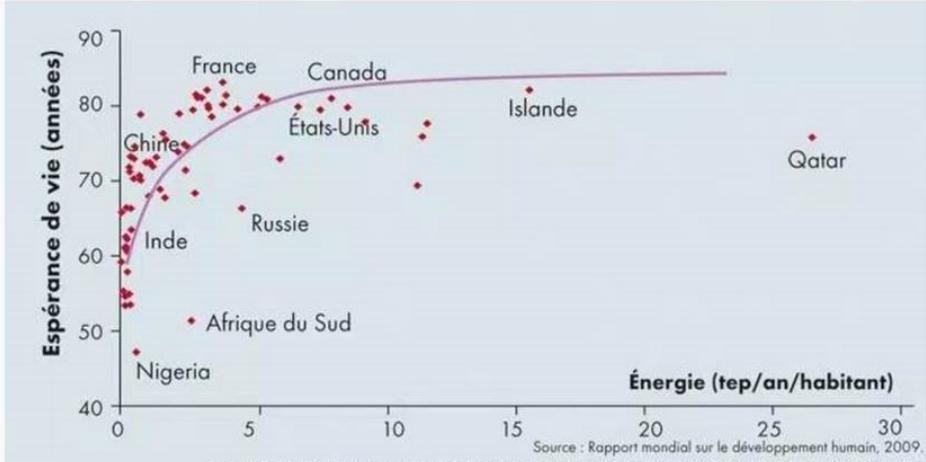
Source : SDES, Bilan énergétique de la France

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 ?

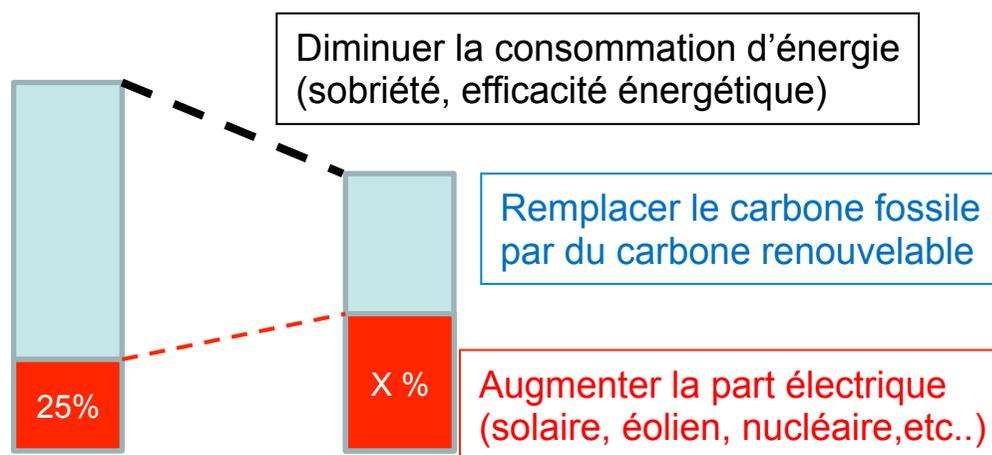


- **700 millions de personnes sans électricité**
- **4 millions de personnes par an meurent** de maladies imputables au manque d'énergie (ex: pollutions dues à la combustion de combustibles solides en foyers ouverts pour la cuisine) source: OMS
- **1.6 milliards de personnes** n'ont pas accès à l'eau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

**La transition énergétique:
Perspectives
(le cas de la France)
1. Les scénarios**

La transition énergétique France: scénarios ?

- **Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?**
- Sobriété (échelle collective et individuelle)
- Efficacité énergétique (chauffage, industrie, transports,..)
- **Dé fossiliser 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 ?

- **Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?**
- Sobriété (échelle collective et individuelle)
- Efficacité énergétique (chauffage, industrie, transports,..)
- **Défoissiliser 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,..)

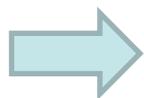
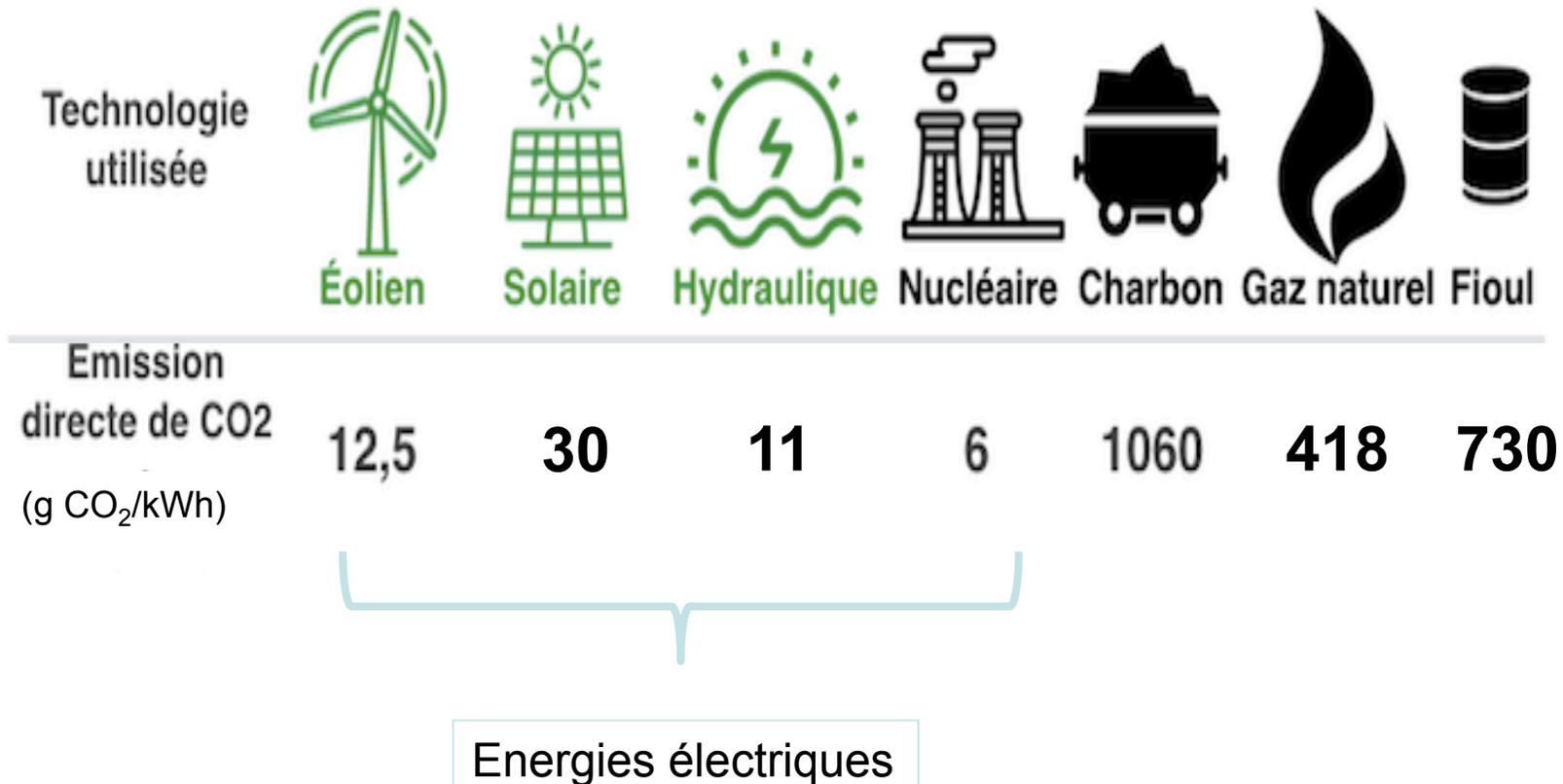
❖ AU PLUS **BAS COUT**

❖ 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

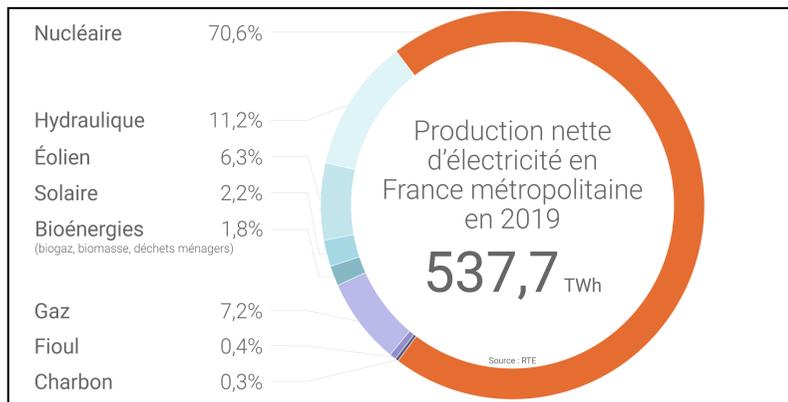
Etat 2019	Energie TWh	Pourcent
Production d'électricité	535	100%
Nucléaire	379	70,8%
Eolien	34	6,3%
Solaire	12	2,3%
Hydraulique	60	11,1%
Biomasse	10	1,8%
Gaz	37	6,9%
Charbon/pétrole	4	0,7%

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



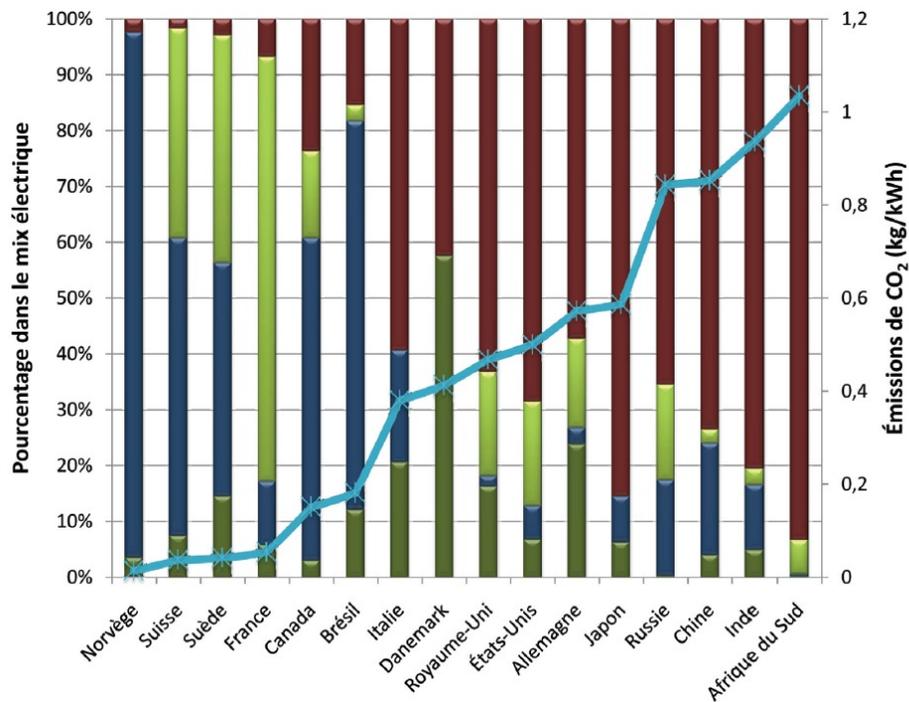
France: Energie
60 % fossiles
(charbon < gaz < pétrole)

Rem: éolien + solaire < exportations

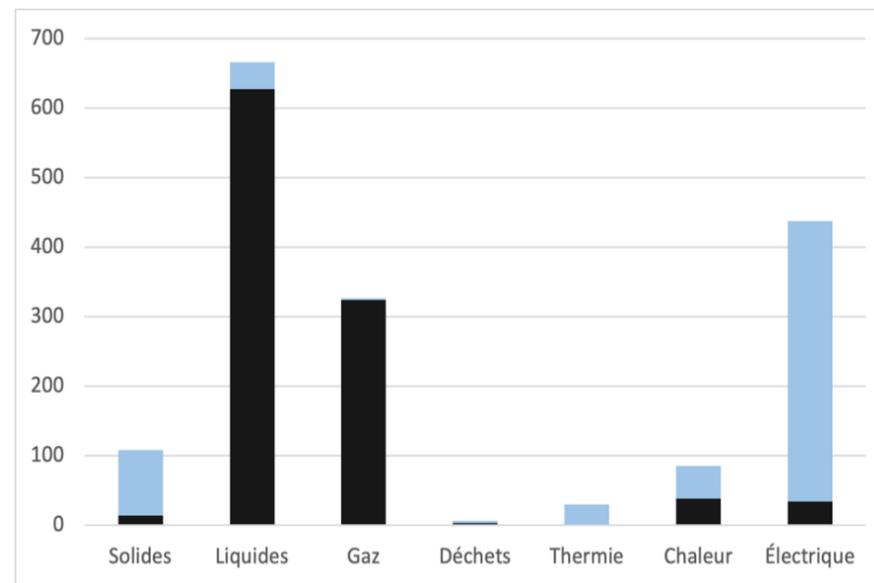
Energie France: la partie thermique

Le problème n'est pas l'électricité !

Mix électrique et émissions de CO2



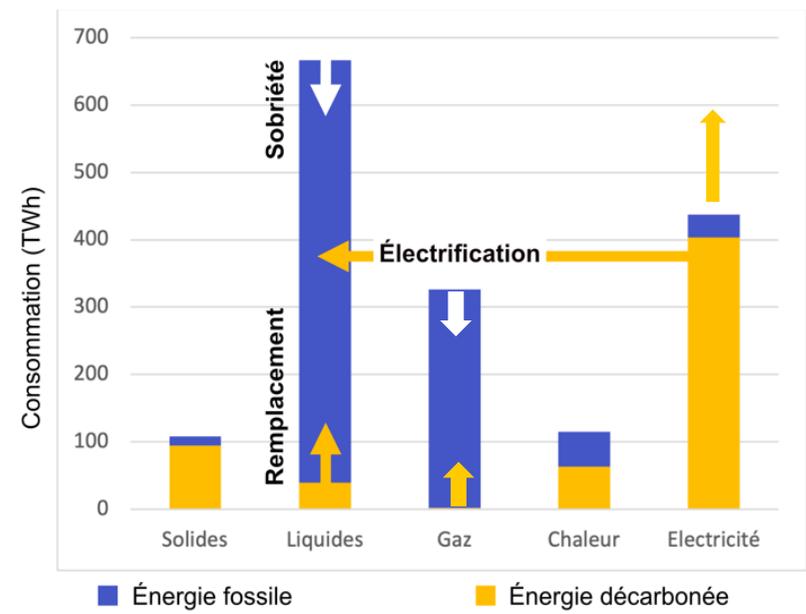
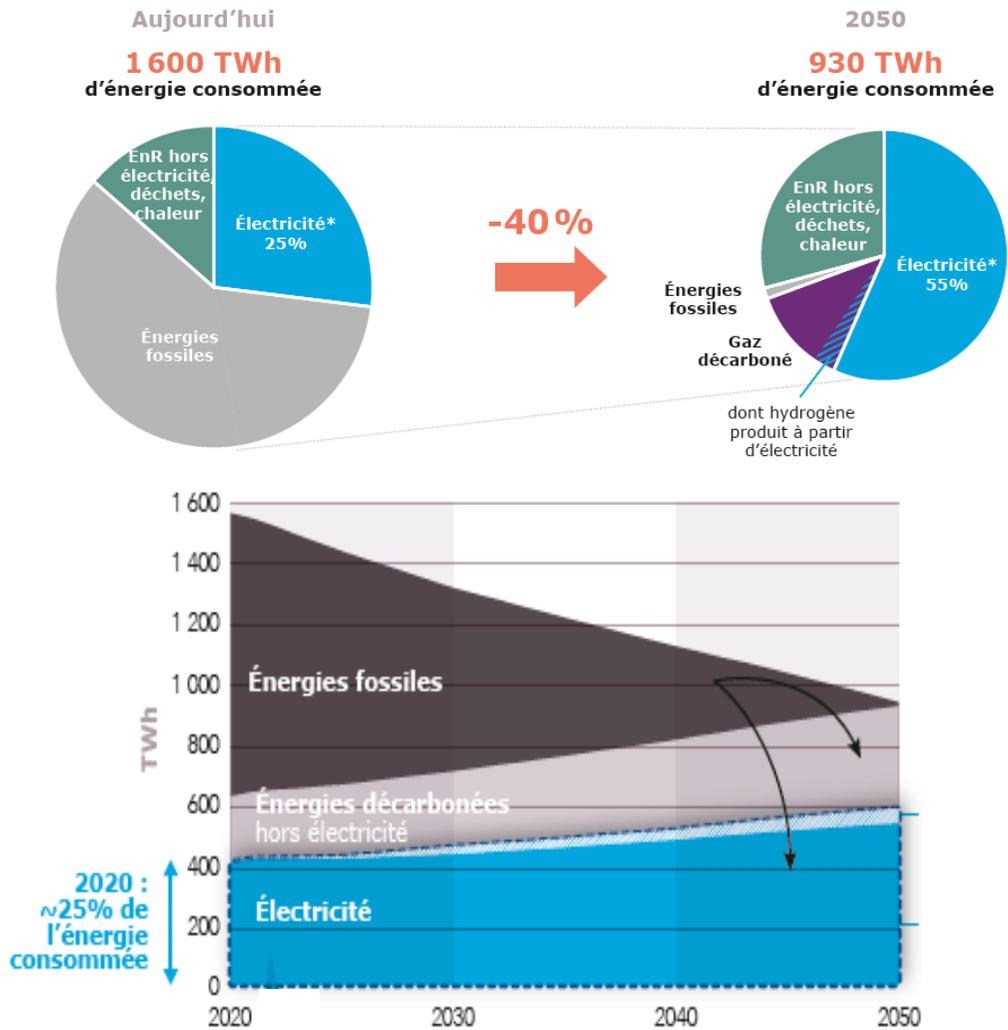
France



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

Energie France: la partie thermique

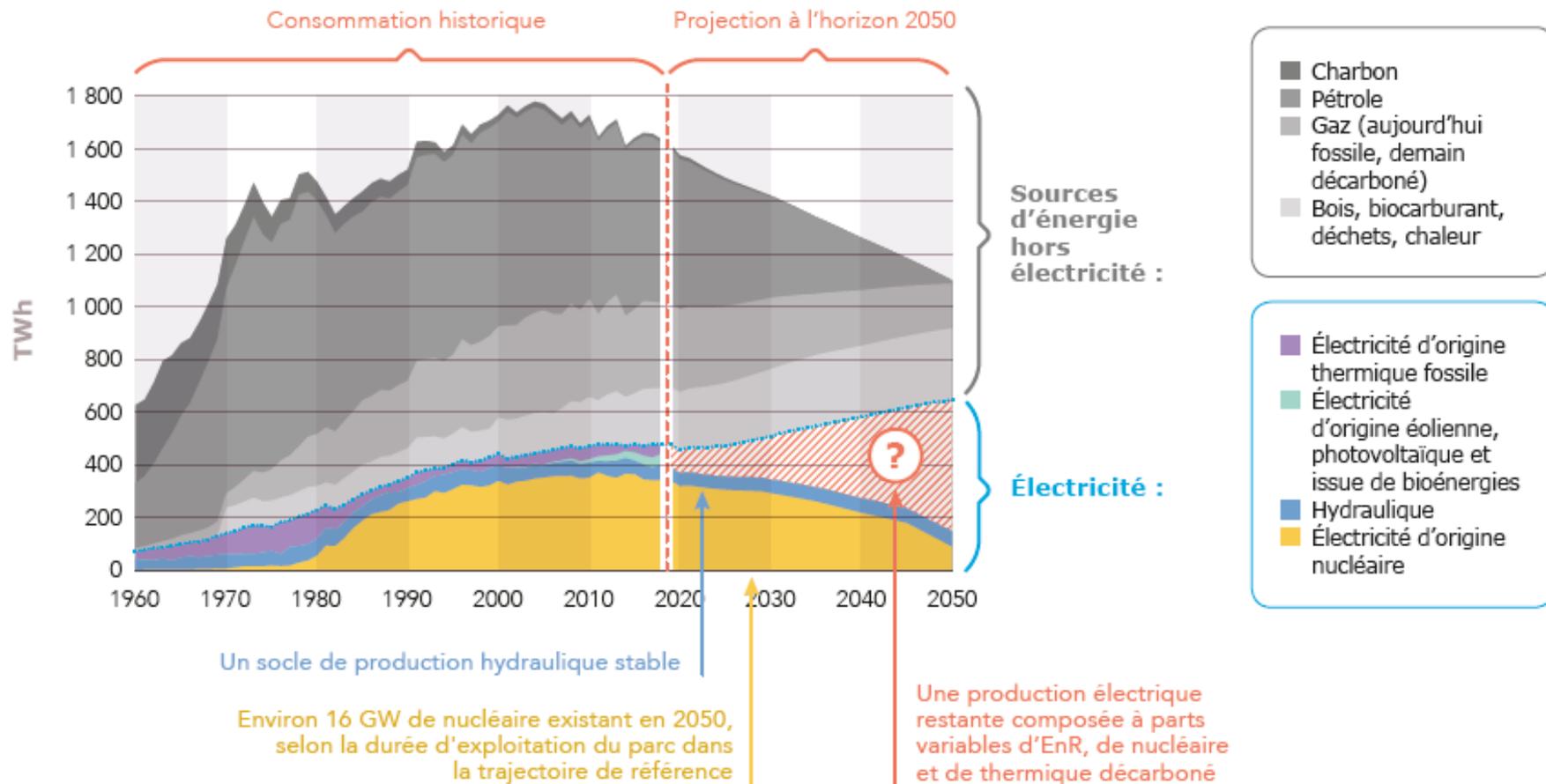
Le problème n'est pas de défossiliser l'électricité mais d'augmenter sa part!



SNBC: Stratégie Nationale Bas Carbone
Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV)

Scénarios France 2050

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



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

La transition énergétique:

Perspectives

(le cas de la France)

2. Le mix électrique

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)

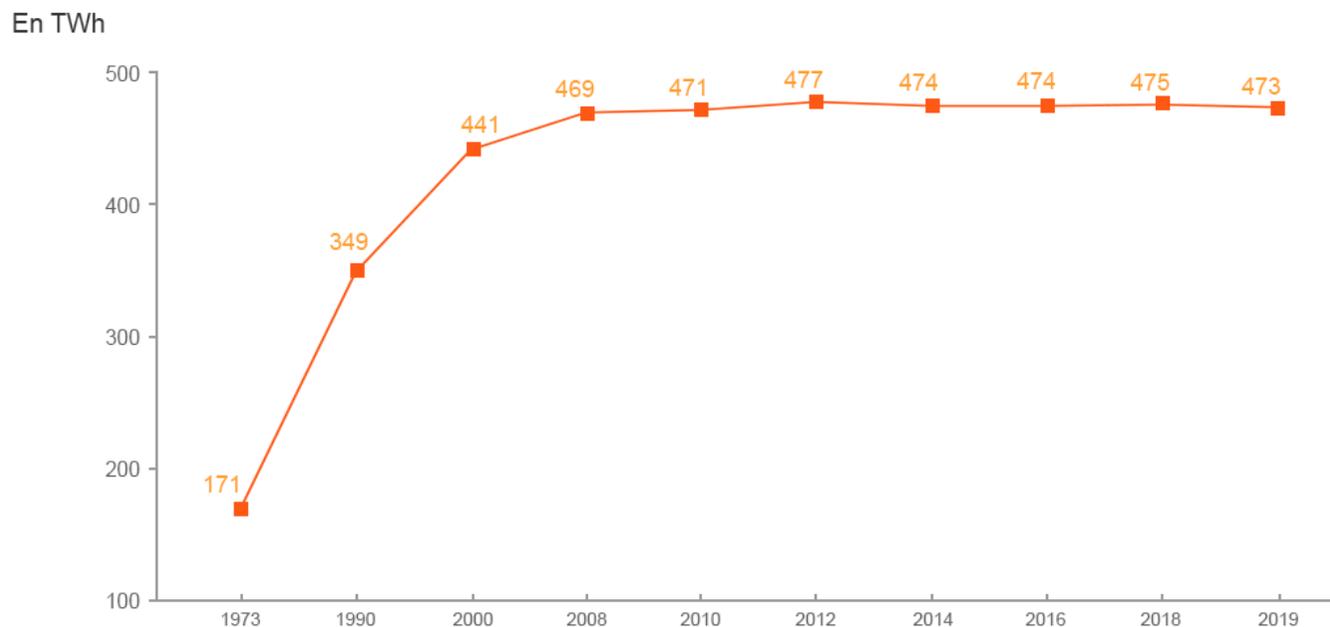
-Réduire la part du nucléaire dans le mix électrique à 50 % (2025)

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)

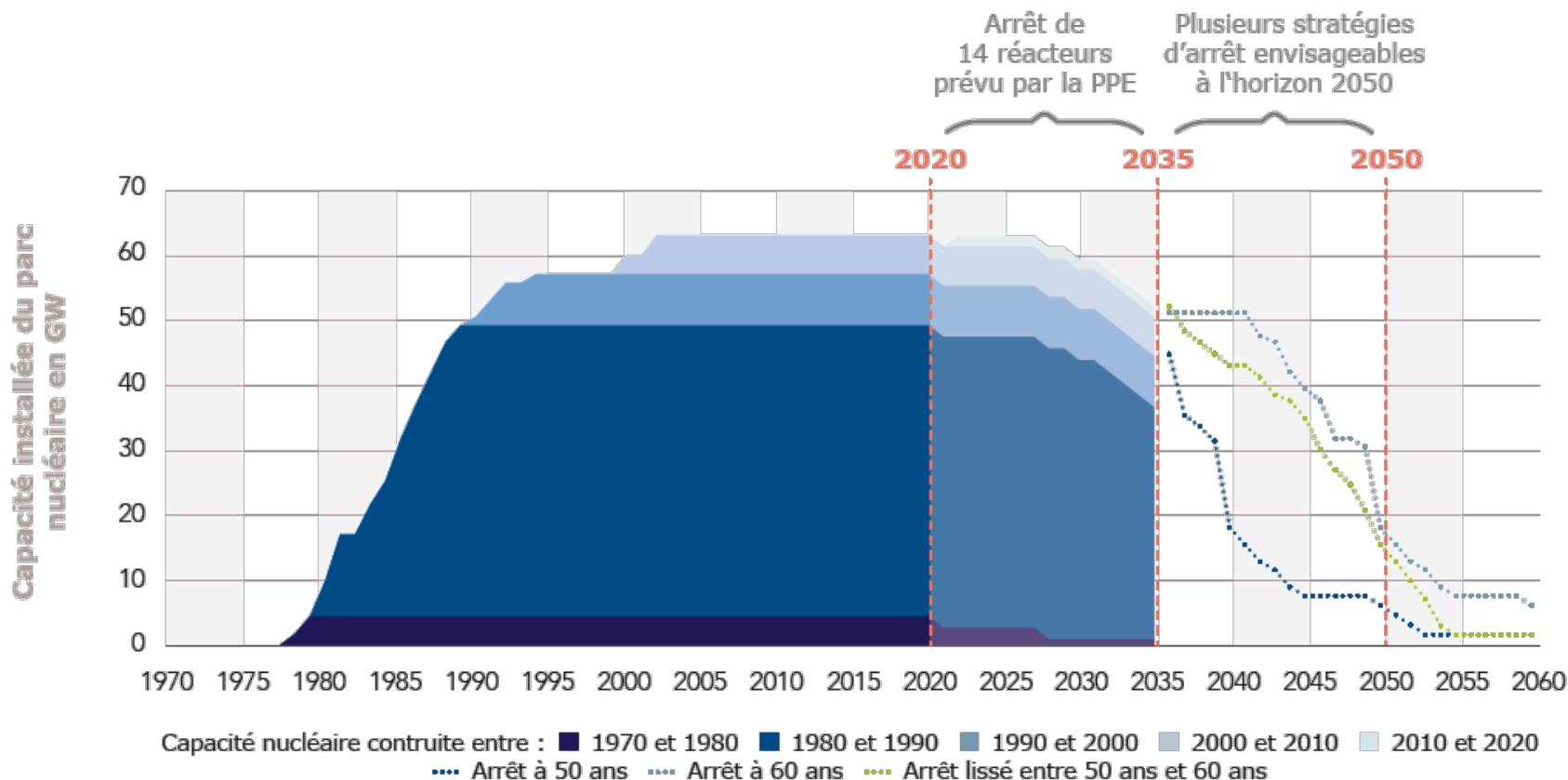
Source RTE - Bilan électrique 2019

© 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)

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 ?

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 se 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 »

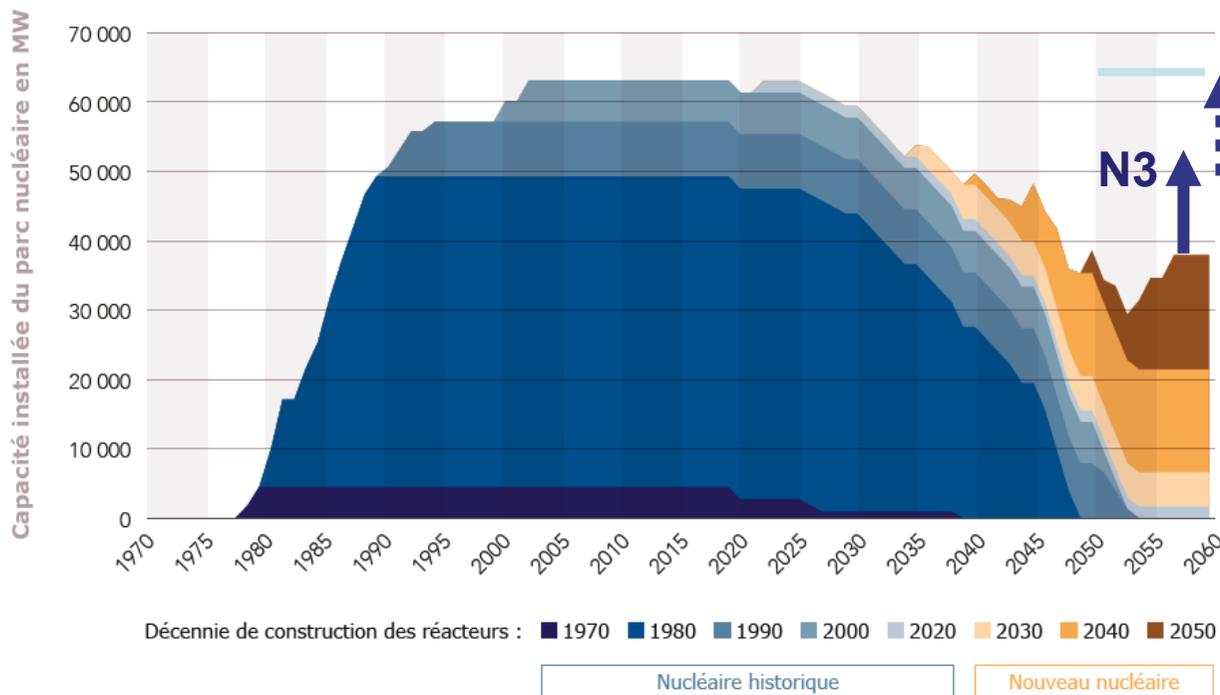
Manuel Valls, Premier ministre 2014-2016

« 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) ?

Les limites des ENRs électriques



éolien

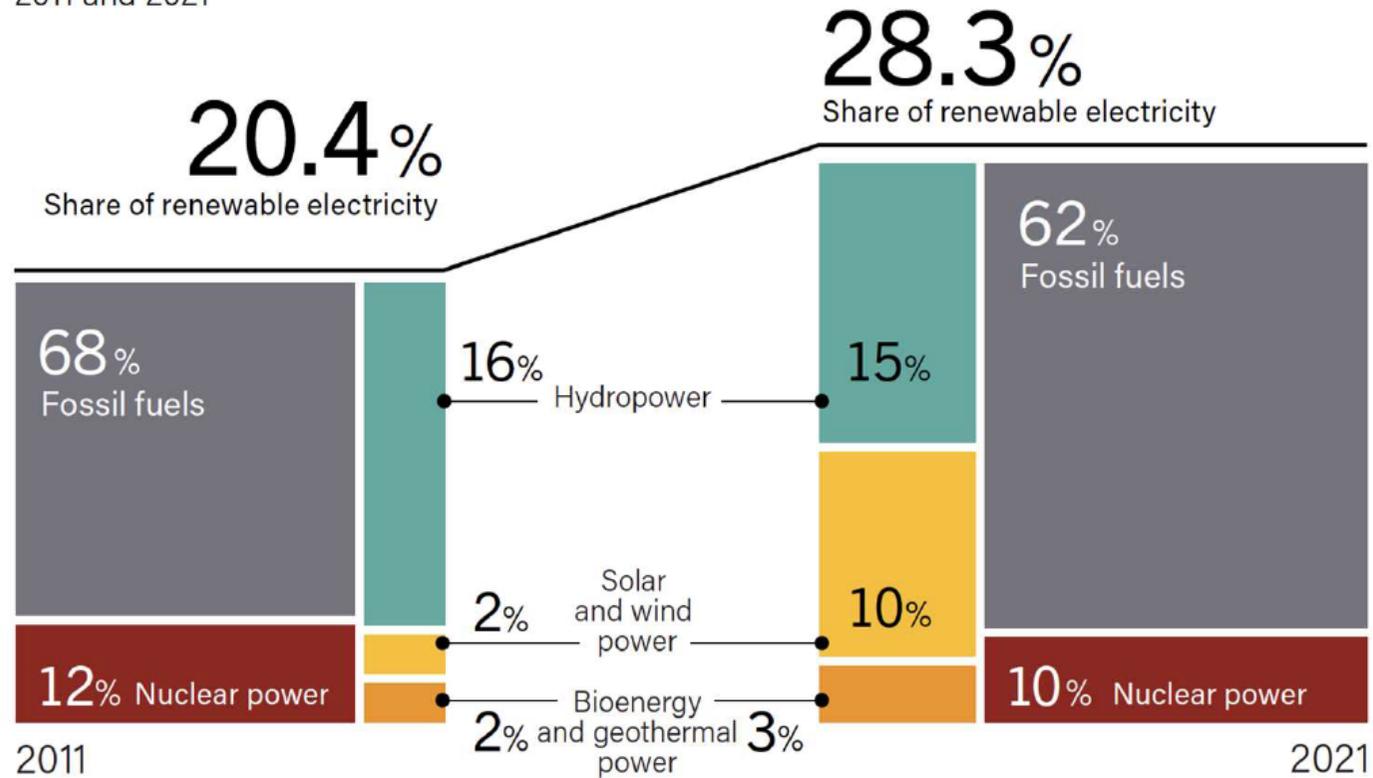


solaire

- ✓ **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 (PV : **11%**; Eolien onshore **23%**; Eolien offshore **38 %**)
- ✓ **Energies de faible densité surfacique**
 - PV 7; Eolien 4; hydro 3; Nucléaire 0.07 (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'ENRs dans production électrique globale

Share of Renewable Energy in Electricity Generation,
2011 and 2021



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

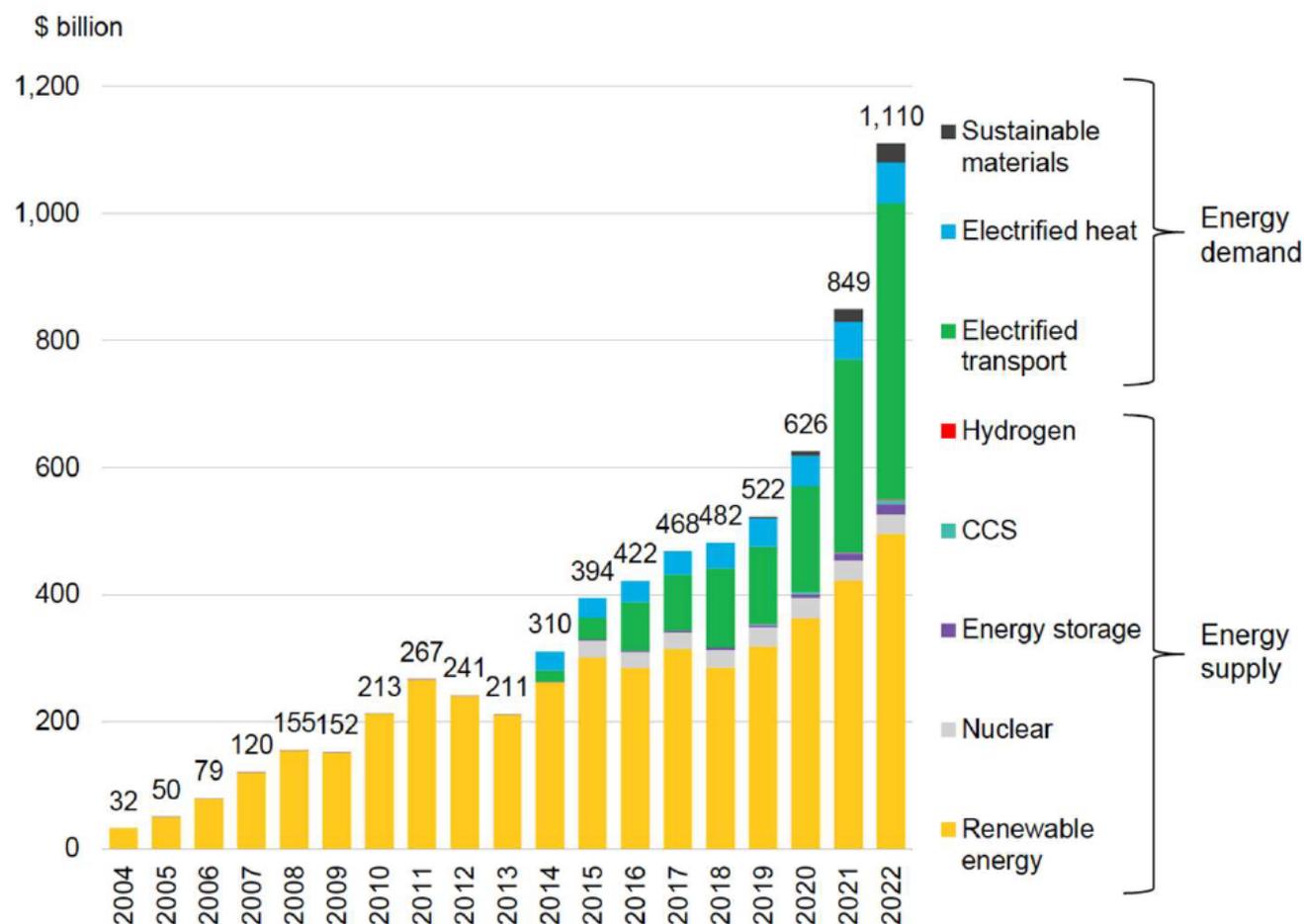


Figure 3: Global investment in energy transition technologies, 2004-2022
Source (BNEF 2023)

Les limites des ENRs électriques

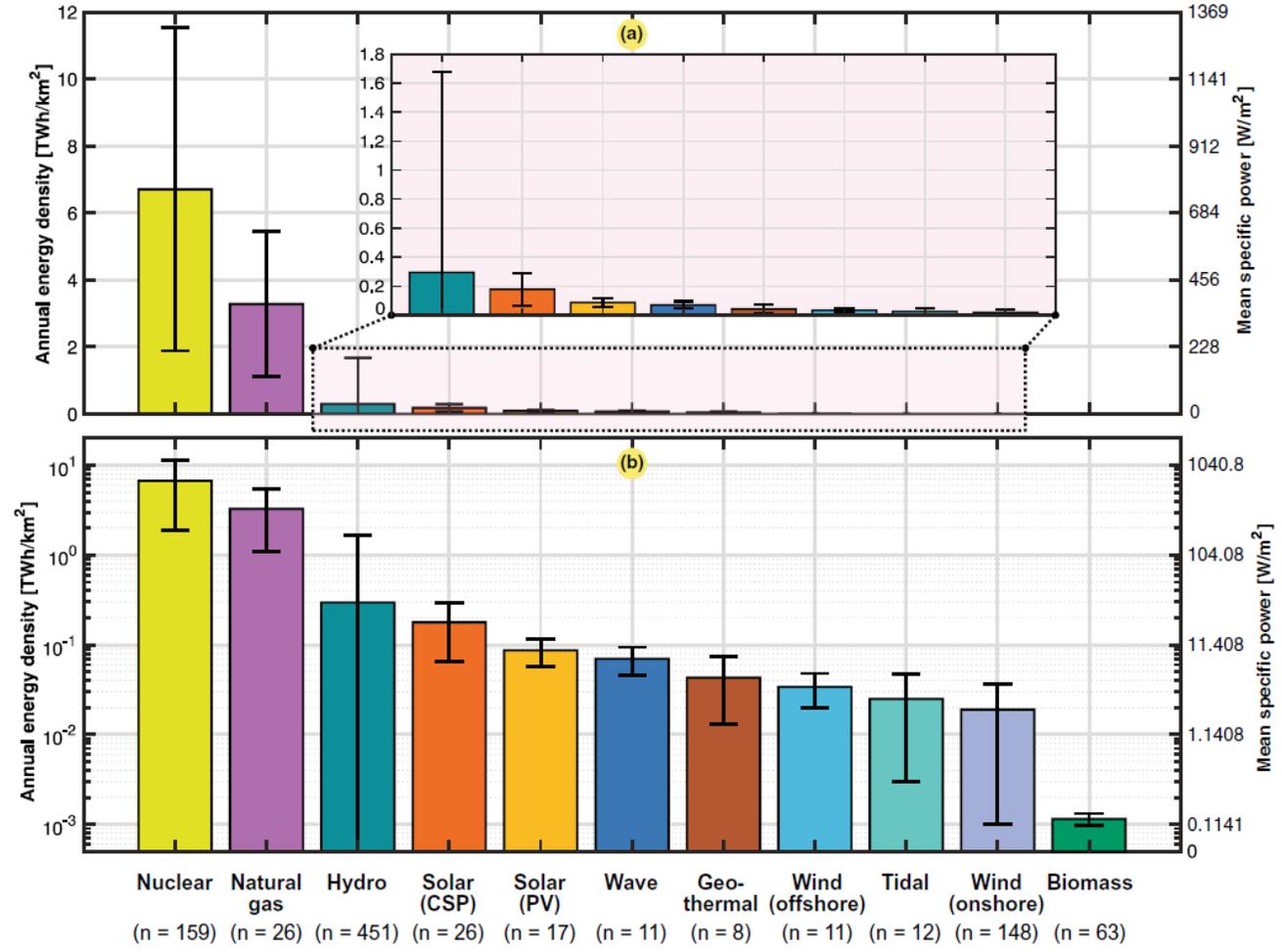


Figure 14. Overall result of the average values and standard deviations of the annual energy density (e_g) or mean specific power (p_g) for the different energy sources considered based on the output data provided in Table 16 (rooftop solar PV technology is excluded). (a) Linear scale. (b) Logarithmic scale. The biomass numbers are based on the meta-analysis of van Zalk and Behrens³.

Les limites des ENRs électriques



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

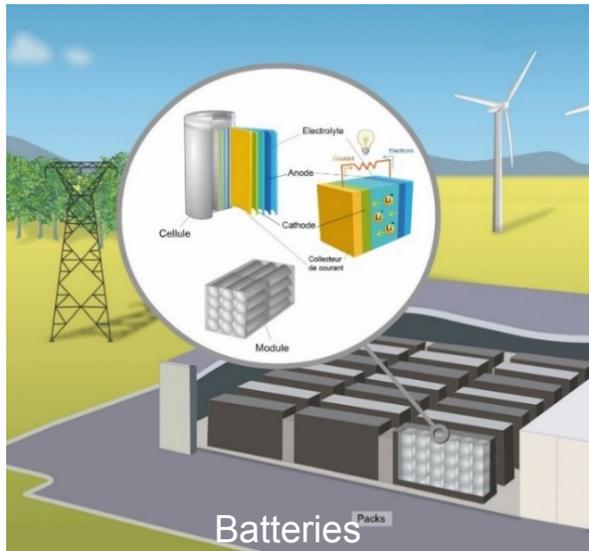
Rapport RTE/AIE 2021

- ✓ Disposer de **capacités de puissance décarbonées pilotables** (Hydroélectricité; Gaz décarboné (biomasse;H2); Demande ?; Echanges ?)
- ✓ Développer massivement le **stockage d'énergie** (150 TWh par an !*) (batteries, hydrogène, hydro...)
- ✓ Développer/renforcer les **infrastructures de réseaux électriques**

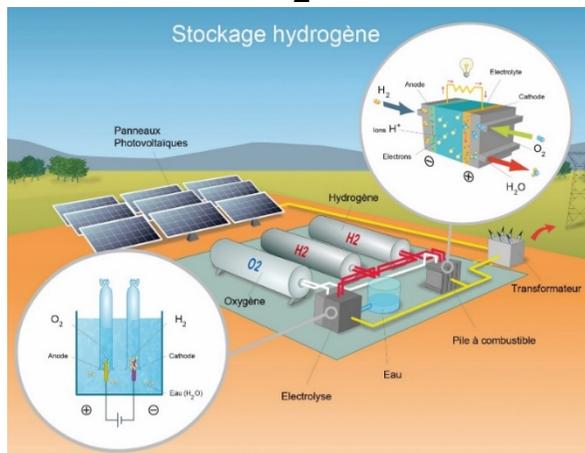
* Fontecave, Grand CRAS 2021

Moyens de stockage

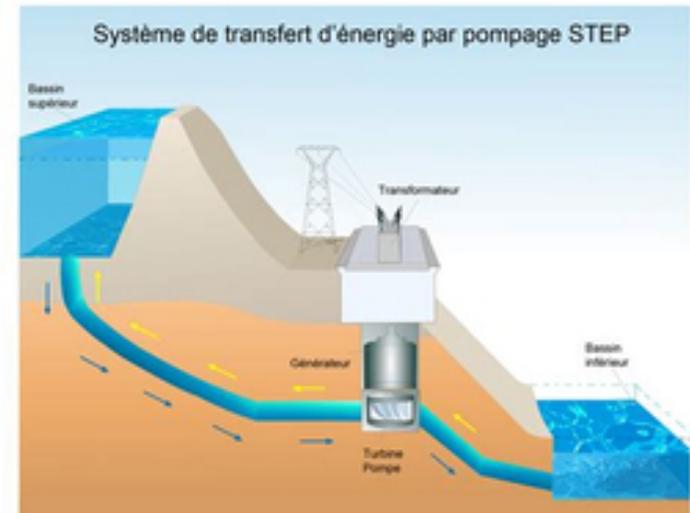
Stockage électrochimique (batteries)



Stockage chimique (H₂)

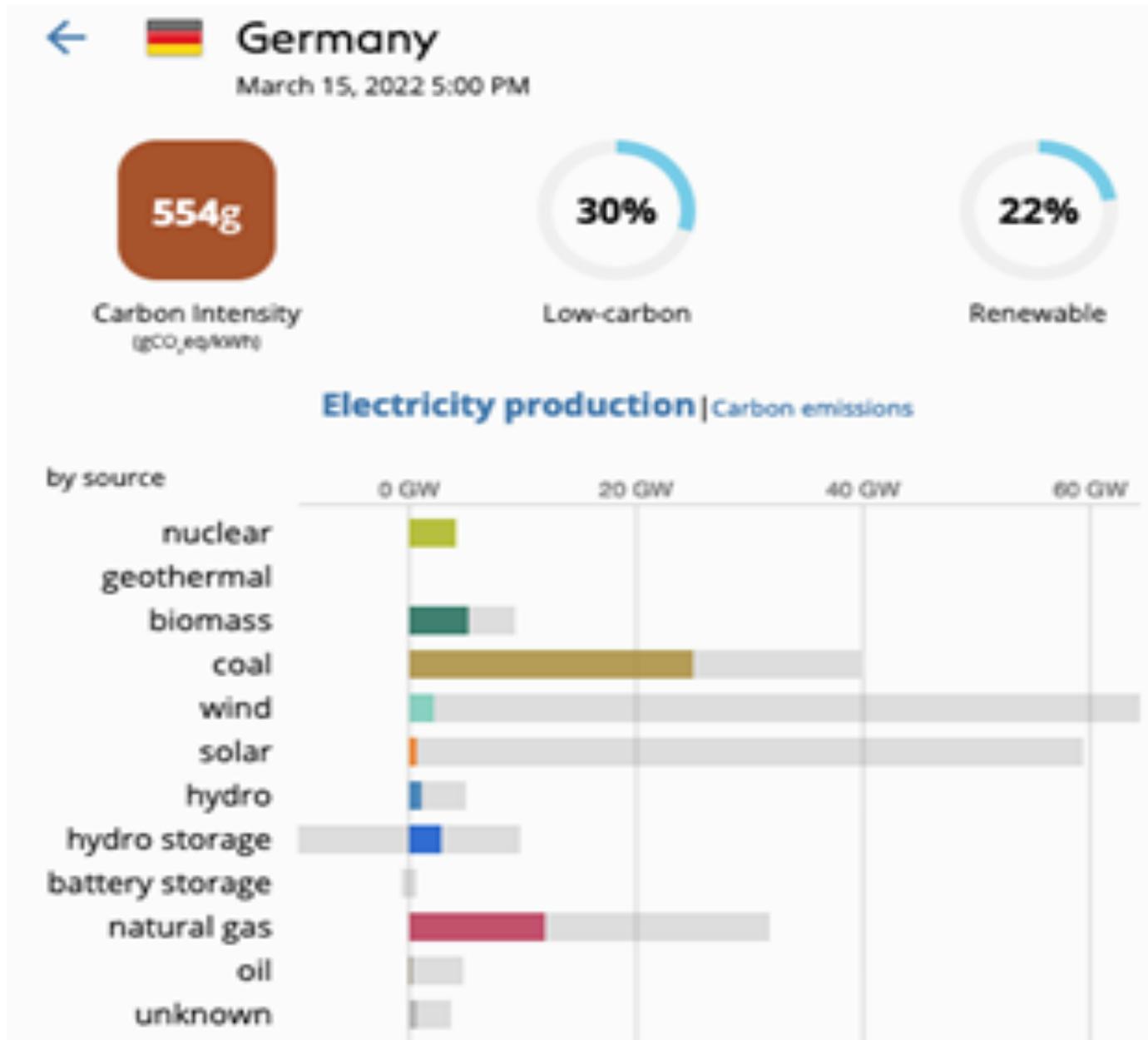


Stockage hydraulique (STEP)

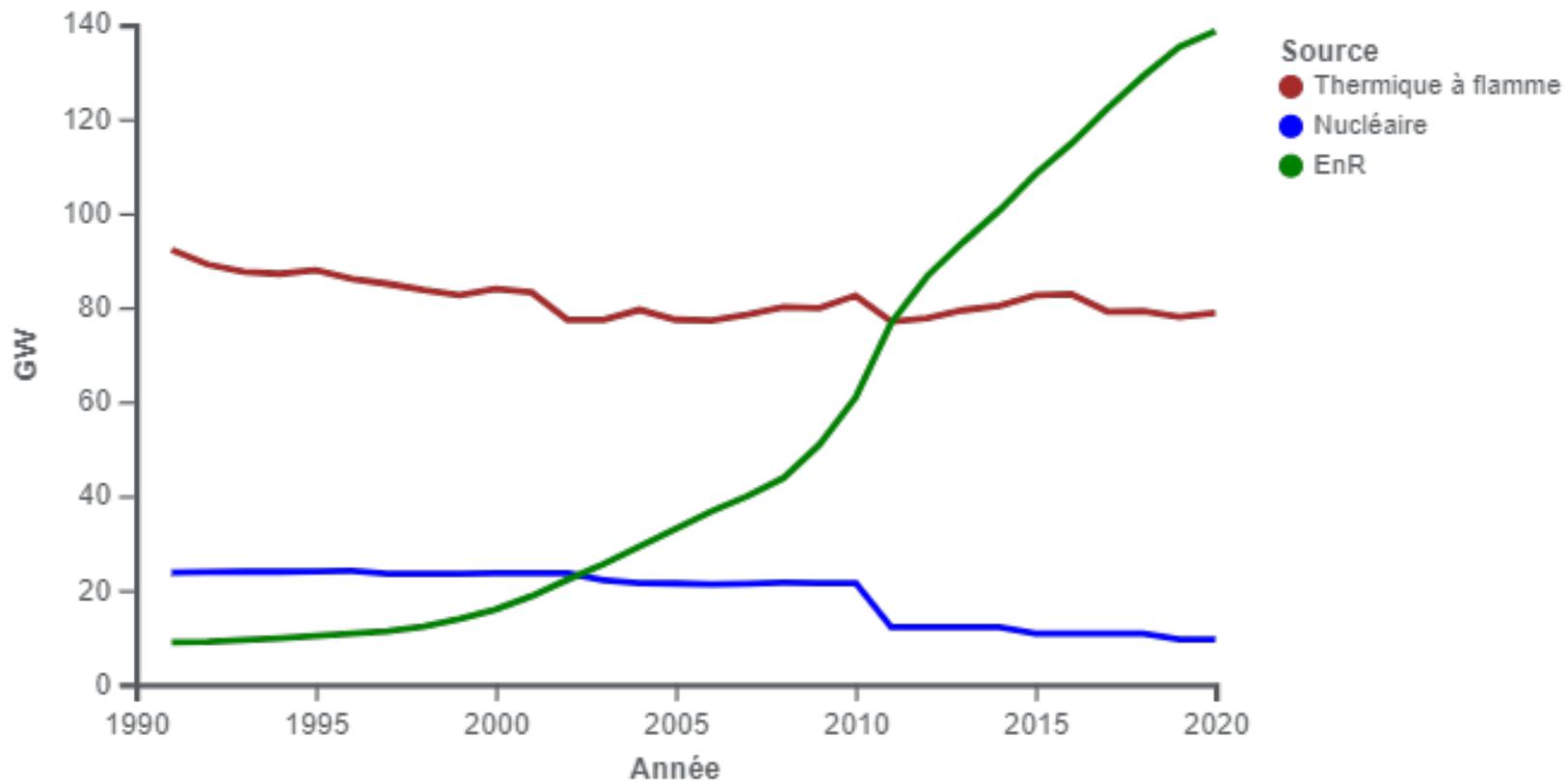


- + utiliser la flexibilité de la demande
- + utiliser les échanges trans-frontaliers
- [+ *utiliser les sources pilotables (gaz, nucléaire)*]

L'Allemagne: exemple?



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



Voilà pourquoi il faut un mix électrique:
Nucléaire + ENRs + gaz*



- * **Gaz**, tant qu'il n'y aura pas de technologies de stockage à grande échelle
- * **Gaz: naturel ou biométhane?**
- * **Stockage** : batteries, STEP, H2,...

Assurer les pointes

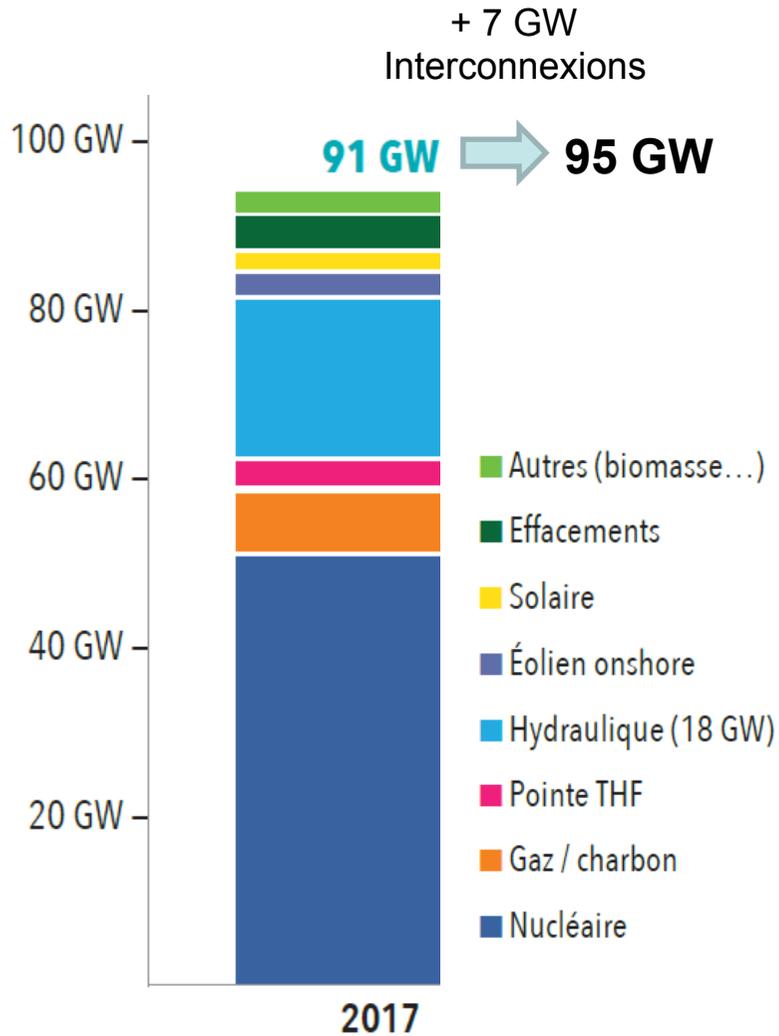
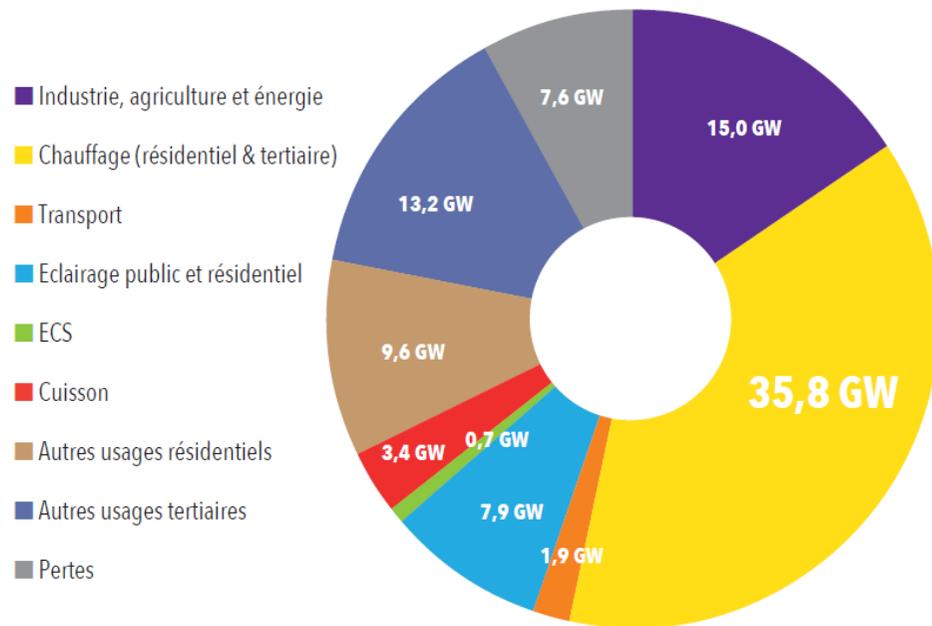
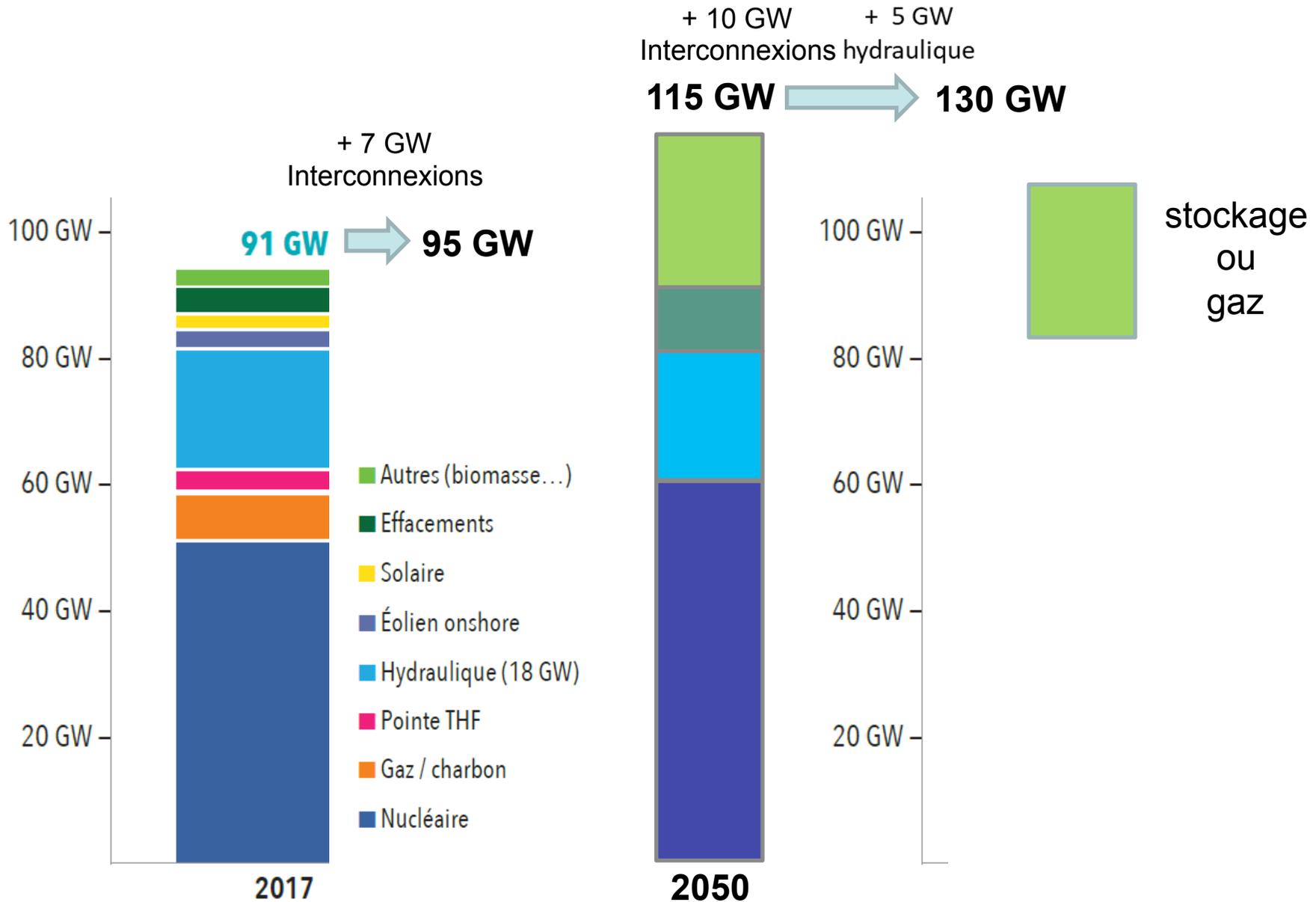


Figure 3 : **Décomposition par usage de la puissance appelée à la pointe sur le réseau électrique sur la base de 95 GW.**

Source : d'après les données des bilans électriques RTE 2015-2017.

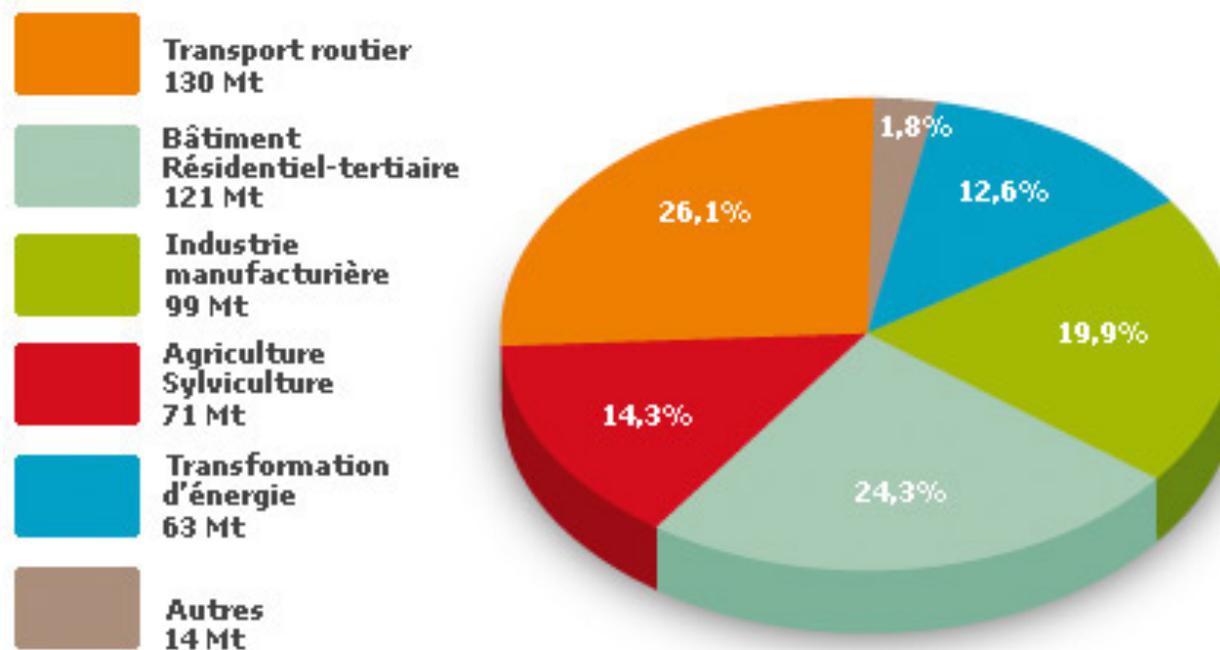


Assurer les pointes



**La transition énergétique:
Perspectives
(le cas de la France)
3. La réponse technologique**

Recherches et Innovation: habitat, transport, industrie



Recherches et Innovation: habitat, transport, industrie

Priorités

➤ **Défossiliser l' habitat** (électrifier/rénover)

- Électrification du chauffage (Pompes à chaleur)
- Rénovation thermique
- Nouveaux matériaux de structure
- Nouveaux matériaux isolants

➤ **Défossiliser les transports** (électrifier)

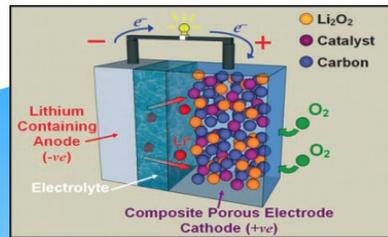
- Nouvelles batteries (densité d'énergie, écocompatibilité, recyclabilité)
- Matériaux composites/plastiques (allègement véhicules)
- Carburants alternatifs:
 - Biocarburants
 - Carburants de synthèse
 - Hydrogène décarboné (électrolyse et piles)

➤ **Défossiliser l' industrie** (électrifier)

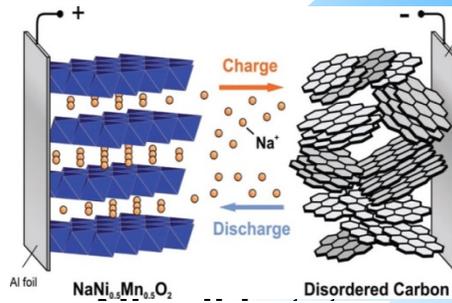
- Nouveaux procédés de production
(acier, ciment, verre, aluminium, éthylène, chlore, papier,...)
- Production d' **hydrogène** et d' ammoniac décarbonée; transport/stockage
- Nouveaux **électrolyseurs/nouvelles piles à combustibles**
- Capture, stockage et utilisation du CO₂

- + écocompatibilité
- + autonomie
- + vitesse de charge
- + smart batteries (diagnostic,..)
- + durabilité
- + sécurité
- + recyclage

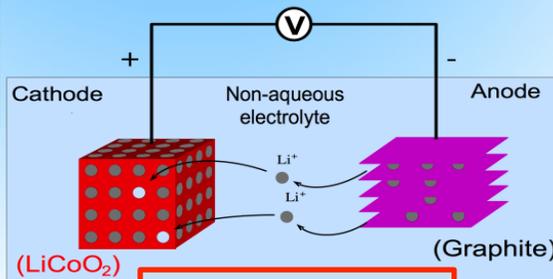
Batteries: Innovation



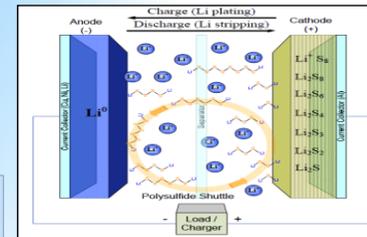
Li/air batteries



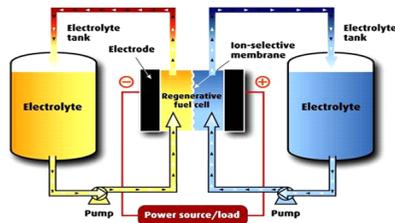
Na-ion batteries



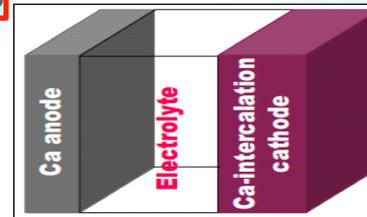
Li-ion batteries



Li/S batteries



Redox flow batteries



Multivalent cation (Mg^{2+} , Ca^{2+}) batteries

Aucune d'entre elles n'a atteint un état de maturation suffisant...

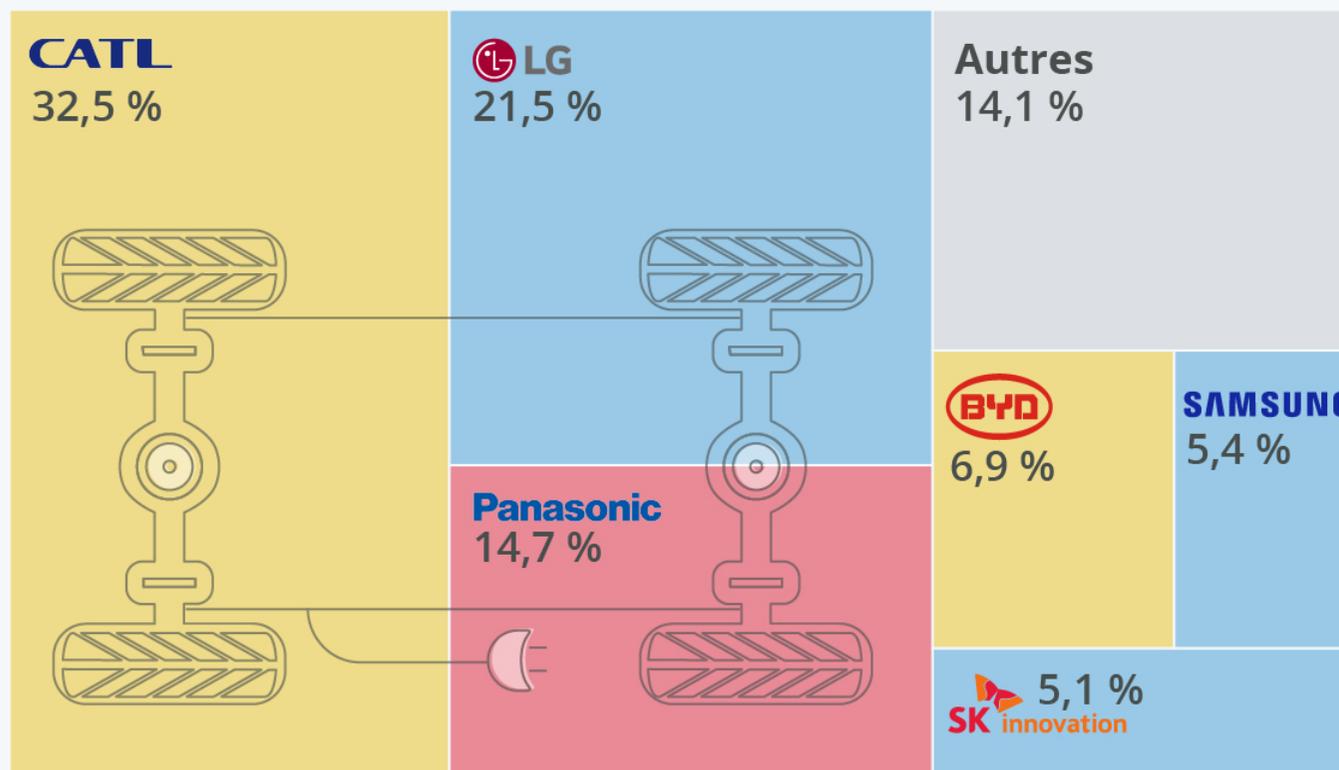
Merci à JM Tarascon

Nouvelles dépendances ?

L'ASIE, championne des batteries

Parts de marché des fabricants de batteries pour véhicules électriques dans le monde en 2021

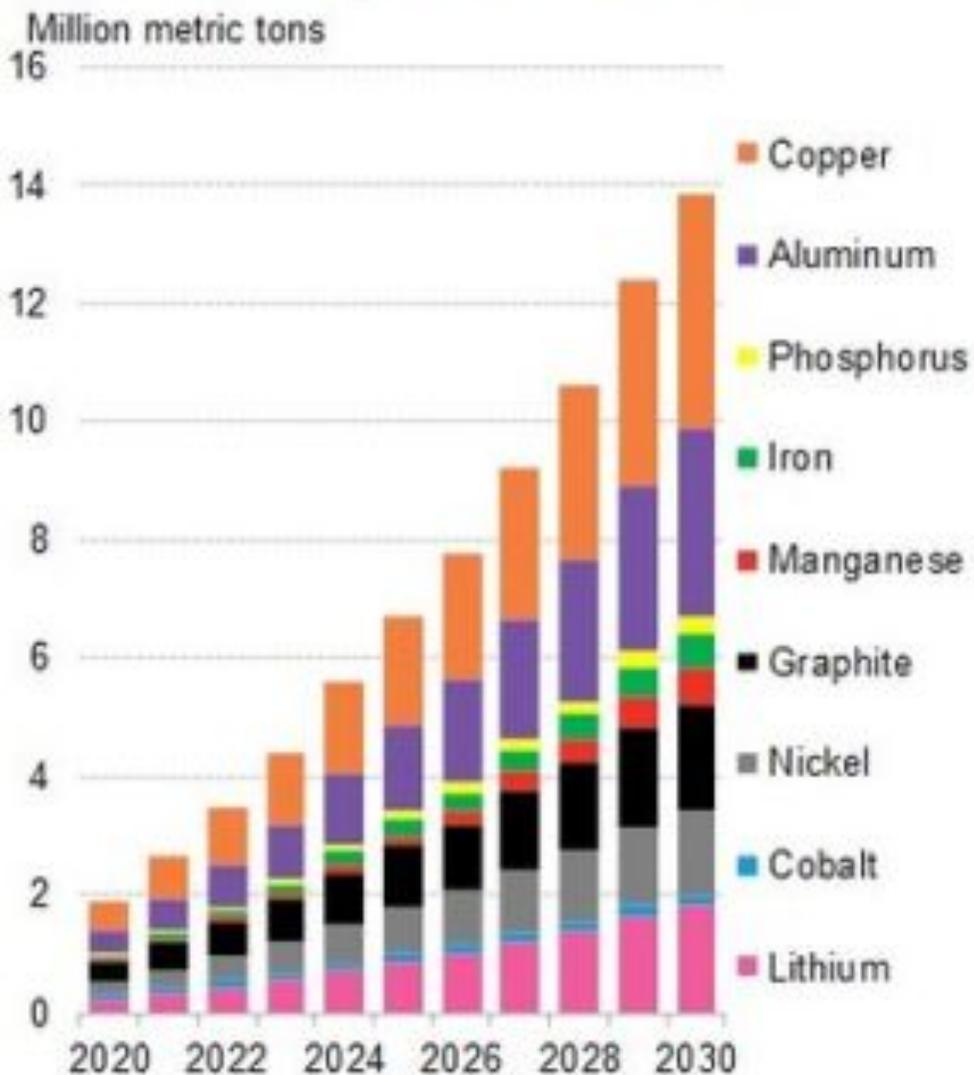
■ Chine ■ Corée du Sud ■ Japon



Sources : SNE Research, via Visual Capitalist

Nouvelles dépendances ?

Global battery metals demand



Ressources minérales et nouvelles technologies



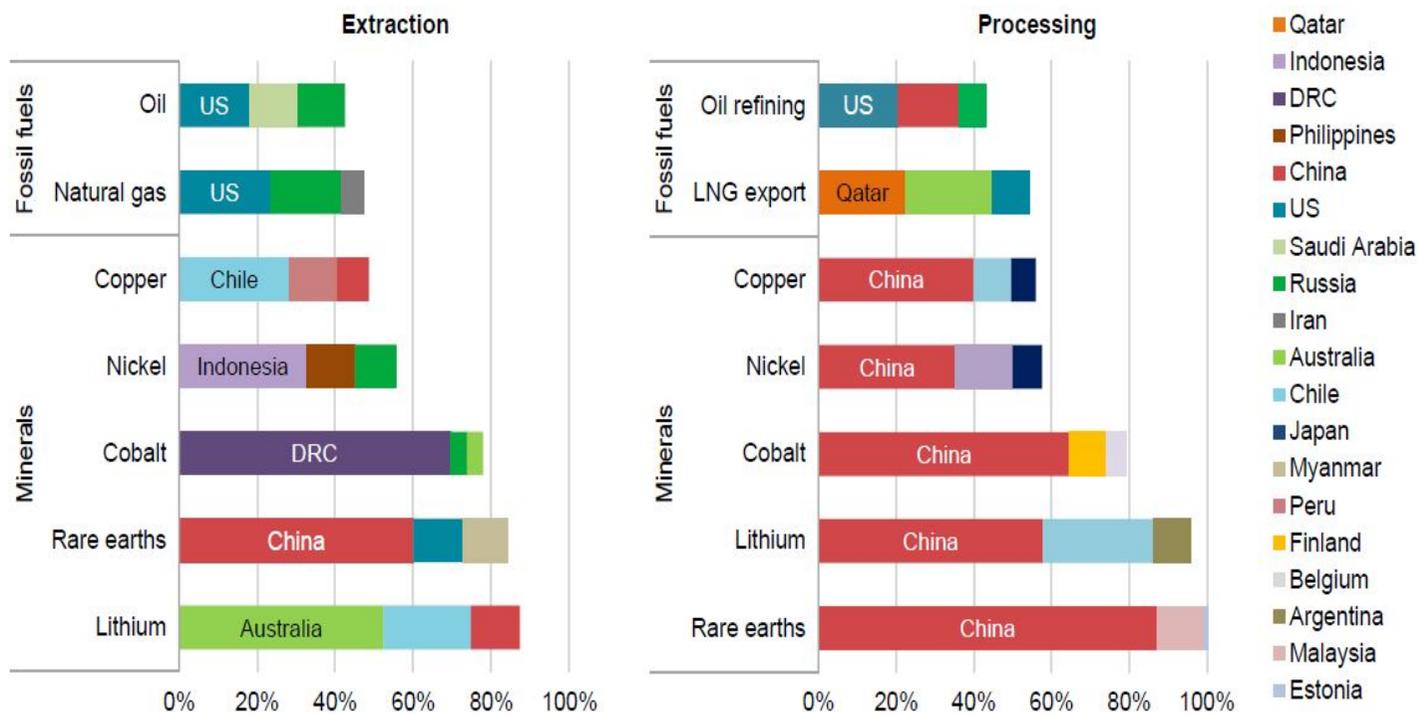
- ✓ **gisements suffisants?**
- ✓ **Où ?**
- ✓ **Une nouvelle science:**
récupération/recyclage

Nouvelles dépendances ?

Extraire et raffiner en France et en Europe ?

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

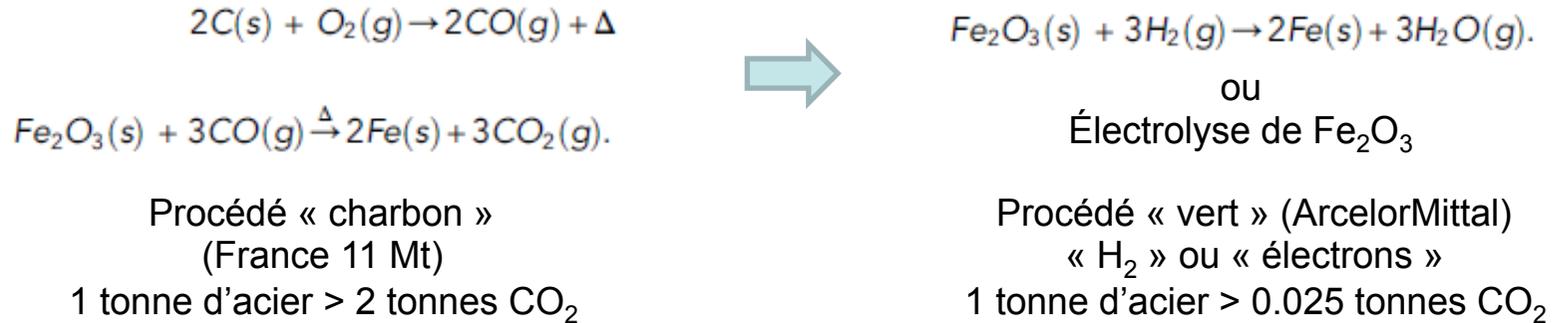


IEA. All rights reserved.

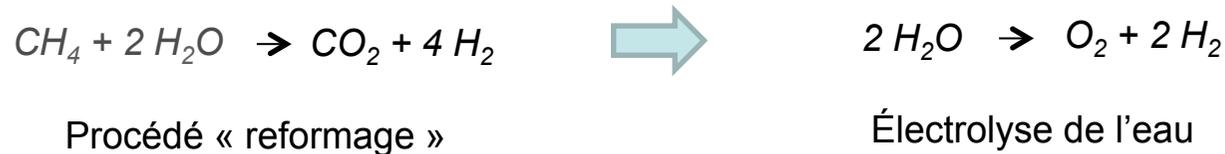
Notes: LNG = liquefied natural gas; US = United States. The values for copper processing are for refining operations.
Sources: IEA (2020a); USGS (2021), World Bureau of Metal Statistics (2020); Adamas Intelligence (2020).

Décarboner l'industrie ?

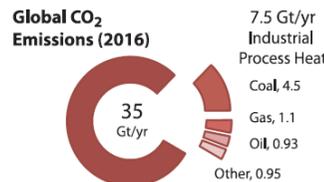
- ❑ Exemple: **l'acier- 7 à 9% des émissions mondiales de CO₂**
(ciment, béton , verre, aluminium, éthylène, hydrogène,...)



- ❑ Exemple: **l'hydrogène – 2,5 % des émissions mondiales de CO₂**
(France 10 Mt CO₂; 2-3% des émissions totales; 7.5 % des émissions de l'industrie)



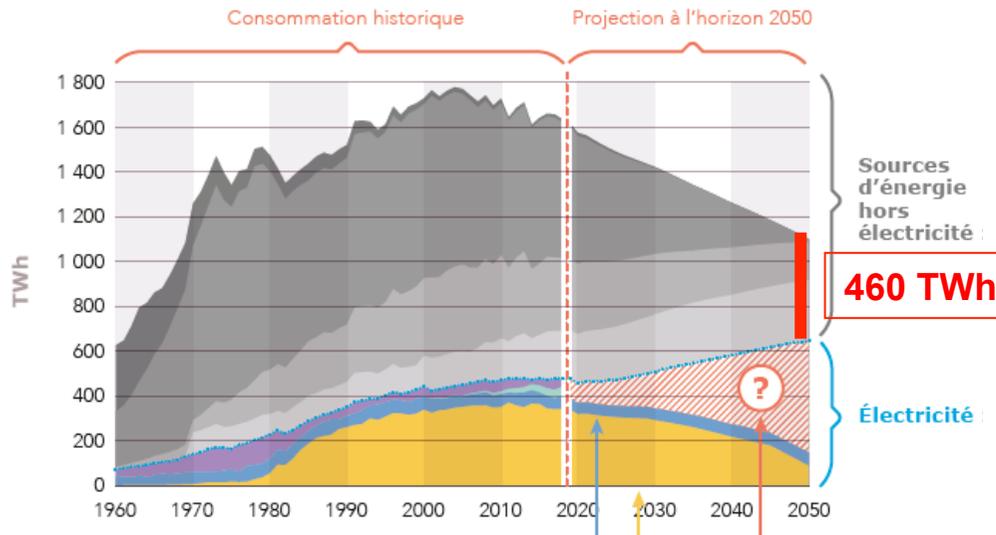
- ❑ Exemple: **production de chaleur**
(vapeur, fours, fourneaux,.. Chauffage de fluides, distillation, séchage, réactions)
Ex: 1400°C pour ciment et acier



Demain, quel carbone?

« Les sociétés resteront carbonées »

- **Défossiliser = biomasse/ déchets/CO2**



■ Électricité d'origine thermique fossile

■ Électricité d'origine éolienne, photovoltaïque et issue de bioénergies

■ Hydraulique

■ Électricité d'origine nucléaire

■ Charbon

■ Pétrole

■ Gaz (aujourd'hui fossile, demain décarboné)

■ Bois, biocarburant, déchets, chaleur

Les biocarburants

(bioéthanol, biodiesels, biokerosene)

- Développer les biocarburants de 2^{ème} Génération (valorisation des matériaux ligno-cellulosiques)
- Développer les biocarburants de 3^{ème} Génération (microalgues, photobioréacteurs)

Le biogaz

(biomasse **agricole**, déchets ménagers et industriels)

- Méthanisation/pyrogazéification
- Estimation des gisements et ACV

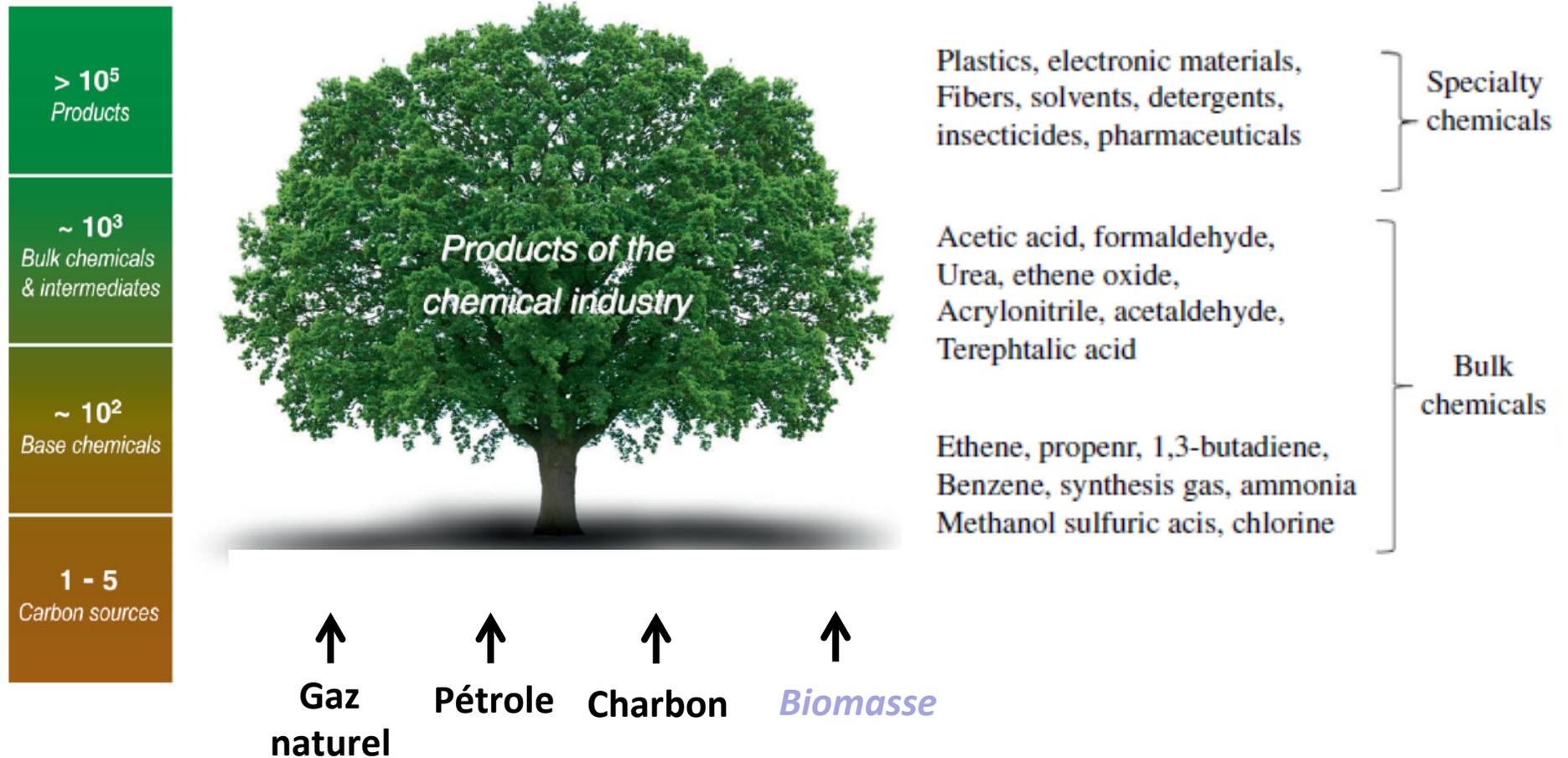
Les carburants alternatifs

- H₂
- Capture, stockage et valorisation du CO₂

Demain, quel carbone?

« Les sociétés resteront carbonées »

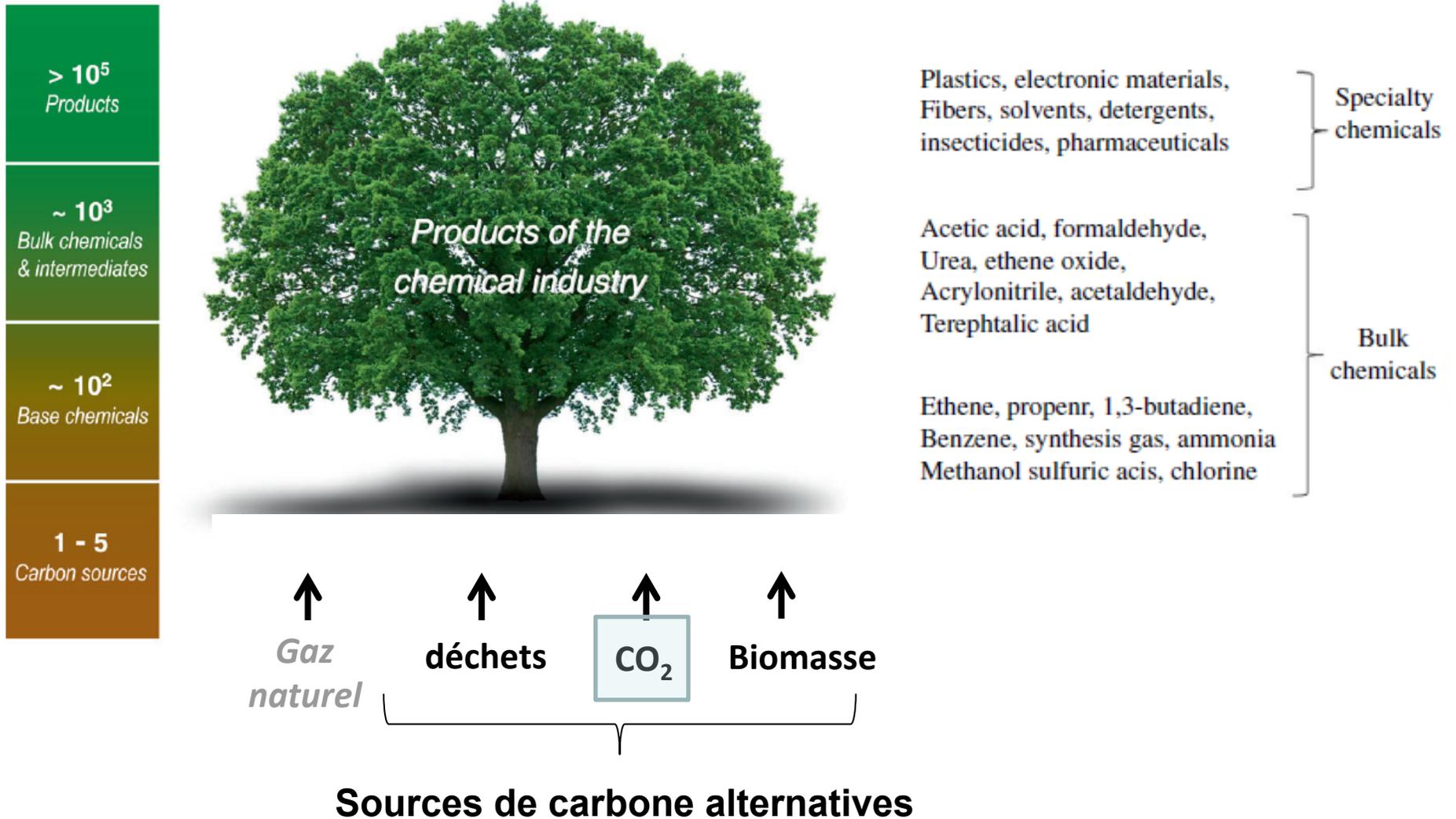
Fossiles pour l'industrie > Energie ET Carbone



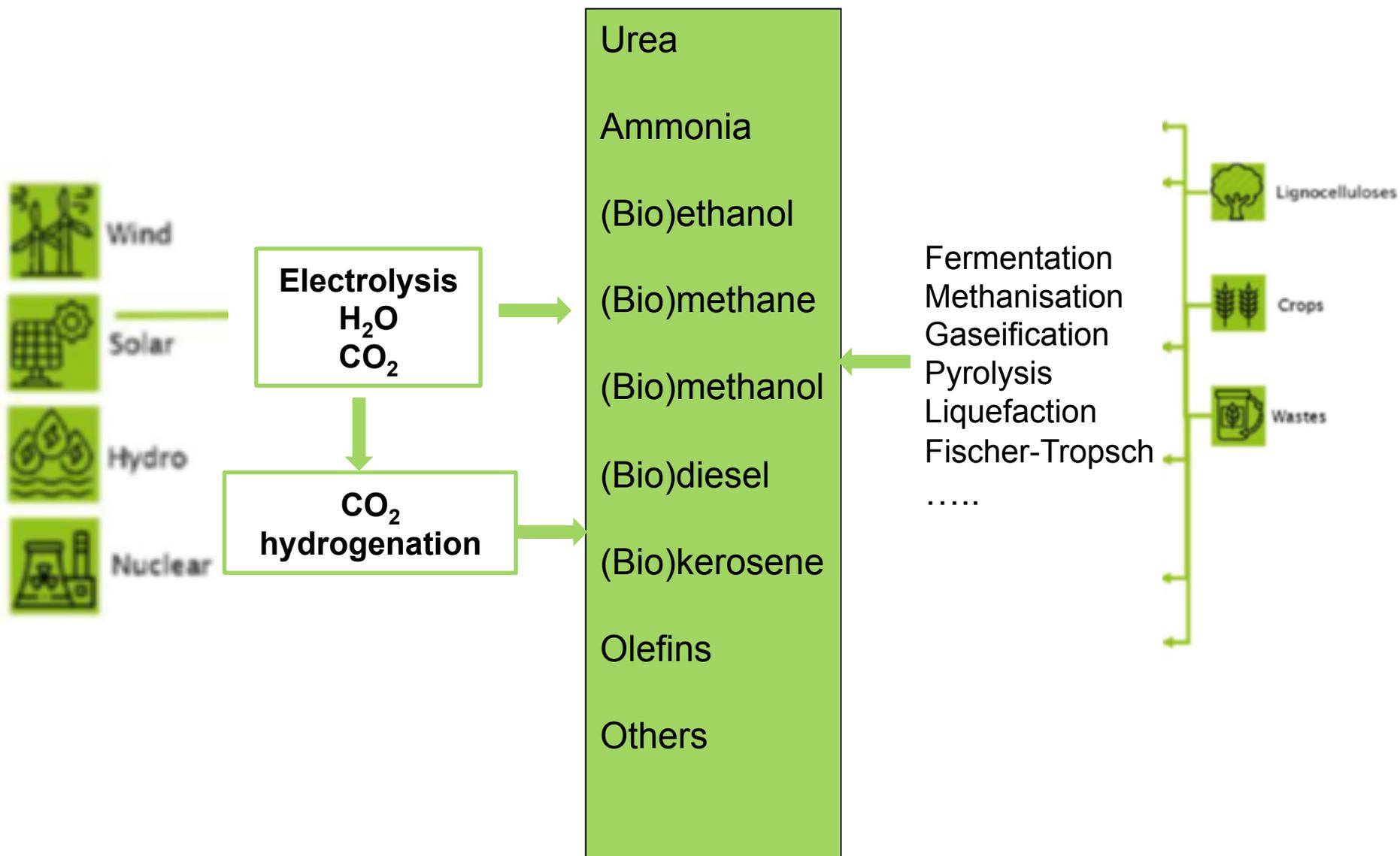
Demain, quel carbone?

« Les sociétés resteront carbonées »

Fossiles pour l'industrie > Energie ET Carbone



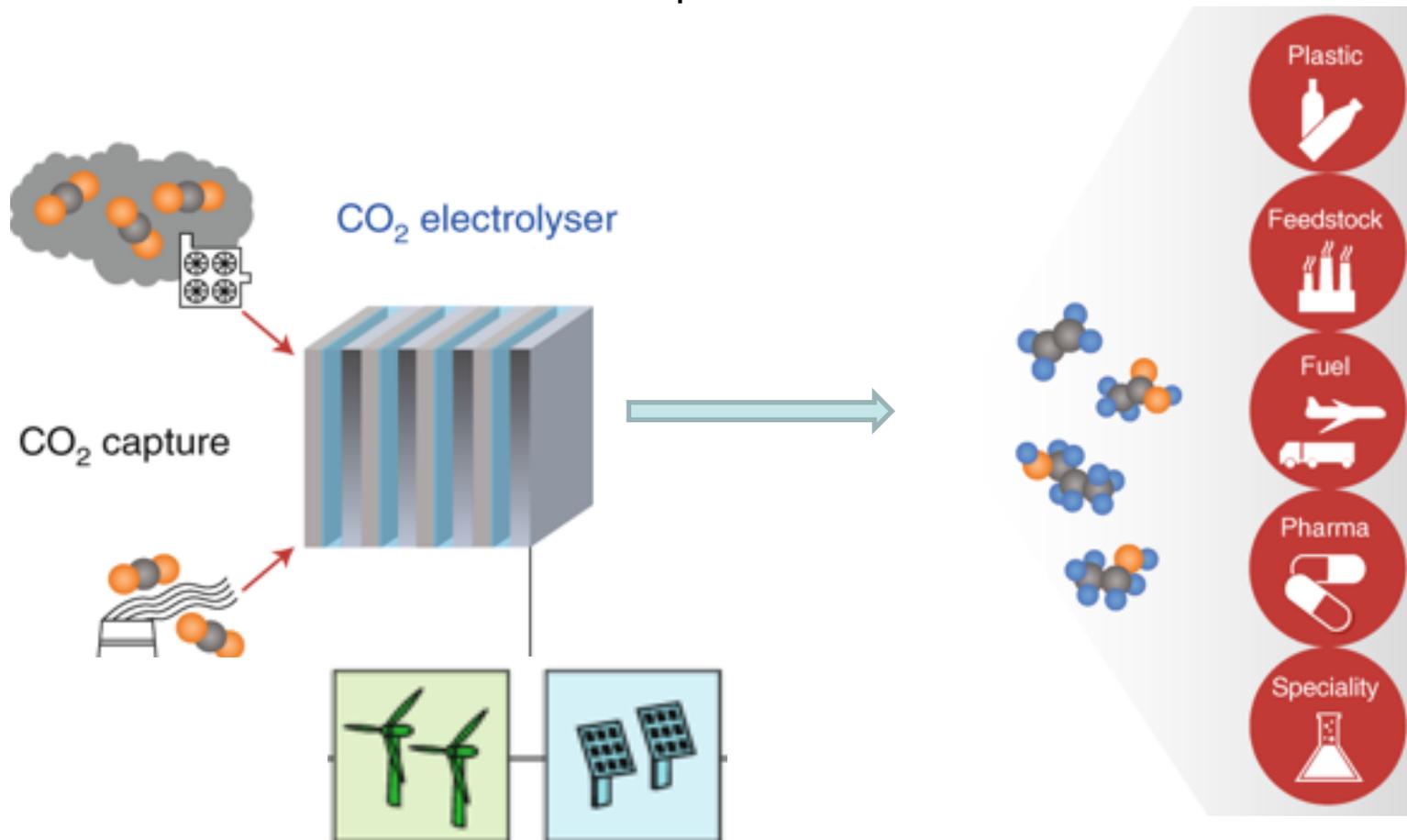
Une révolution de la chimie organique

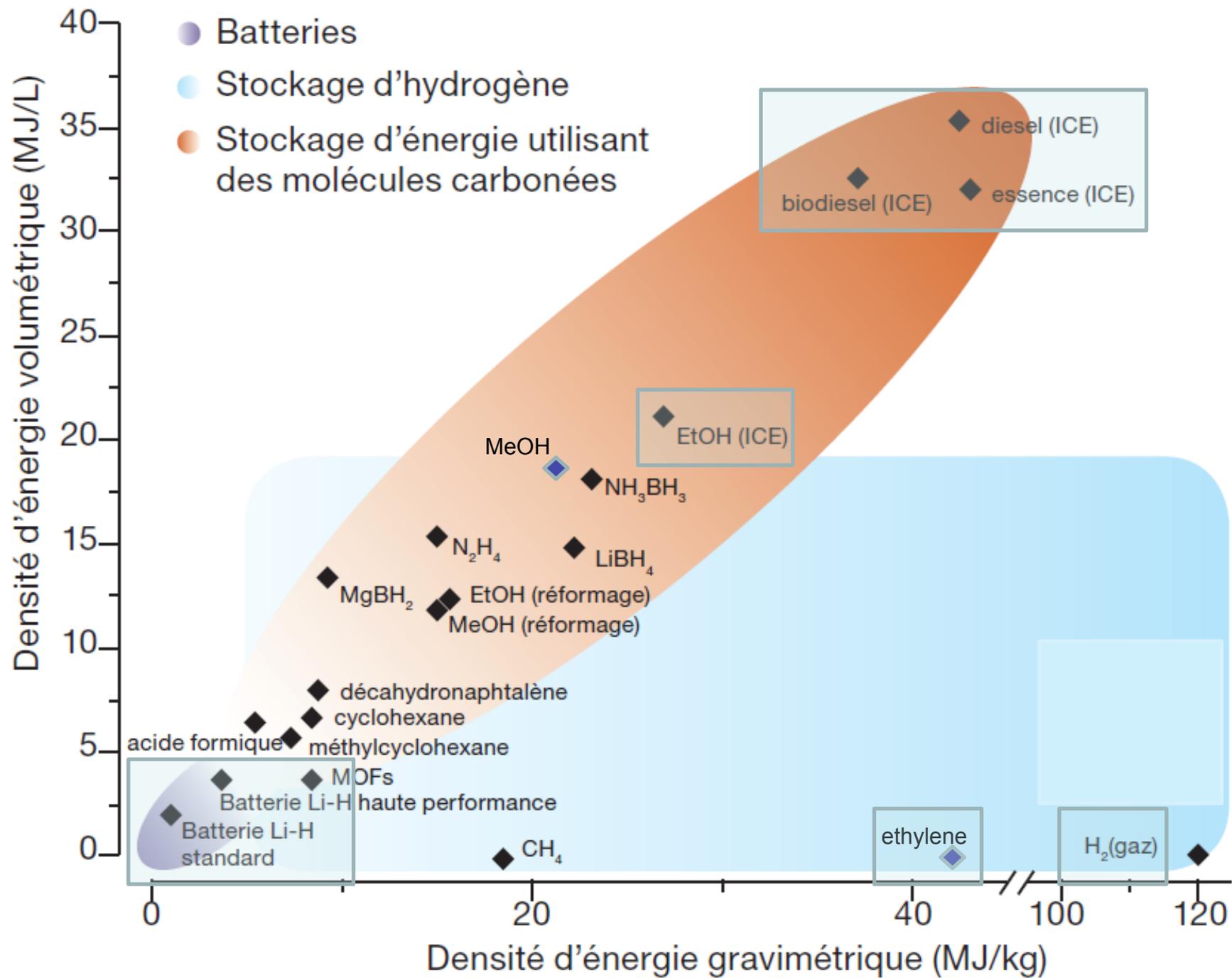


Recherche au Collège de France: Du CO₂ aux hydrocarbures

ELECTROLYSE DU CO₂

- ✓ Moins de CO₂ dans l'atmosphère
- ✓ Stockage des ENRs sous forme d'énergie chimique
- ✓ Des produits carbonés





ETHYLENE

47.2 MJ/kg; 0.055 MJ/L

Éthylène → Polyéthylène

Ethylene: 220 millions de tonnes en 2020

Actuellement

Craquage à la vapeur de naphta et hydrocarbures saturés
(750-950°C)

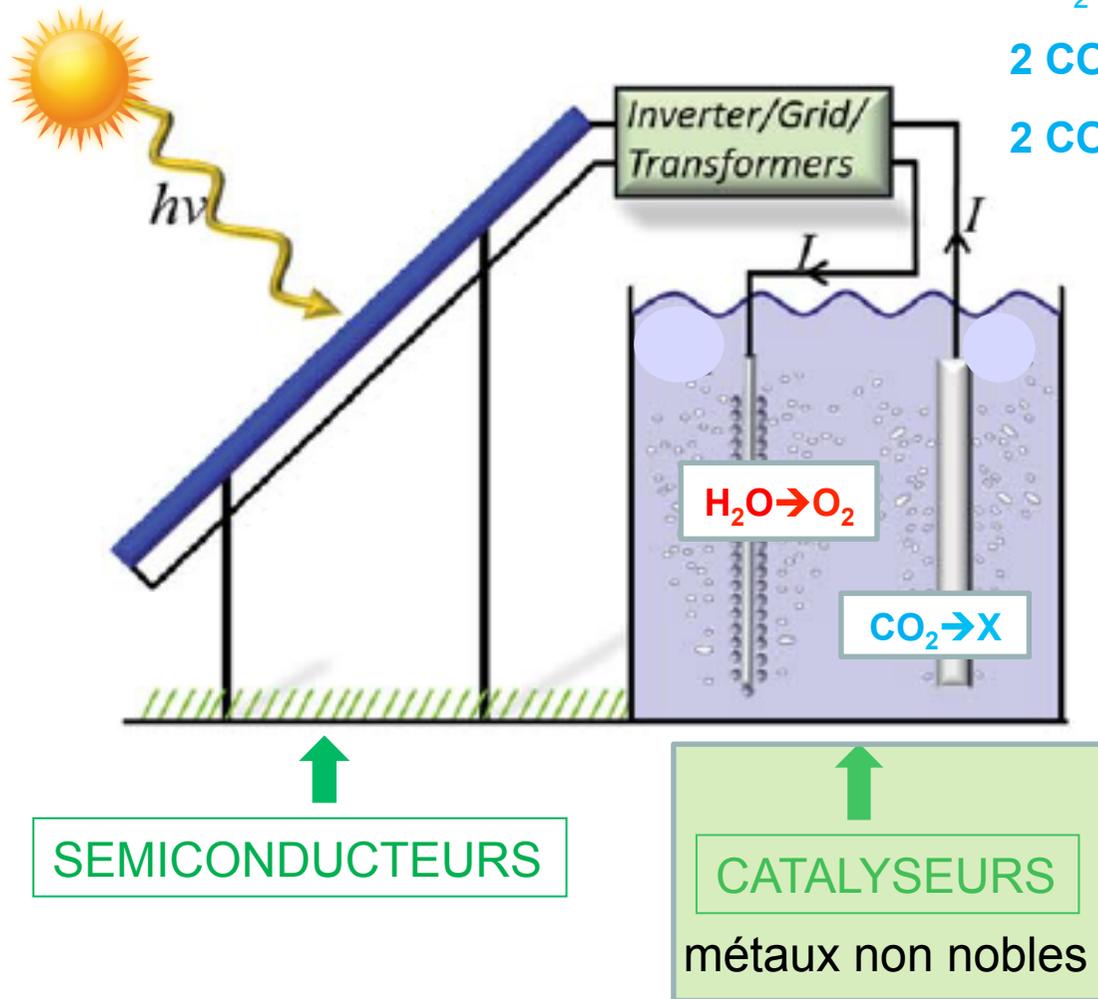
- Énorme demande énergétique
(8% de la consommation énergétique primaire de l'industrie chimique)
- Production de gaz à effet de serre
(2 tonnes de CO₂ / tonne éthylène)

Photosynthèse artificielle: photovoltaïque + électrolyse



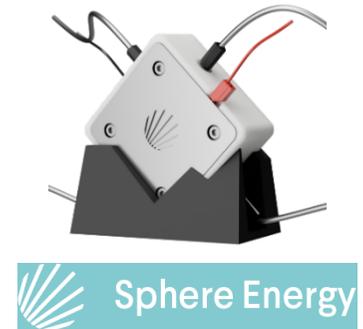
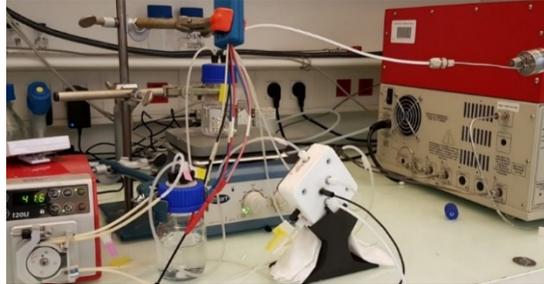
C_2H_4 = éthylène

$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ = éthanol

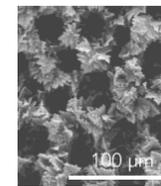
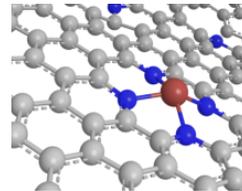
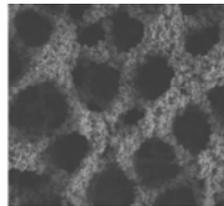


Photosynthèse artificielle au Collège de France

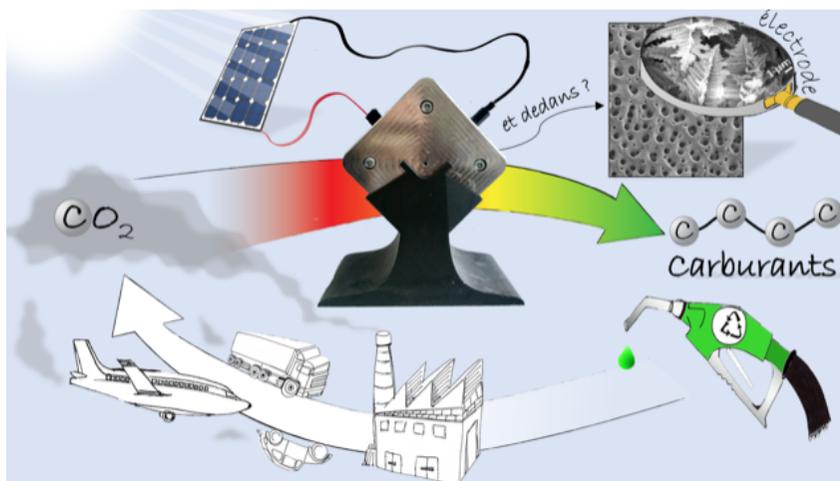
➤ De nouveaux électrolyseurs



➤ De nouveaux catalyseurs: Cuivre; zinc



➤ Couplage panneaux solaires/électrolyseurs



Low-cost high efficiency system for solar-driven conversion of CO₂ to hydrocarbons

Huan Ngoc Tran, D. Alves Dalla Corte, S. Lamaison, L. Lutz, N. Menguy, M. Foldyna, S.-H. Turren-Cruz, A. Hagfeldt, F. Bella, M. Fontecave, V. Mougel. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2019, 116, 9735-9740

“Artificial plant mimics leaf to make fuel from sunlight”

THE  TIMES



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

CONCLUSION:

Vous êtes la solution !

