

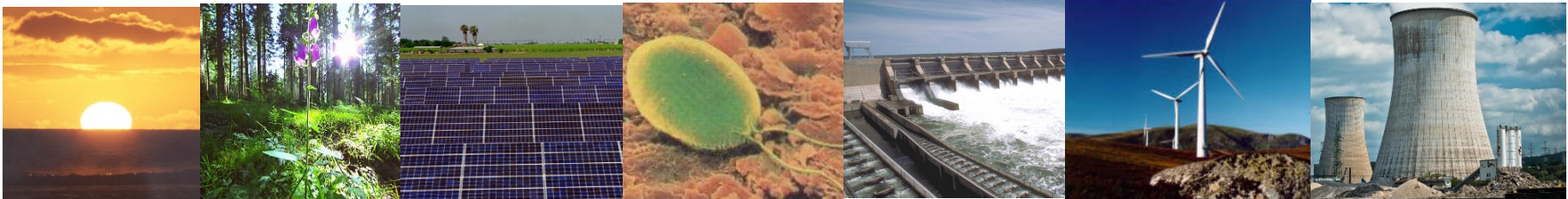


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

# Recherche et Innovation pour la transition énergétique:

**Marc FONTECAVE**

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



## 1. Emissions de CO<sub>2</sub>

## 2. Scénarios

## 3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée

- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

## 4. Quelles sources d'énergie ?

- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

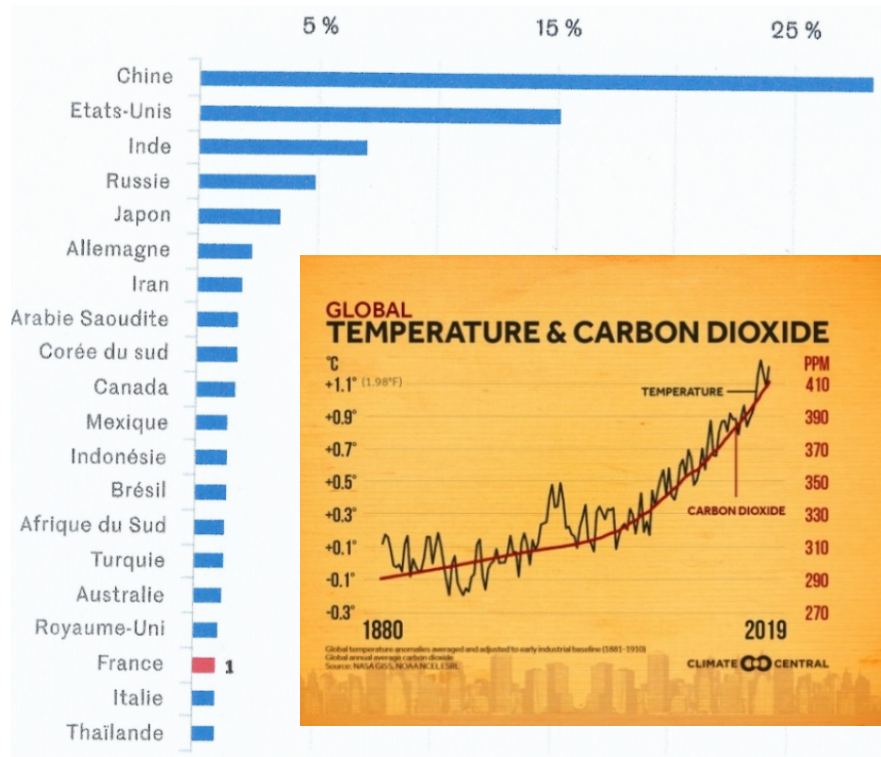
# Emissions de CO<sub>2</sub> : Défossiliser....

## Sobriété

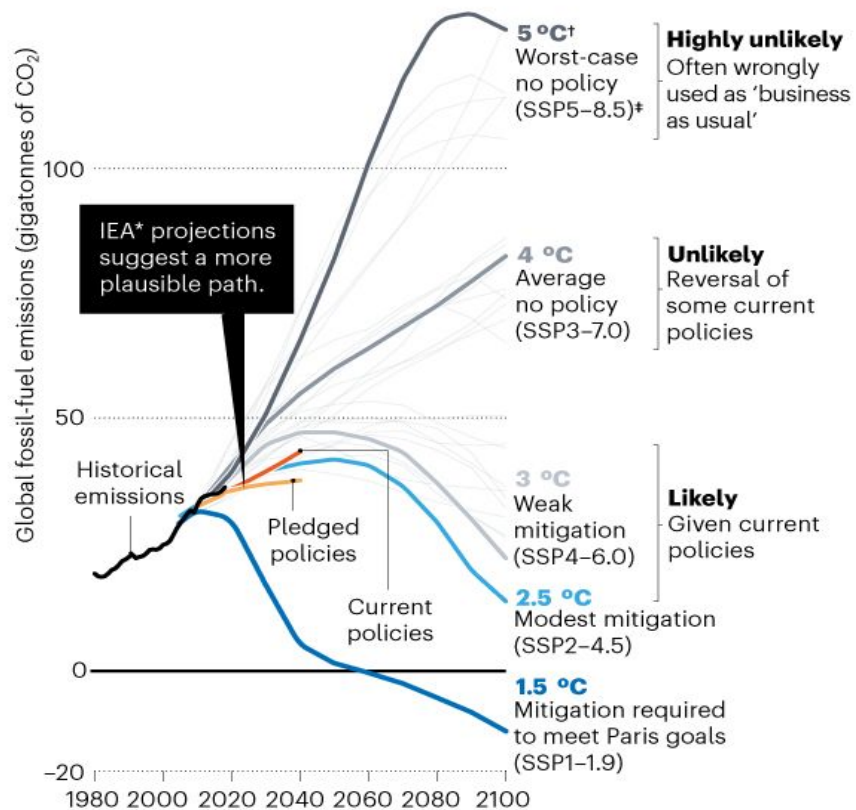
- **Economies** d' énergie
- **Efficacité** énergétique

## Défossiliser le système énergétique

- Pour lutter contre le **réchauffement climatique**
- Une transition à mener à l' **échelle mondiale**
- Il faudra **du temps** pour remplacer les fossiles par les énergies bas-carbone, en raison de contraintes physiques, économiques, sociales, ...
- Une partie de la solution est dans la **connaissance, la recherche, la technologie et l' innovation**
- Afficher des objectifs irréalistes et inatteignables est une **erreur politique**



# Objectif Net Zero et + 1,5°C en 2050 ?



## 1,5°C: zéro émissions en 2100

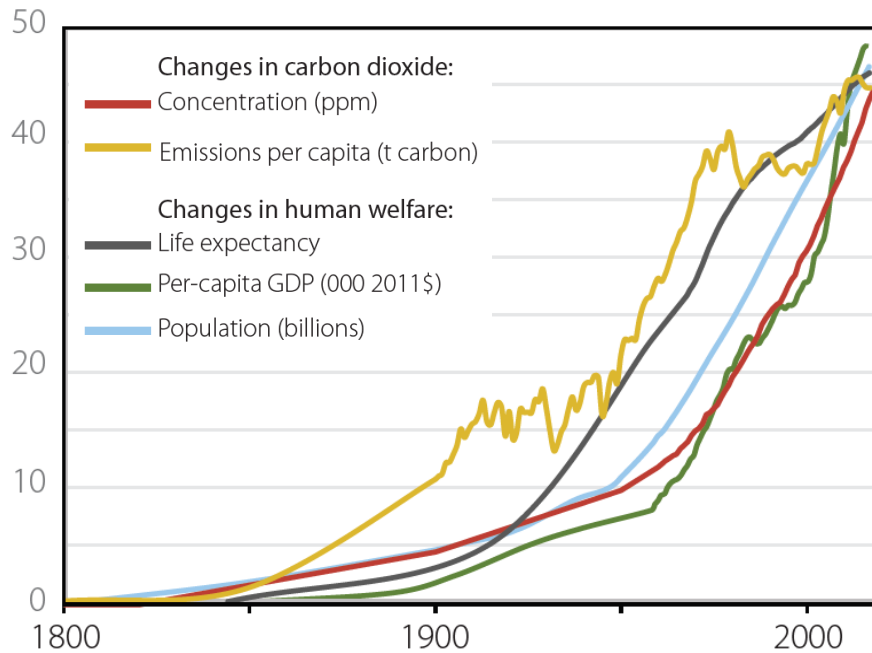
- 2,5-3 °C: hautement probable
- 4-5°C: peu probable.

## Adaptation !

- Habitat/tertiaire: rénovation/climatisation
- Système hospitalier
- Recherches (microbiologie, virologie,..)
- Agriculture (sècheresse)
- Aménagement du territoire
- Système électrique (sècheresse, événements extrêmes)



# Pourquoi la transition est difficile ?



## Notre addiction pour les énergies fossiles

- Une source d'énergie incomparable
- Croissance du PIB, augmentation de l'espérance de vie, etc...



*"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."*

# 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%

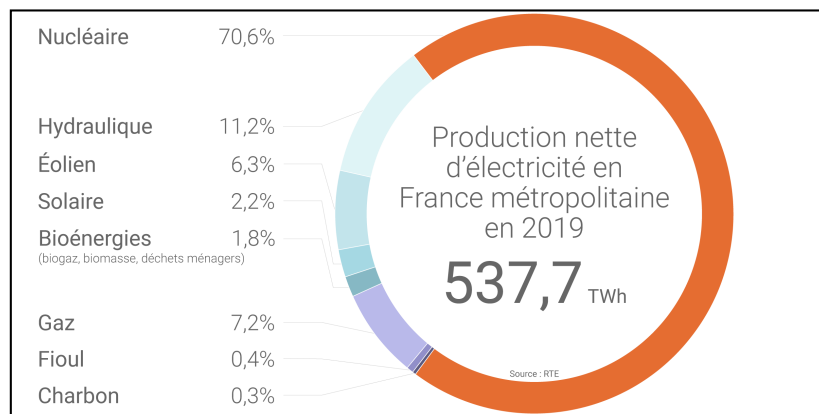
## Consommation énergie 2019

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%
<b>Total consommations</b>	<b>1611</b>	<b>100%</b>

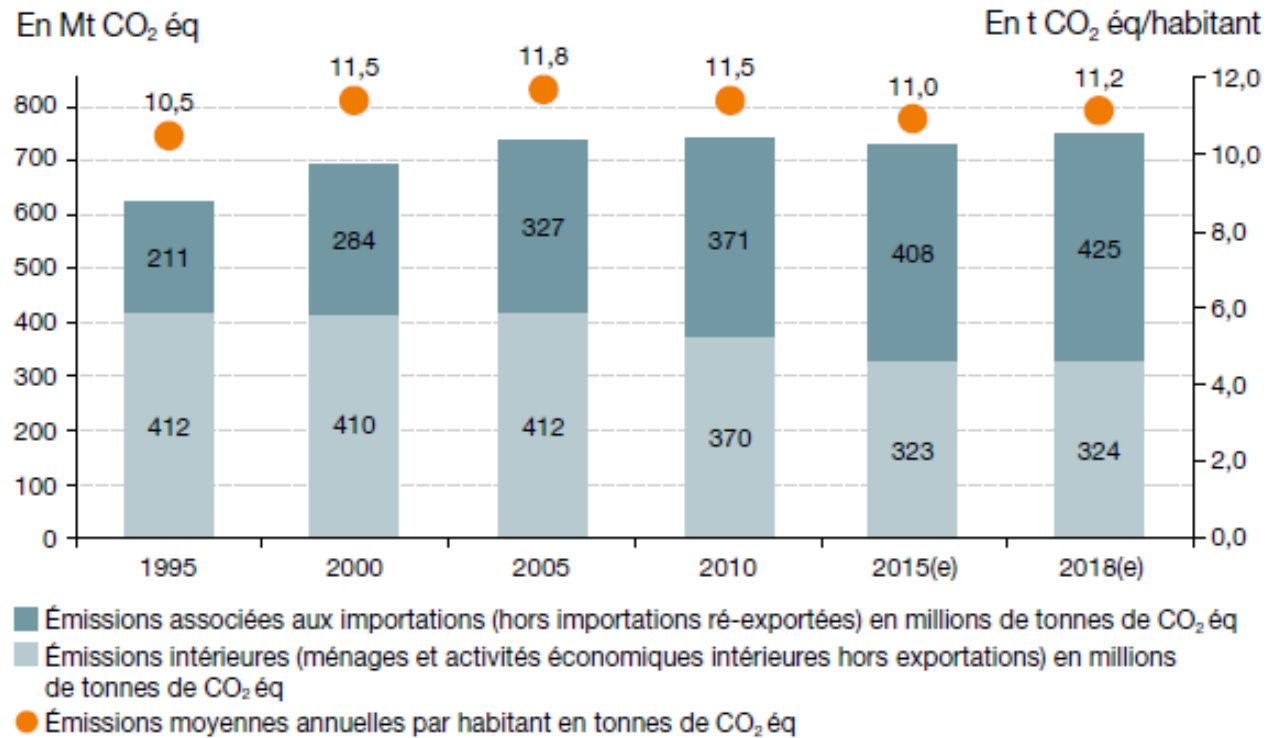
Sources : Eurostat [6] et RTE [7].

France: Energie  
**Electricité 92% décarbonée**

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



# France



(e) : estimation.

Note : l'empreinte carbone porte sur les trois principaux gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O). Données non corrigées des variations climatiques.

Champ : France + Drom (périmètre Kyoto).

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



Produire en France  
davantage et avec une énergie défossilisée ?  
Industrialisation/relocalisation/Souveraineté !

1. Emissions de CO<sub>2</sub>

## **2. Scénarios**

3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée

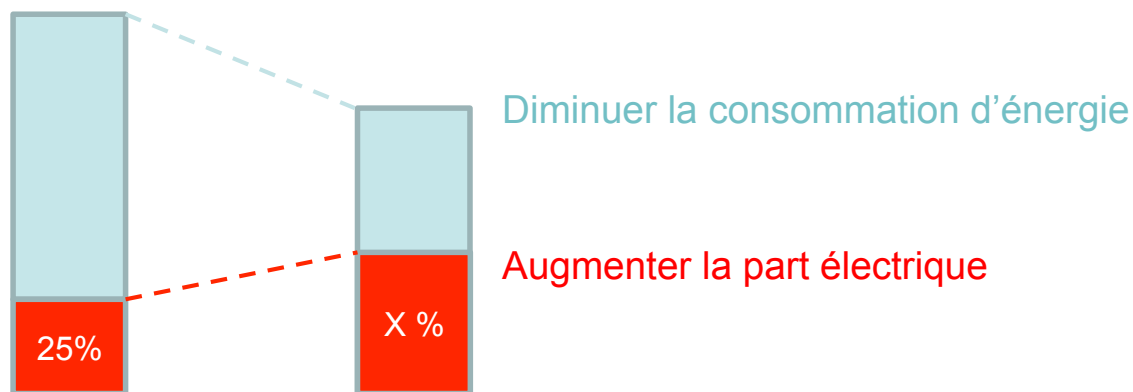
- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

4. Quelles sources d'énergie ?

- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

## Trajectoire Net Zero France: principes

- **Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?**
- Diminuer la part des énergies fossiles (charbon>pétrole>gaz). De combien?
- Augmenter la part des ENRs (éolien, solaire, biomasse) bas-carbone. De combien?
- Maintenir/développer l'énergie nucléaire bas-carbone. Jusqu'à combien?
- **Electrifier le système énergétique (25 > 50%?)**
- Trouver de nouvelles sources de carbone (biomasse, CO2) pour la synthèse de carburants, matériaux (plastiques, acier, béton) et molécules (médicaments,..), nanotubes de carbone/graphène,...



## Trajectoire Net Zero France: principes

- Diminuer la consommation d'énergie (1600 TWh): de combien (25%; 50%) ?
- Diminuer la part des énergies fossiles (charbon>pétrole>gaz)
- Augmenter la part des ENRs (éolien, solaire, biomasse) bas-carbone
- Maintenir/développer l'énergie nucléaire bas-carbone
- Electrifier le système énergétique (25 > 50%?)
- Trouver de nouvelles sources de carbone (biomasse, CO2) pour la synthèse de carburants, matériaux (plastiques, acier, béton) et molécules (médicaments,...), nanotubes de carbone/graphène,...

### ❖ **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**

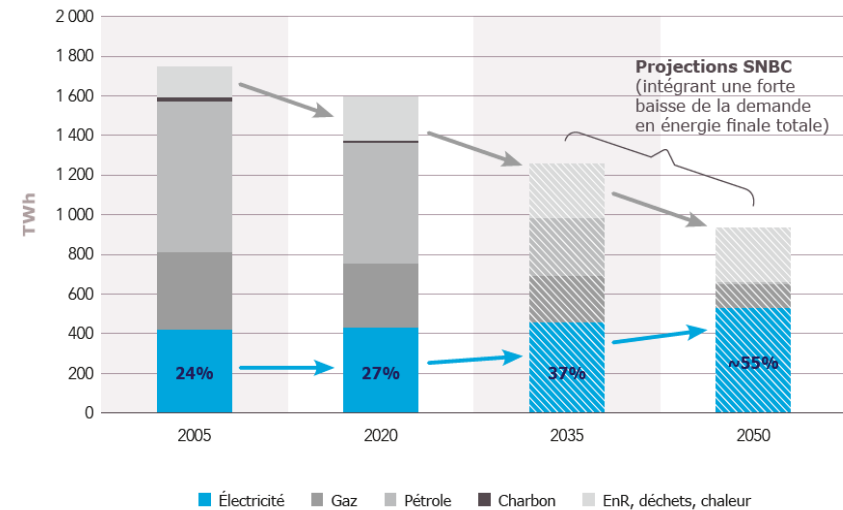
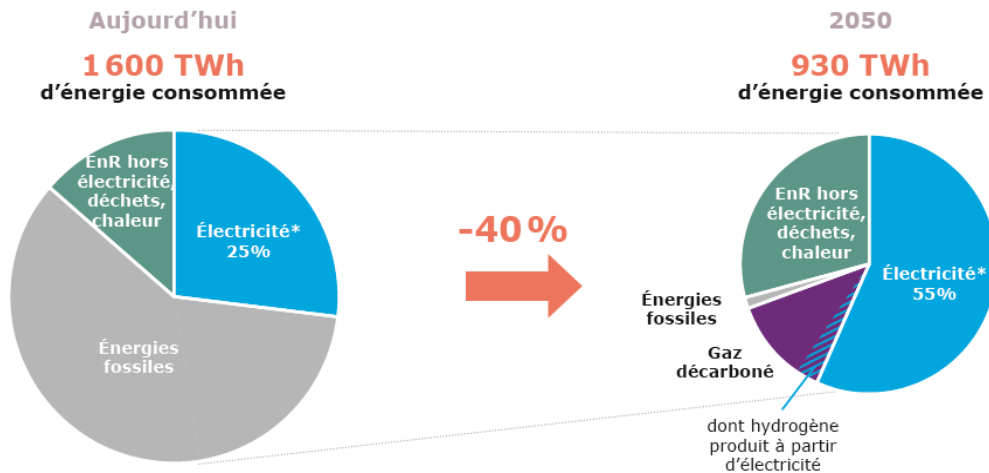
(Nucléaire, barrages, technos vertes: ENRs, H2, batteries,..)



# Scénarios France 2050

- 100 % ENRs ou < 50%/50% ENRs/Nucléaire
- Baisse de la consommation globale d'énergie (- x%)
- Hausse de la consommation d'électricité (25% à x %)

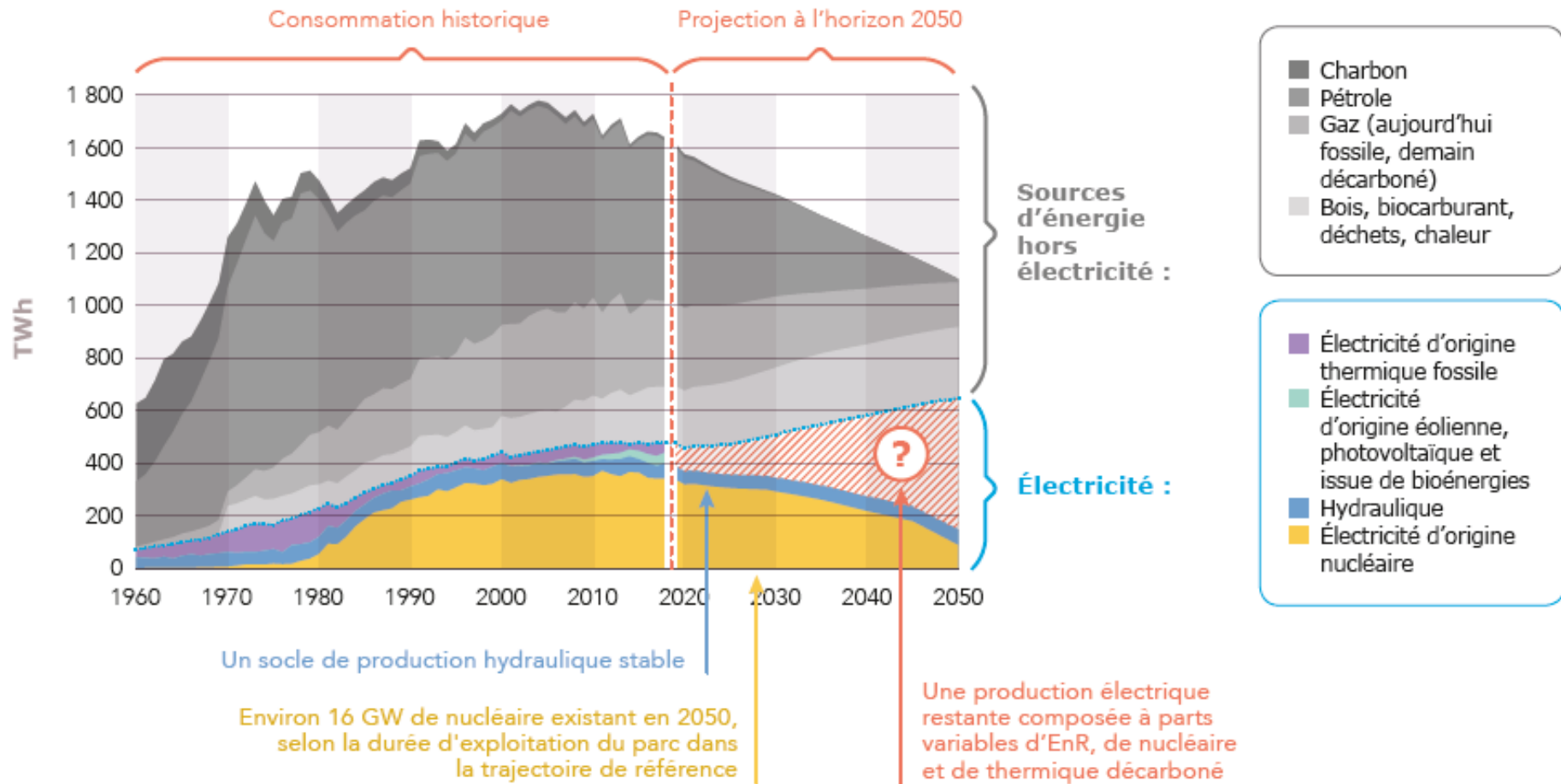
Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC



**SNBC: Stratégie Nationale Bas Carbone**  
Loi de Transition Énergétique 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)

1. Emissions de CO<sub>2</sub>

2. Scénarios

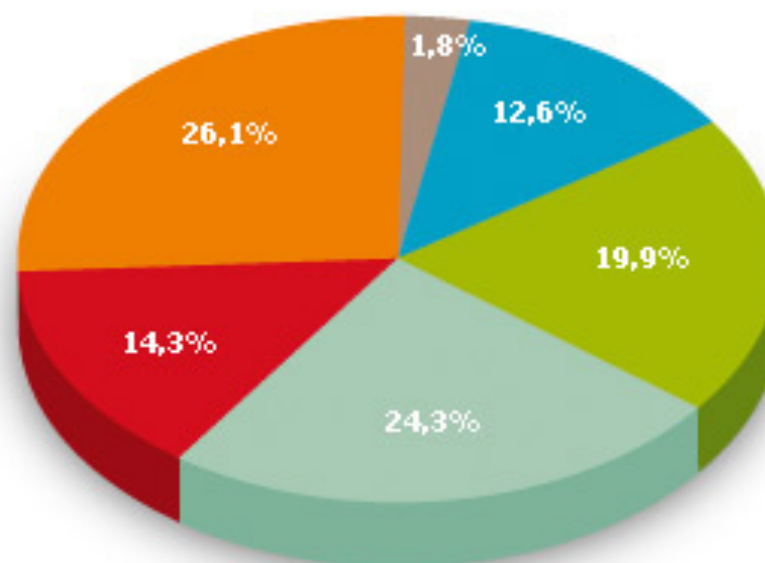
**3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée**

- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

4. Quelles sources d'énergie ?

- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

## 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 CO<sub>2</sub>

# Recherches et Innovation: transport

(France)

## QUEL MOYEN DE TRANSPORT EMET LE PLUS DE CO2 ?



Voitures particulières  
60 %



Transport routier de marchandises  
26%



Transport aérien  
7%



Train  
2%



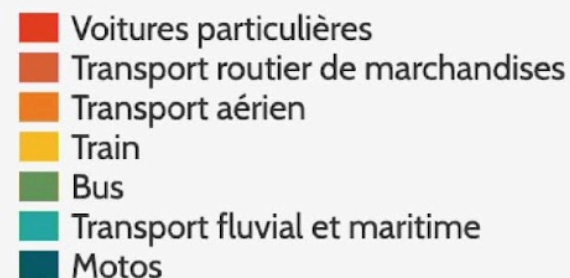
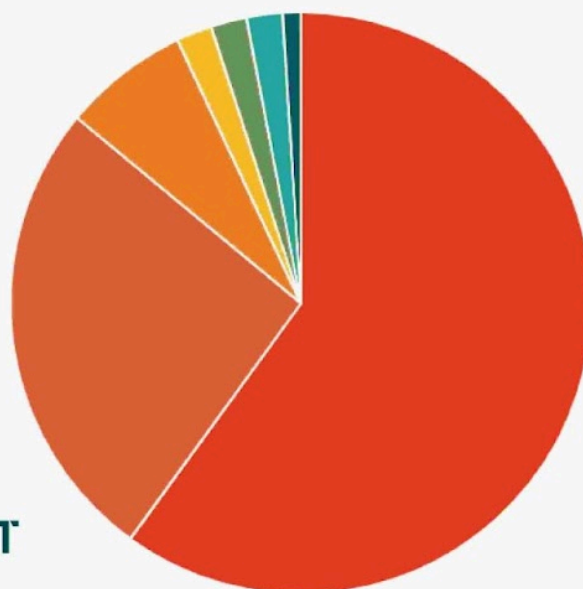
Bus  
2%



Transport fluvial et maritime  
2%

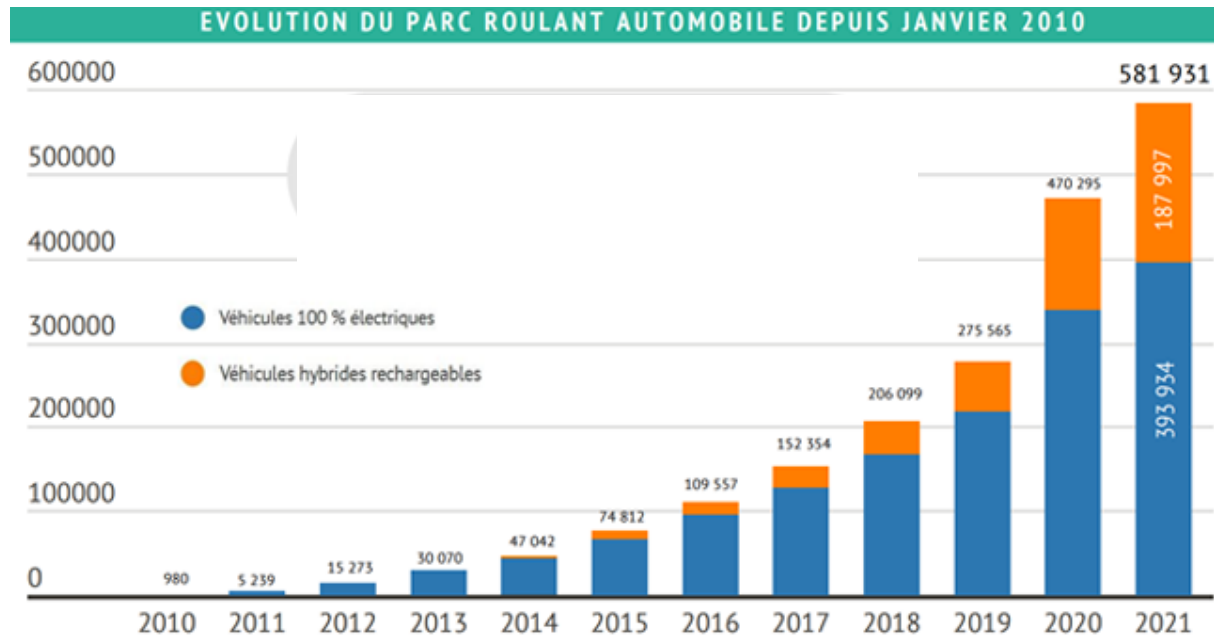


Motos  
1%





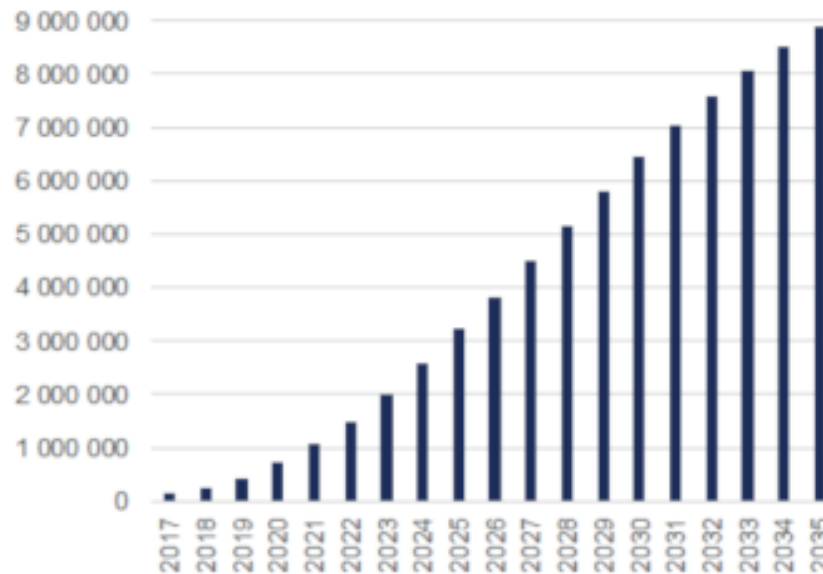
# Scénarios: croissance de la mobilité électrique



## France

2021: 0.6 million (1.5 %)

2035: 9 millions



# Scénarios: croissance de la mobilité électrique

Figure 5: Global annual passenger vehicle sales by drivetrain

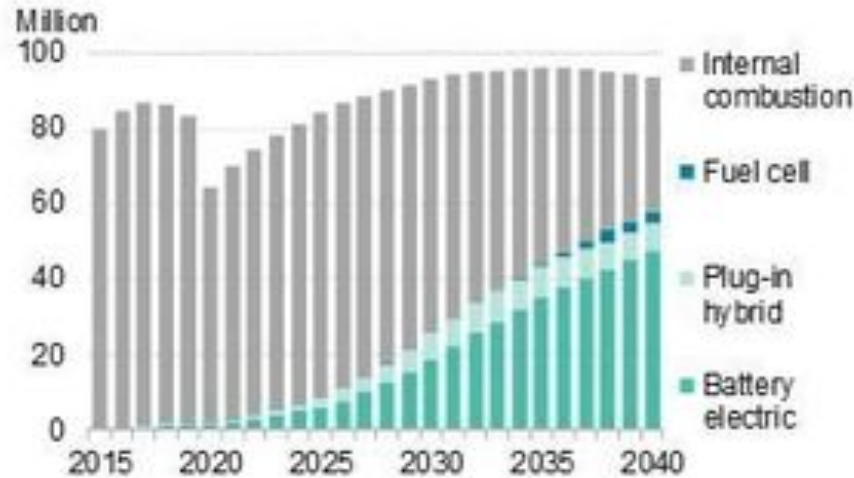
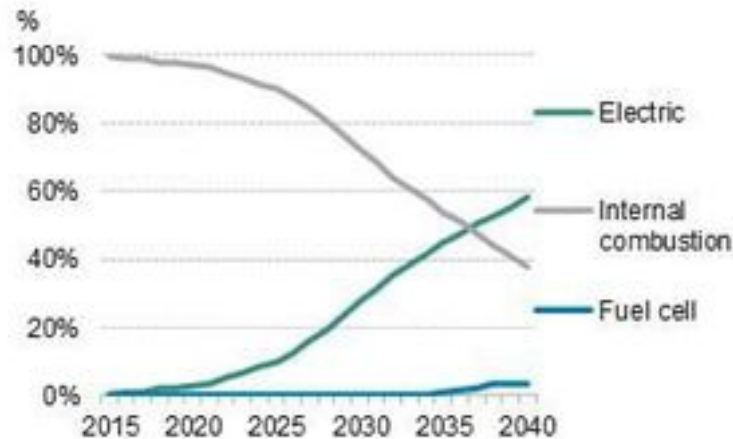
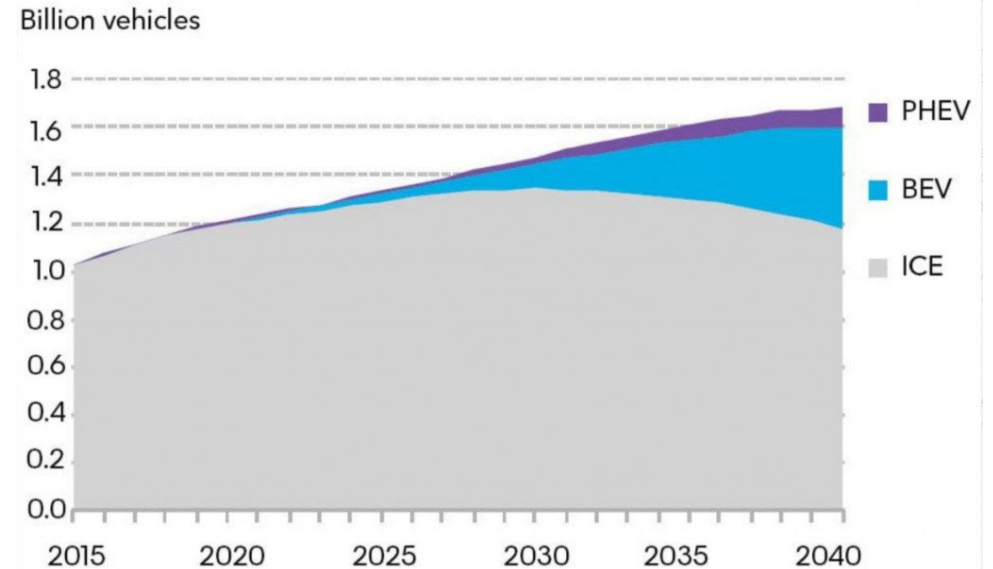


Figure 6: Global share of total annual passenger vehicle sales by drivetrain



Global long-term passenger vehicle fleet by drivetrain



Source: BloombergNEF

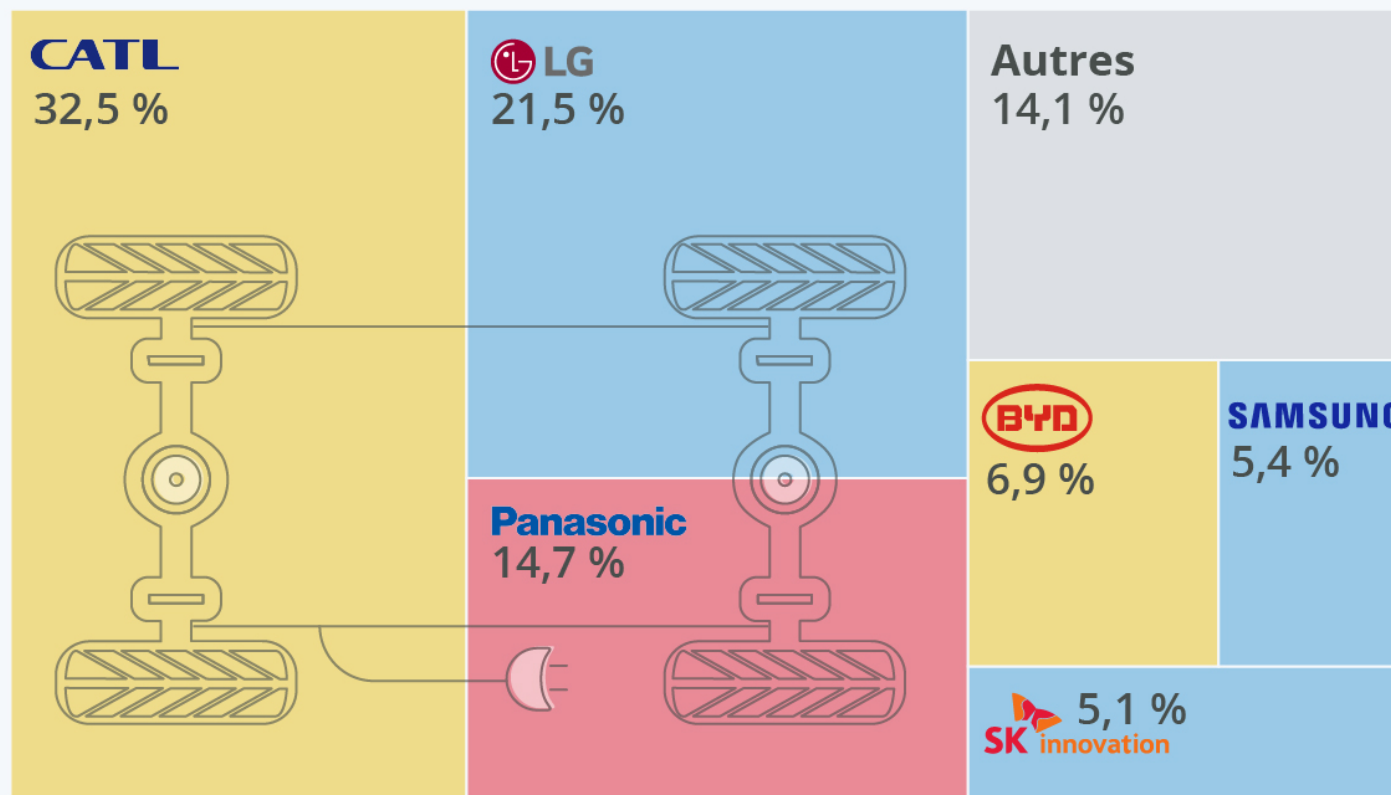
## Monde

2021: 16 million (1.5 %) - ventes : 6.6 millions  
 2040: 450 millions - ventes ~ 50 millions

# L'ASIE, championne des batteries

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

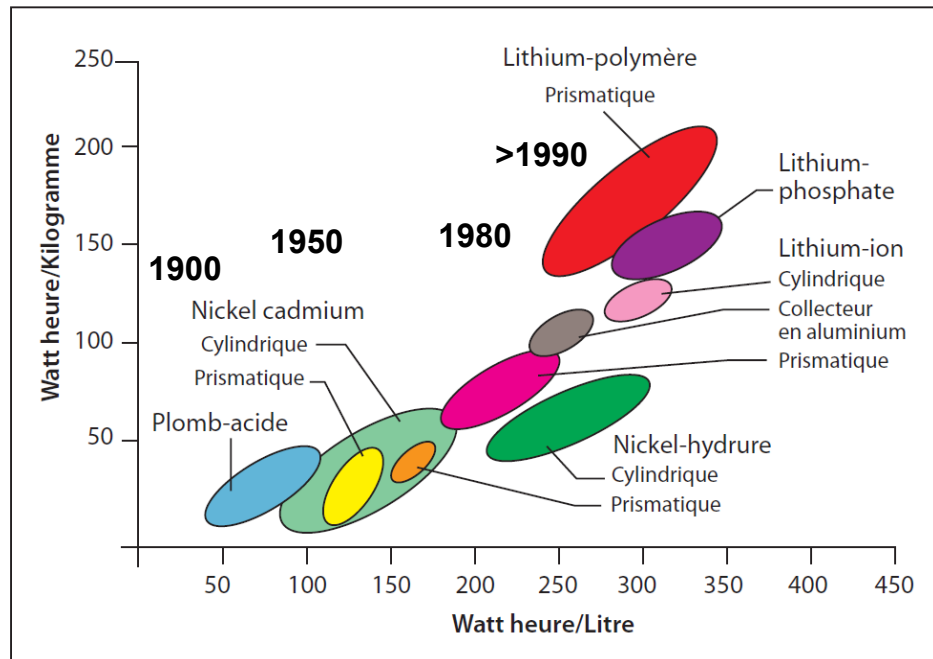
■ Chine ■ Corée du Sud ■ Japon



Sources : SNE Research, via Visual Capitalist

# Stockage électrochimique: batteries

## Vers de nouvelles technologies de batteries

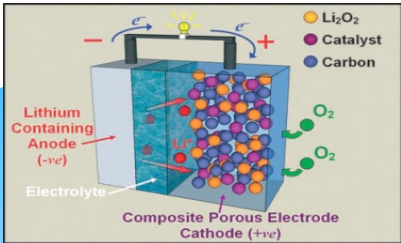


- ✓ **Augmenter la densité d'énergie (autonomie) ?**
  - Nouveaux matériaux
  - Des batteries à ions Li aux batteries « tout solide »
- ✓ **Augmenter l'écocompatibilité des batteries ?**
  - Procédés de synthèse; électrodes biosourcées
  - Batteries à ions Na et systèmes aqueux
- ✓ **Développer des batteries intelligentes ?**
  - Surveillance des batteries
  - Autoréparation des batteries
- ✓ **Récupération/recyclage**
  - Métaux (Li, Co, Mn, ...)
  - Electrolytes/solvants

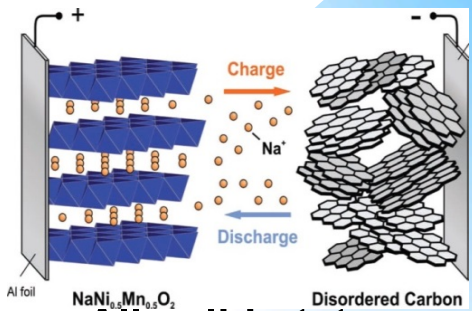
Merci à JM Tarascon

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

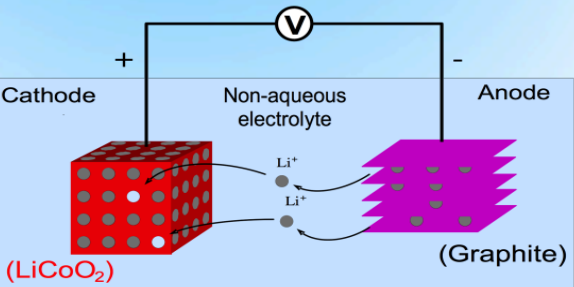
# Batteries: Innovation



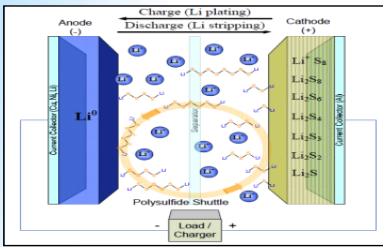
**Li/air batteries**



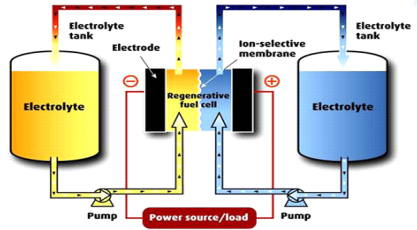
**Na-ion batteries**



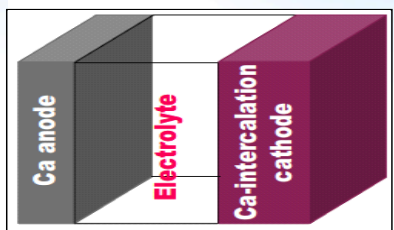
**Li-ion batteries**



**Li/S batteries**



**Redox flow batteries**



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

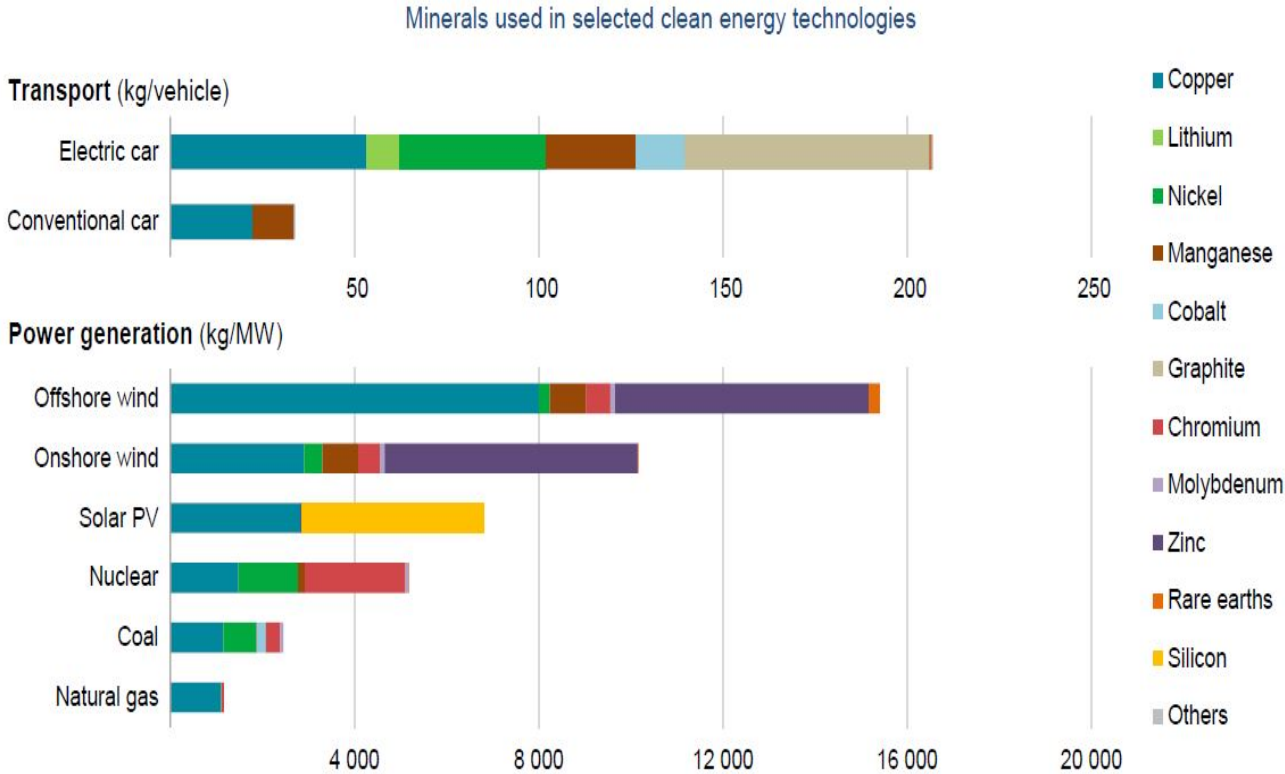
Aucune d'entre elles n'a atteint un état de maturation suffisant...

Merci à JM Tarascon

# Ressources minérales et nouvelles technologies

Cobalt, nickel, lithium, cuivre, terres rares,...

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



IEA. All rights reserved.

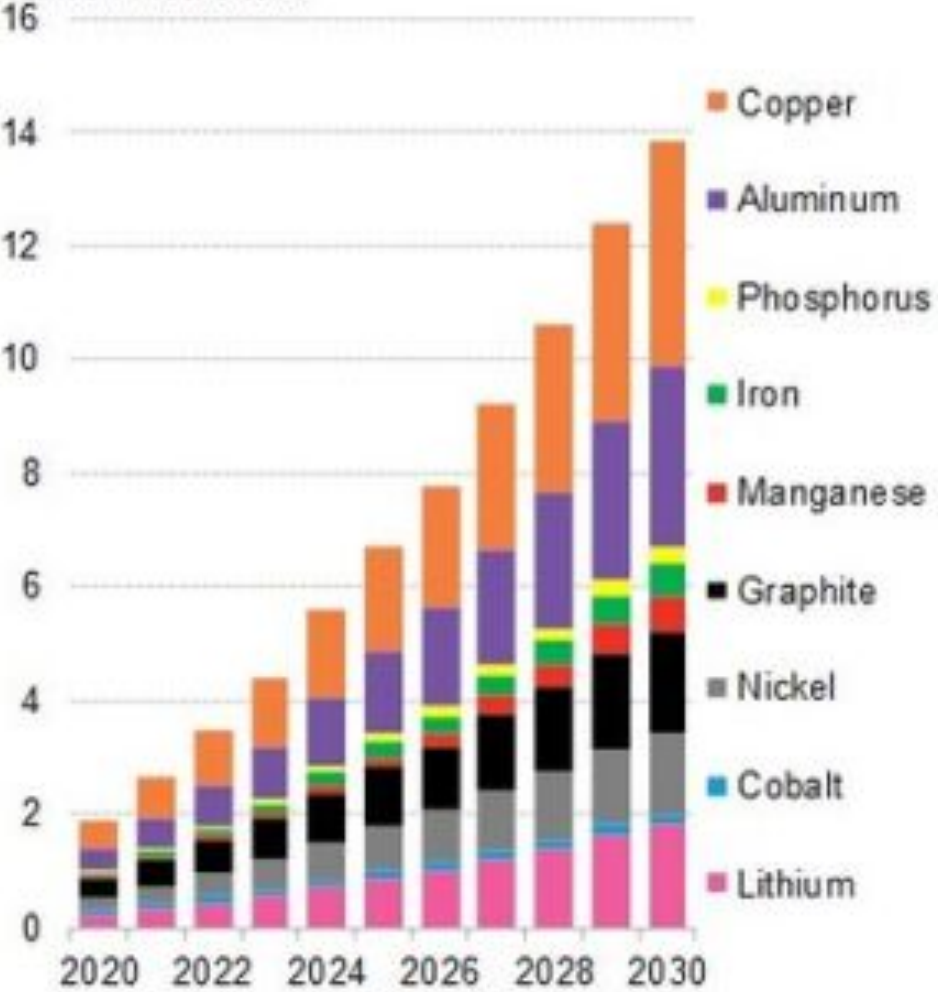
Notes: kg = kilogramme; MW = megawatt. Steel and aluminium not included. See Chapter 1 and Annex for details on the assumptions and methodologies.



# Ressources minérales et nouvelles technologies

## Global battery metals demand

Million metric tons



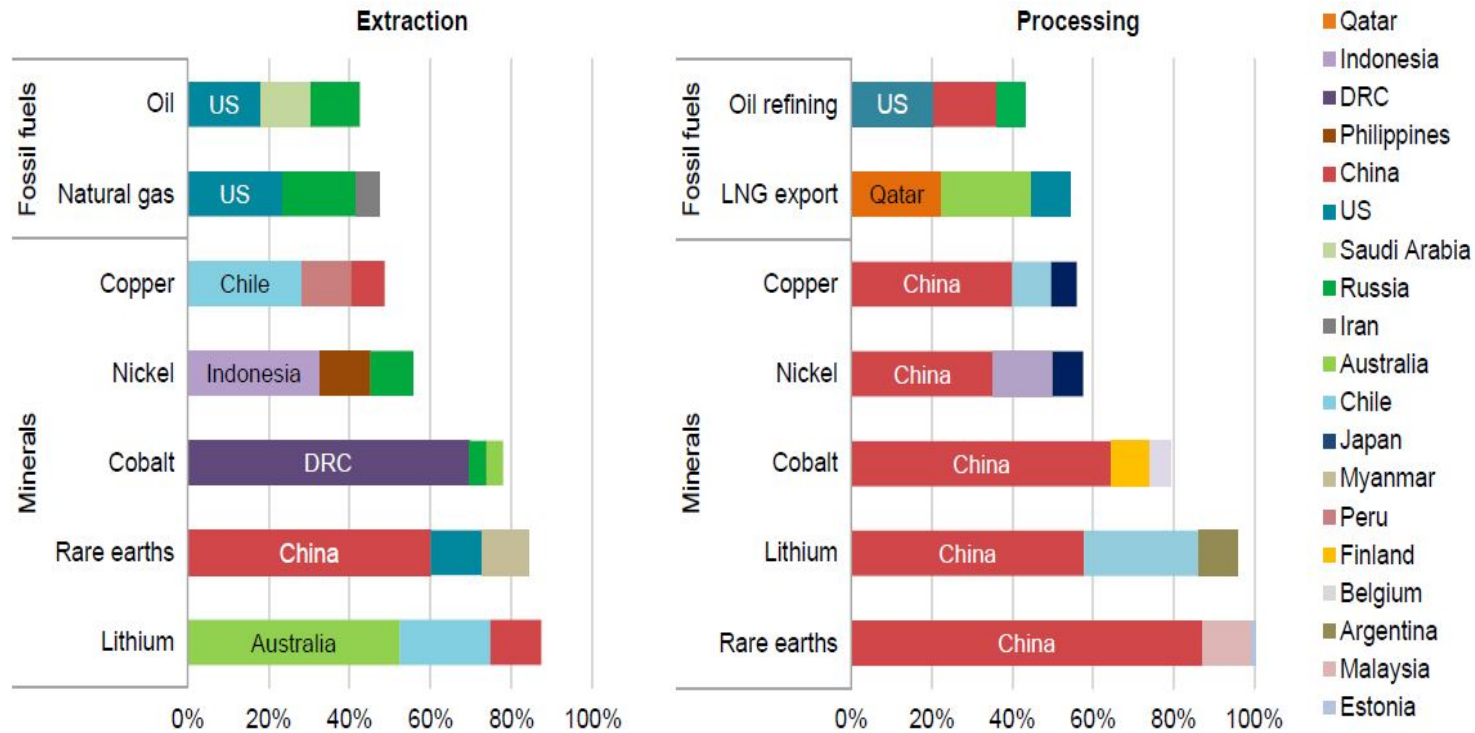
→ **Une nouvelle science:  
Récupération/recyclage**

# Ressources minérales et nouvelles technologies

## Nouvelles dépendances

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).

1. Emissions de CO<sub>2</sub>

2. Scénarios

**3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée**

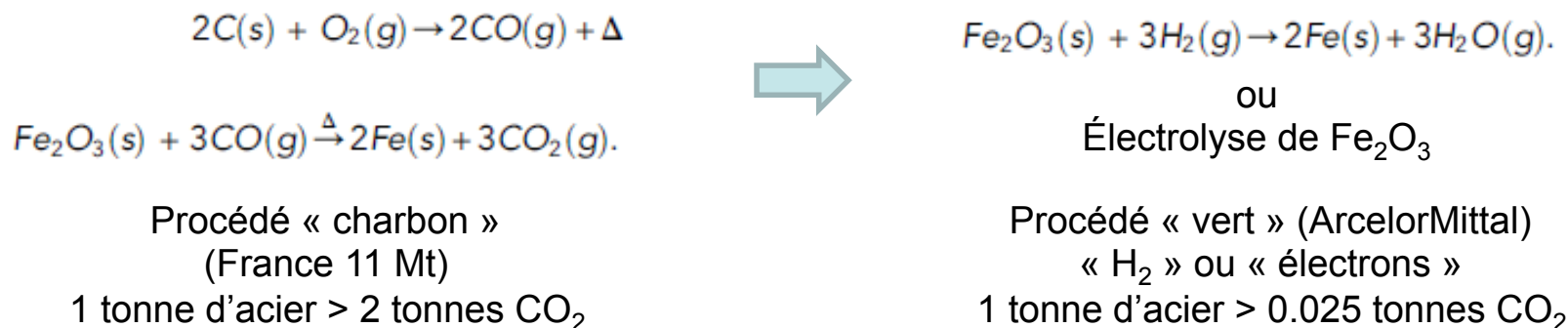
- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

4. Quelles sources d'énergie ?

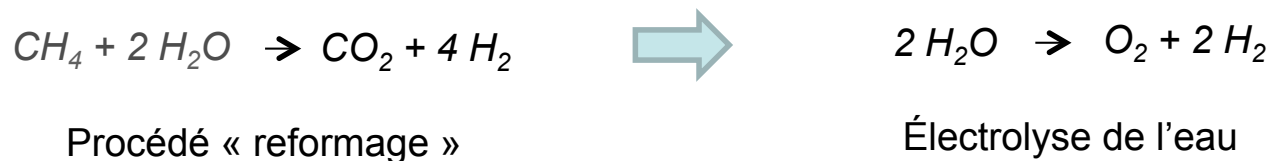
- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

## Décarboner l'industrie ?

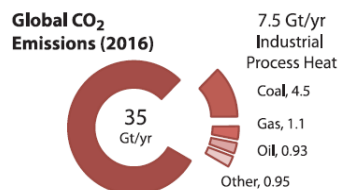
- ❑ Exemple: **l'acier- 7 à 9% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>**  
( ciment, béton ,verre, aluminium, éthylène, hydrogène,...)



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

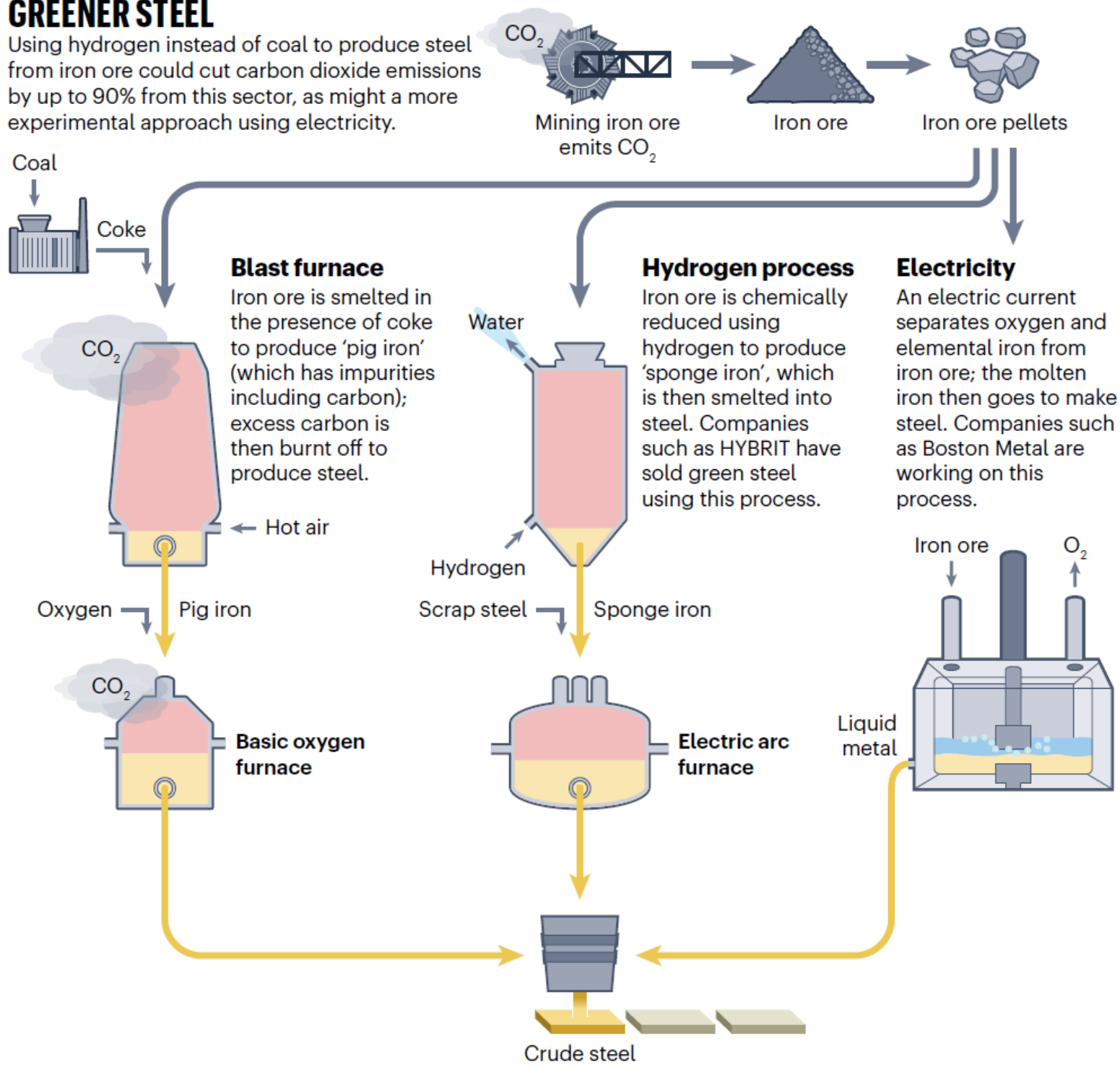


- ❑ Exemple: **production de chaleur**  
(vapeur, fours, fourneaux,.. Chauffage de fluides, distillation, séchage, réactions)  
Ex: 1400°C pour ciment et acier

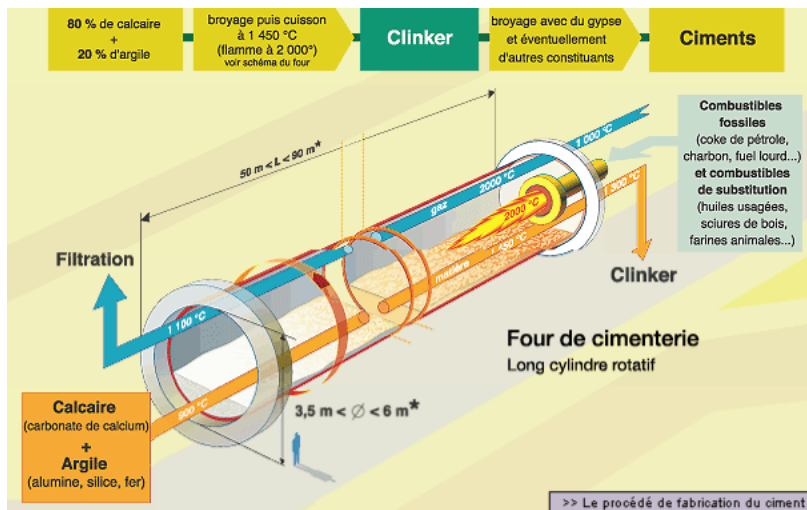
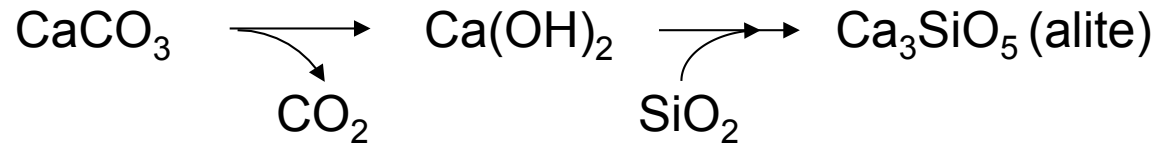


# GREENER STEEL

Using hydrogen instead of coal to produce steel from iron ore could cut carbon dioxide emissions by up to 90% from this sector, as might a more experimental approach using electricity.



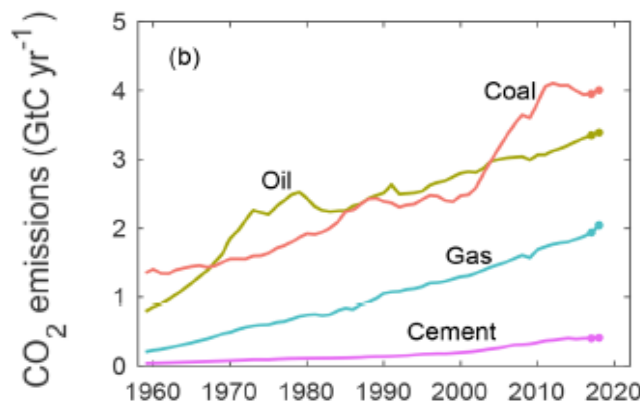
# Décarboner la production de ciment Électrifier!



➤ Production mondiale: 4 milliards de tonnes/an

➤ 6-8% des émissions de  $\text{CO}_2$  (50 % dû à l'utilisation du  $\text{CaCO}_3$ , 50 % au chauffage des fours par les combustibles fossiles)  
1 tonne ciment  $\rightarrow$  1 tonne  $\text{CO}_2$

➤ En 2060: x 2 le nombre de bâtiments (1 New York/ mois pendant 40 ans) (IEA 2017)



Global Carbon Budget 2019

➤ **Décarboner ?**

✓ Capture du  $\text{CO}_2$

✓ Carburants alternatifs

✓ Remplacer une partie du ciment pour la préparation du béton (cendres industrielles, laitiers de haut-fourneau,..)

✓ **électrifier**



1. Emissions de CO<sub>2</sub>

2. Scénarios

**3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée**

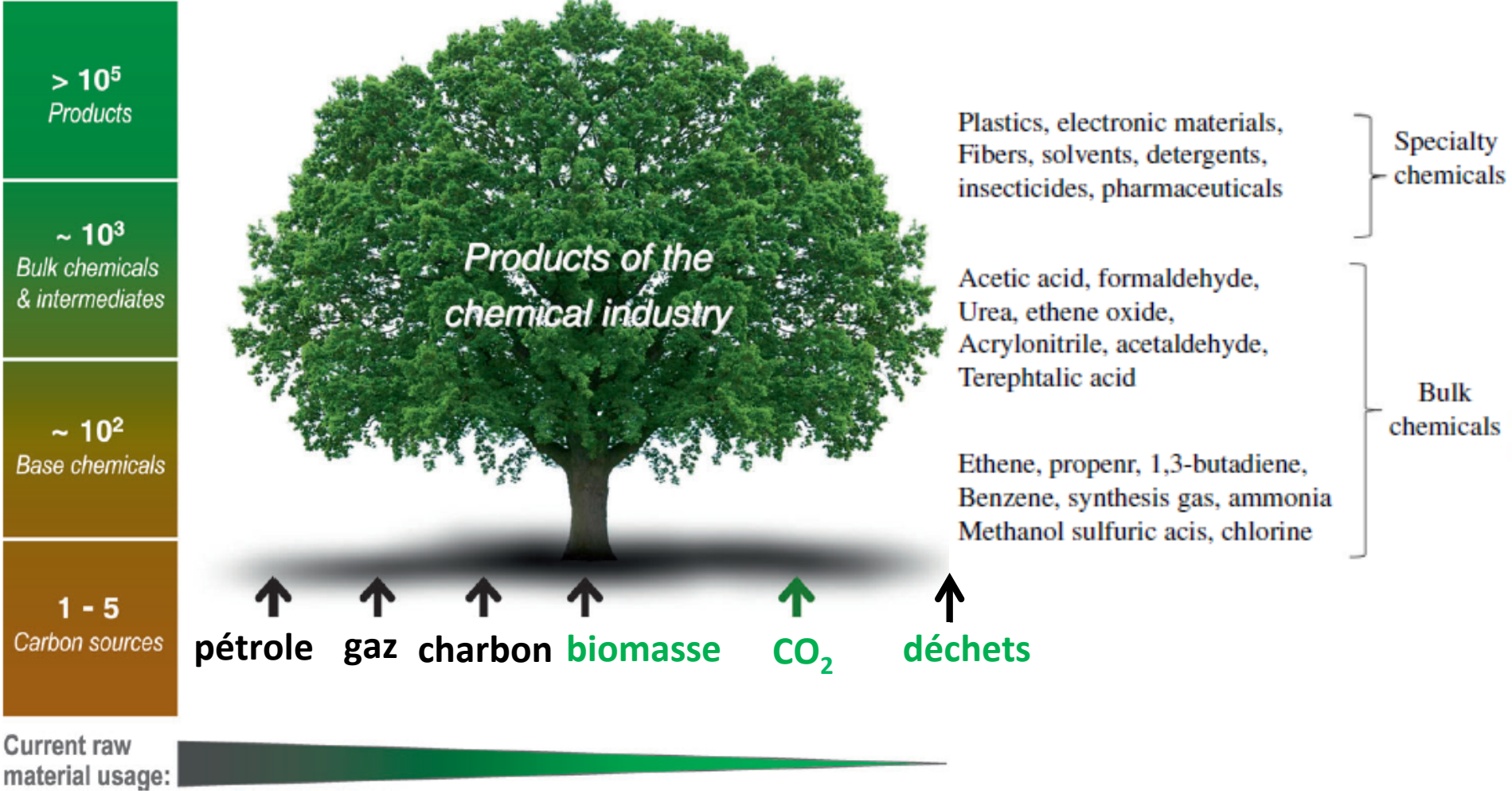
- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

4. Quelles sources d'énergie ?

- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

# Demain, quel carbone?

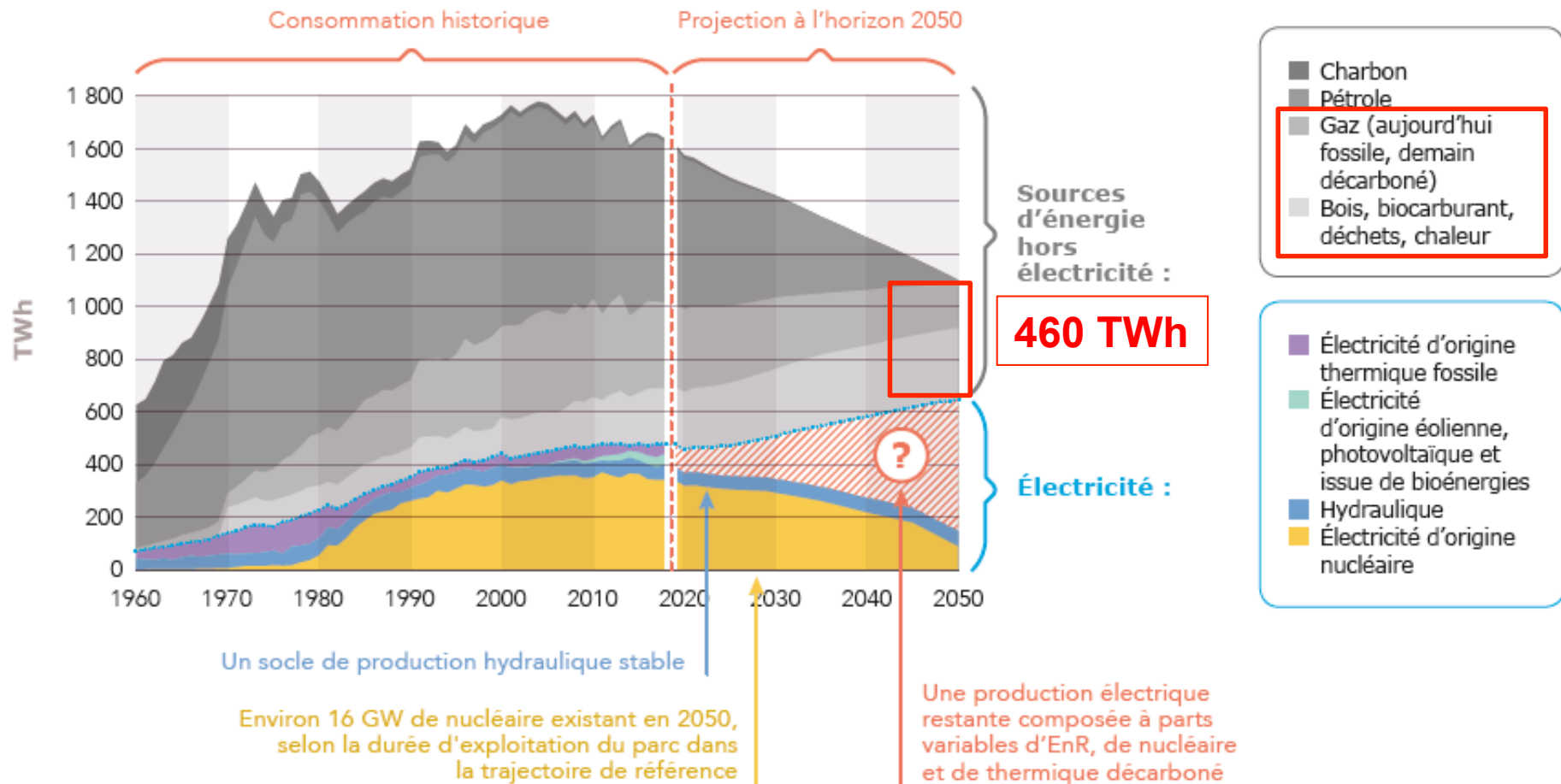
« Les sociétés resteront carbonées »  
CO<sub>2</sub> source de carbone ?



# Scénarios France 2050

# La part non électrique: biomasse + gaz décarboné

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



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

## La biomasse

De 2020  
**170 TWh**

Biocarburants 35 TWh  
Biogaz 10 TWh  
Bois 110 TWh  
Déchets 15 TWh

X 2.6

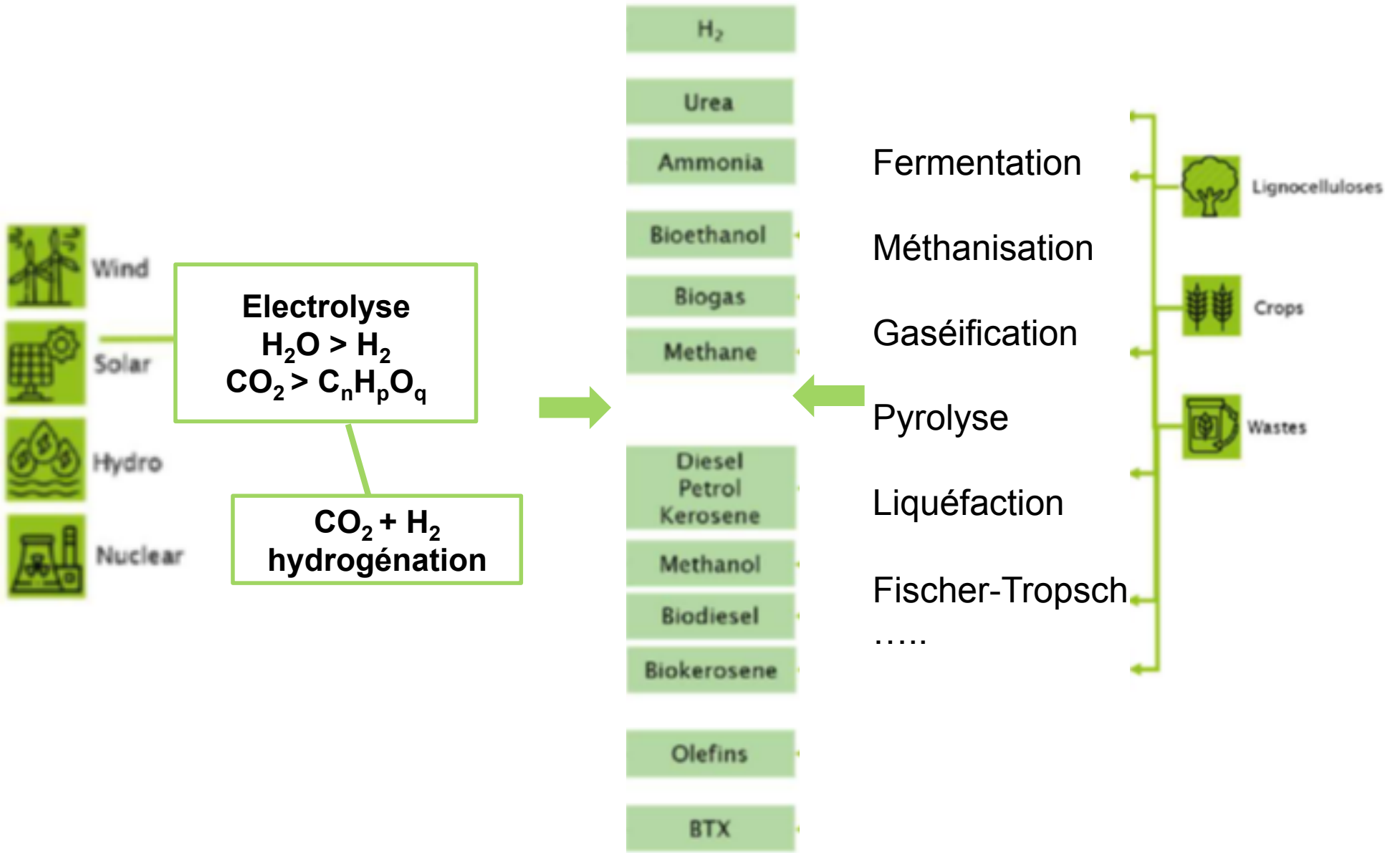


à 2050  
**460 TWh**

Biocarburants 100 TWh  
Biogaz/gaz vert 150 TWh  
Bois 130 TWh  
Déchets 80 TWh

- ✓ **Les biocarburants** (bioéthanol, biodiesels, hydrocarbures, biokerosene)
  - Développer les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération  
(Nouveaux procédés chimiques, enzymatiques et biologiques pour la déconstruction/hydrolyse des matériaux ligno-cellulosiques)
  - Développer les biocarburants de 3<sup>ème</sup> génération  
(nouvelles souches de microalgues, nouveaux photobioréacteurs)
  
- ✓ **Le biogaz** (biomasse **agricole**, déchets ménagers et industriels)
  - Amélioration des procédés (méthanisation/pyrogazéification)
  - Etude des impacts sur les sols (matière organique, fertilisation, biologie)
  - Estimation des gisements
  - Analyse environnementale (ACV) et économique
  
- ✓ **Le bois**

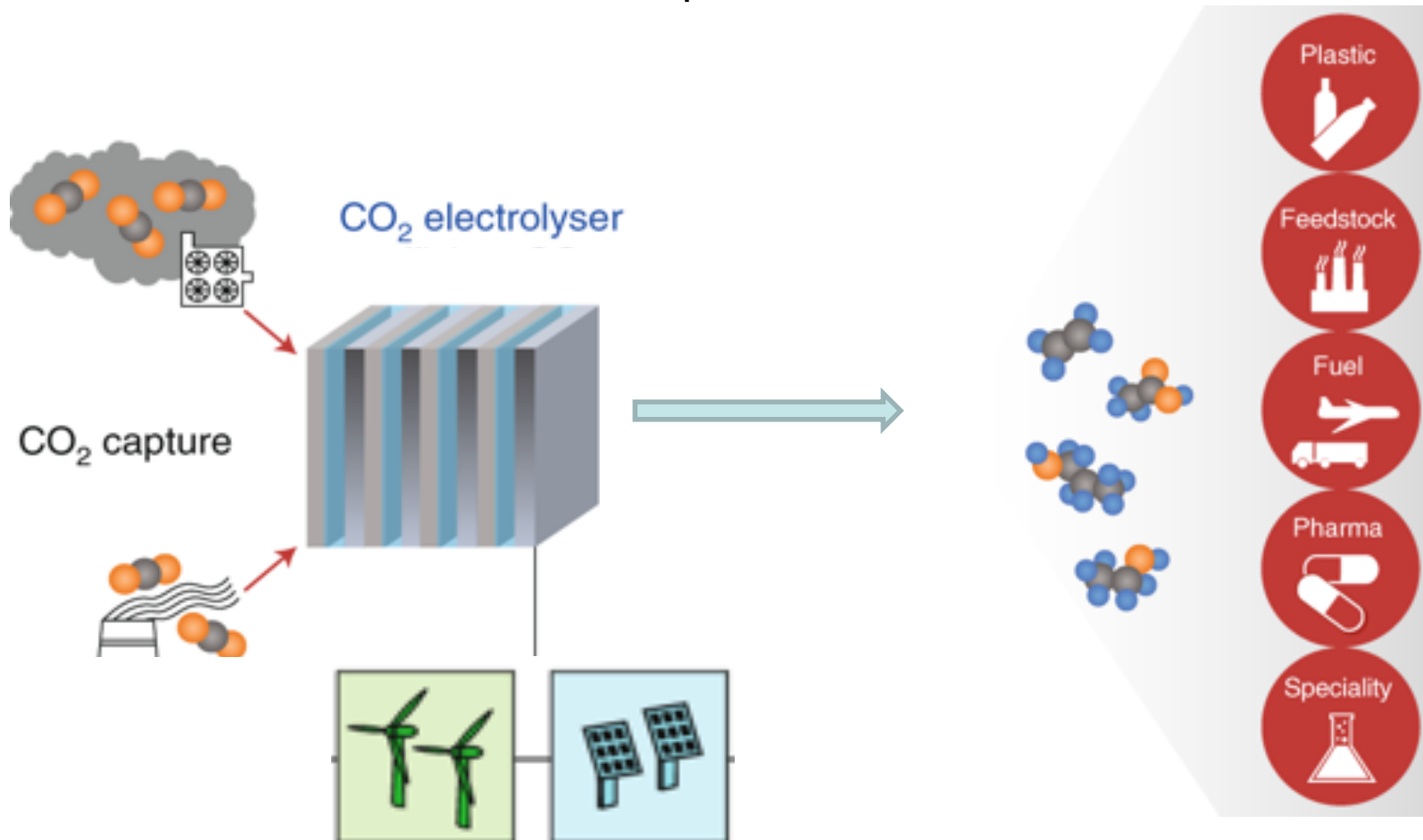
# Carburants de synthèse et biocarburants



# Recherche au Collège de France: Du CO<sub>2</sub> aux hydrocarbures

ELECTROLYSE DU CO<sub>2</sub>

- ✓ Moins de CO<sub>2</sub> 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

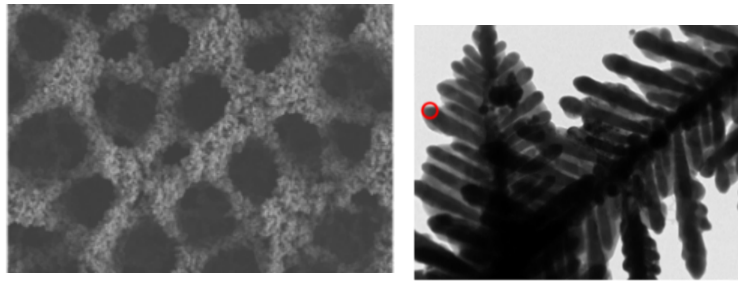
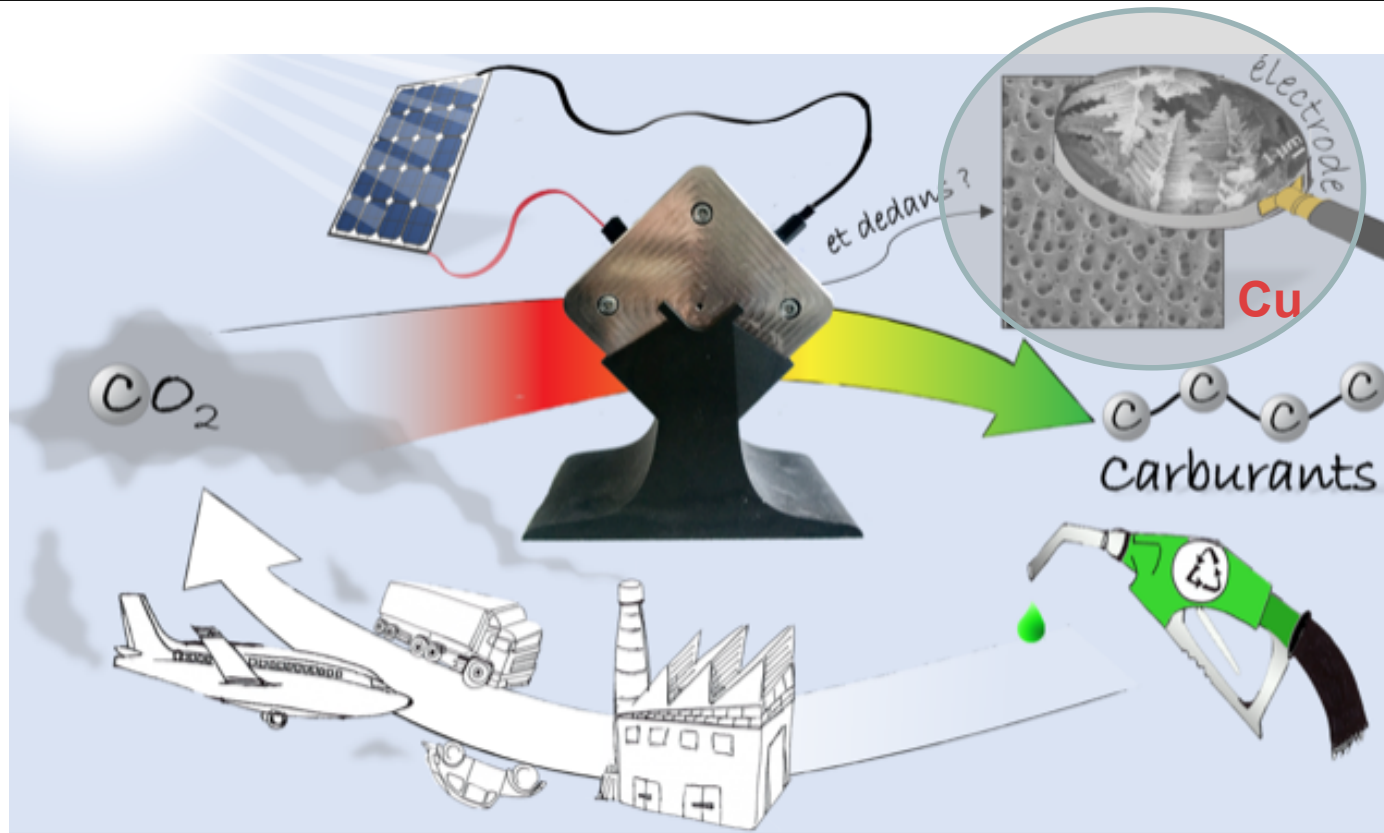
## **Actuellement**

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 CO<sub>2</sub> / tonne éthylène)



# Photosynthèse artificielle au Collège de France



Low-cost high efficiency system for solar-driven conversion of CO<sub>2</sub> 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

**Rendement énergétique: 2.3 %**



1. Emissions de CO<sub>2</sub>

2. Scénarios

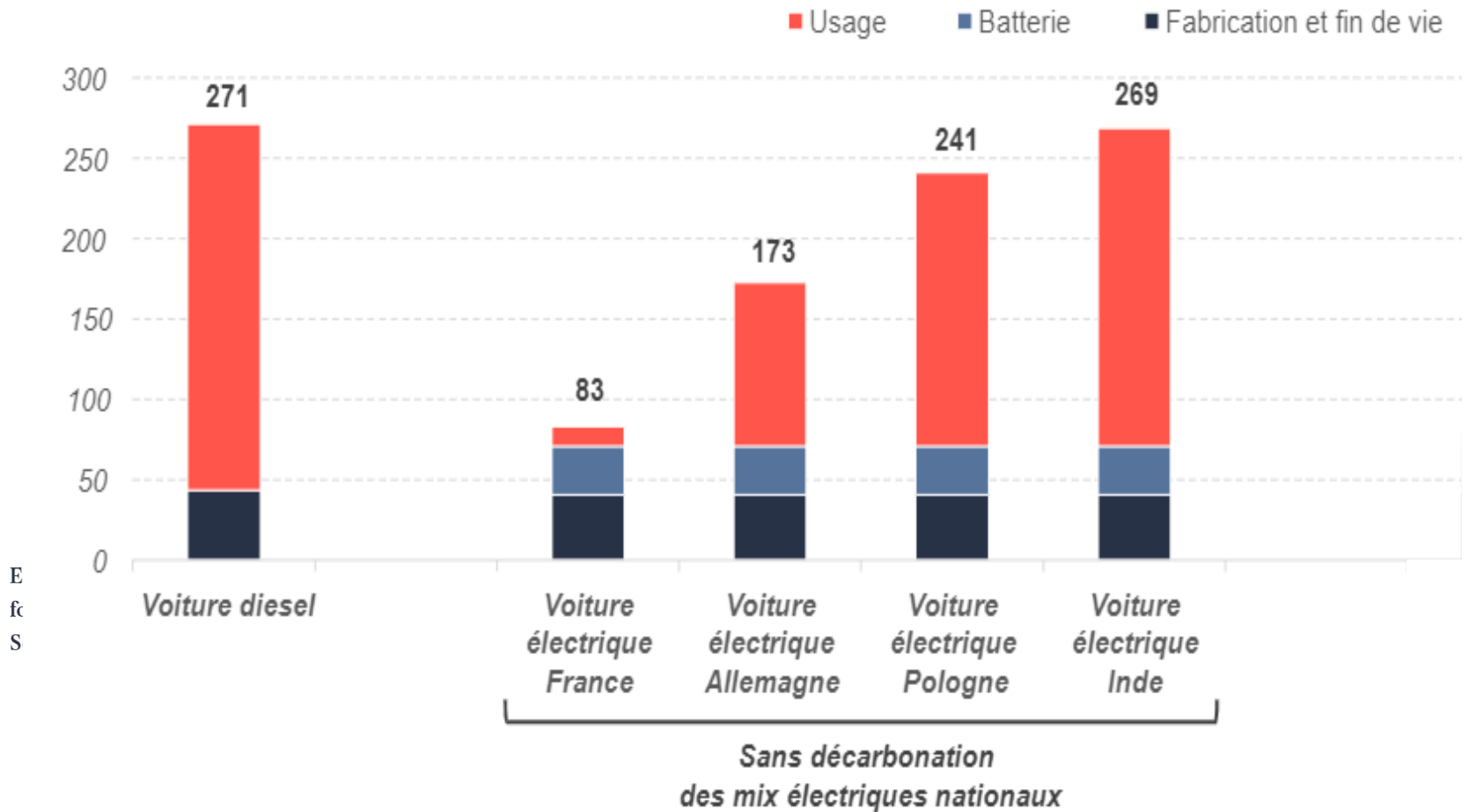
**3. Recherche/Innovation pour une énergie défossilisée**

- ✓ transport
- ✓ industrie
- ✓ « nouveau carbone »

**4. Quelles sources d'énergie ?**

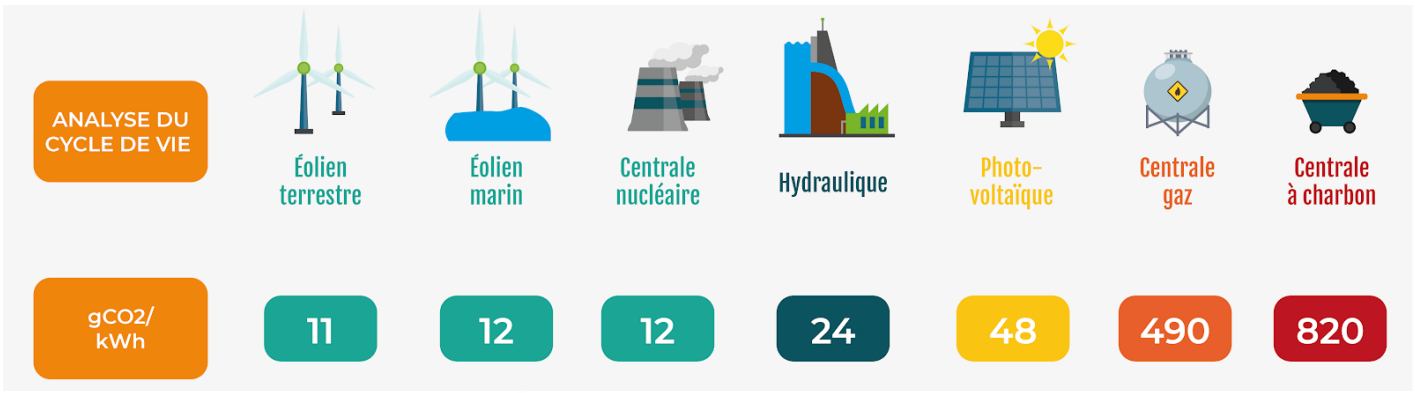
- ✓ L'énergie nucléaire
- ✓ Les énergies renouvelables électriques
- ✓ Le stockage

Changements de technologies...  
Se poser la question des sources d'énergie!  
Exemple: le véhicule électrique

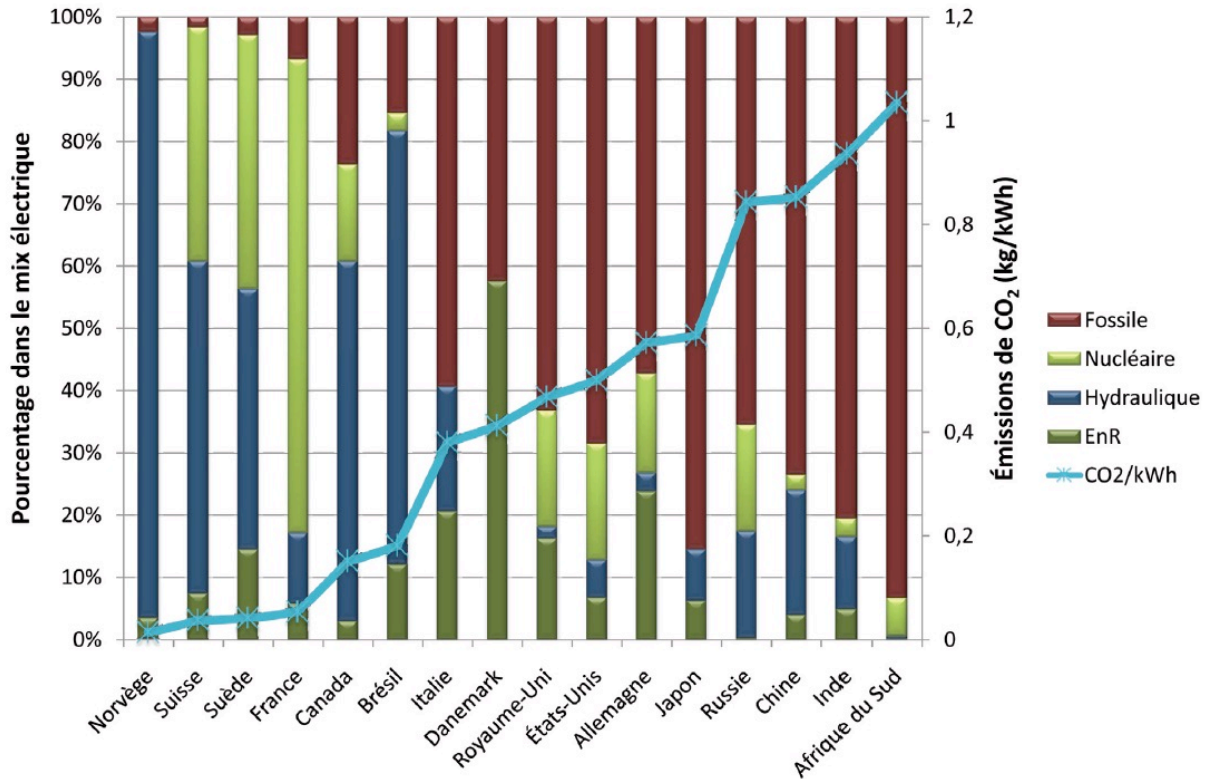
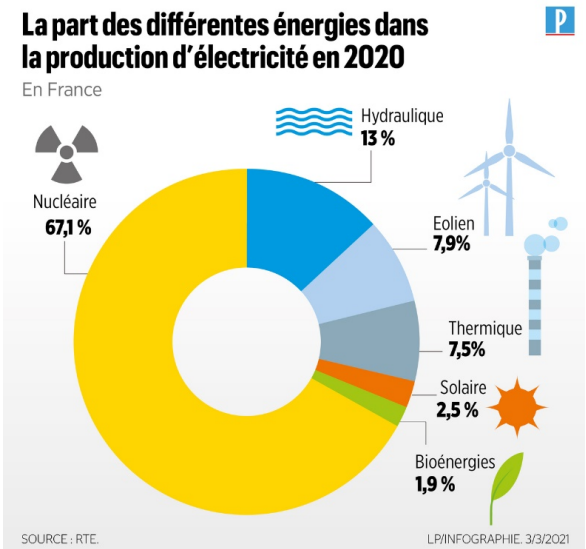


Source: étude Carbon 4

# Energie Nucléaire: une énergie bas-carbone



**France: la production électrique est à >90 % décarbonée !!**



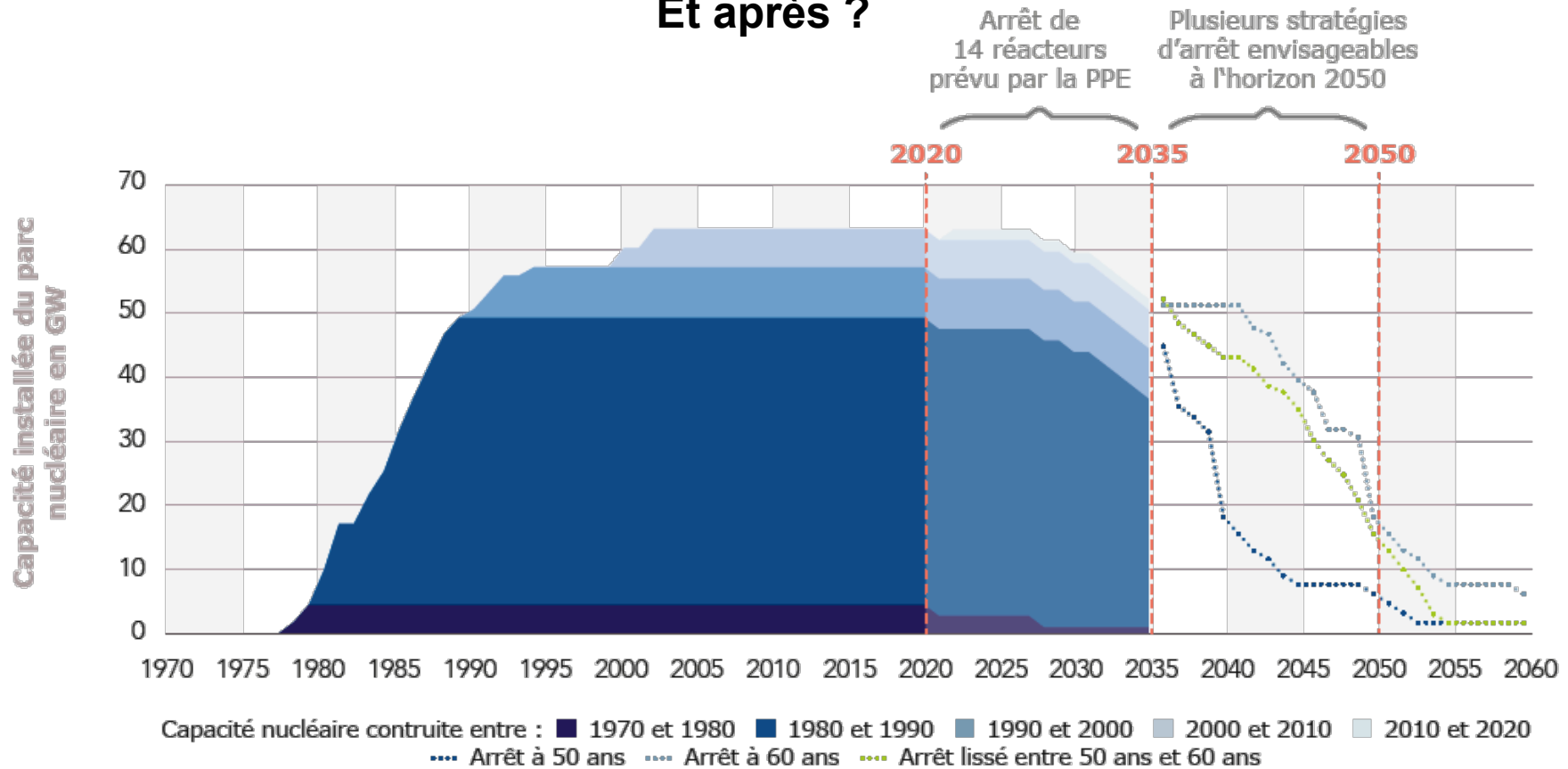
**France: 46 Mt CO<sub>2</sub>/yr**  
**Germany: 334 Mt CO<sub>2</sub>/yr**

# Energie Nucléaire

## Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)

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

Et après ?



Âge moyen des centrales: 37 ans

## Energie Nucléaire

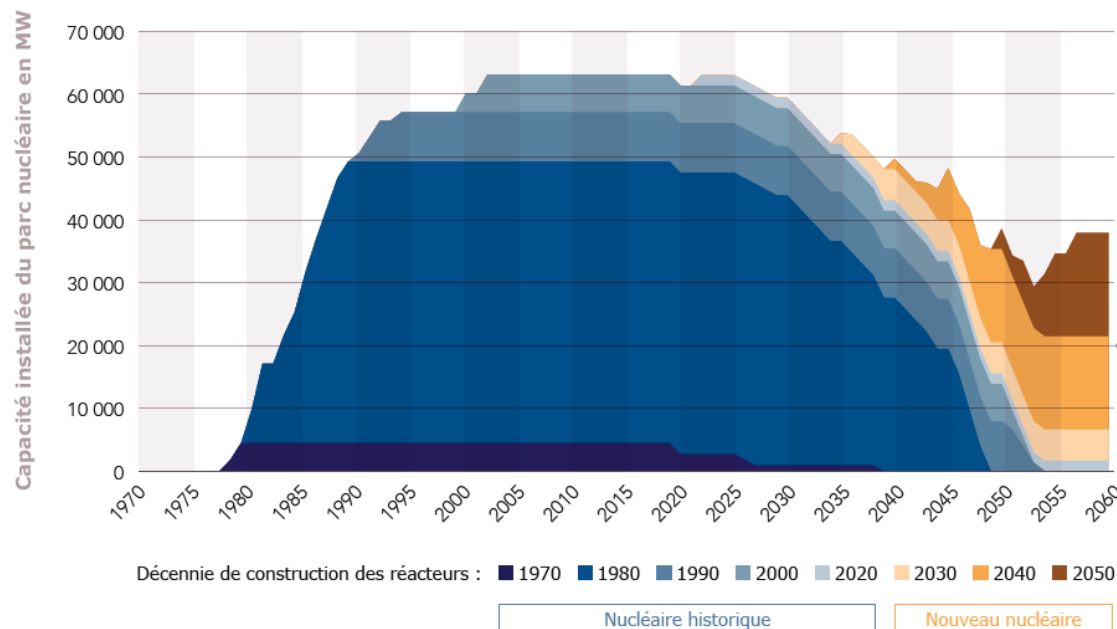
### Loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)

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

**Et après ?**

AVIS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES (8 juillet 2021)

- ✓ **Prolongation** des centrales (40 à 60 ans)
- ✓ **Construction** de nouveaux réacteurs (EPR)  
(sécurité, pilotabilité et gestion des déchets)
- ✓ Recherche et développement des **réacteurs du futur**:  
réacteurs neutrons rapides; réacteurs à sels fondus; petits réacteurs  
(fermeture du cycle électronucléaire et pilotabilité)



Construction de 14 réacteurs nucléaires entre 2035 et 2050

# Les énergies renouvelables



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

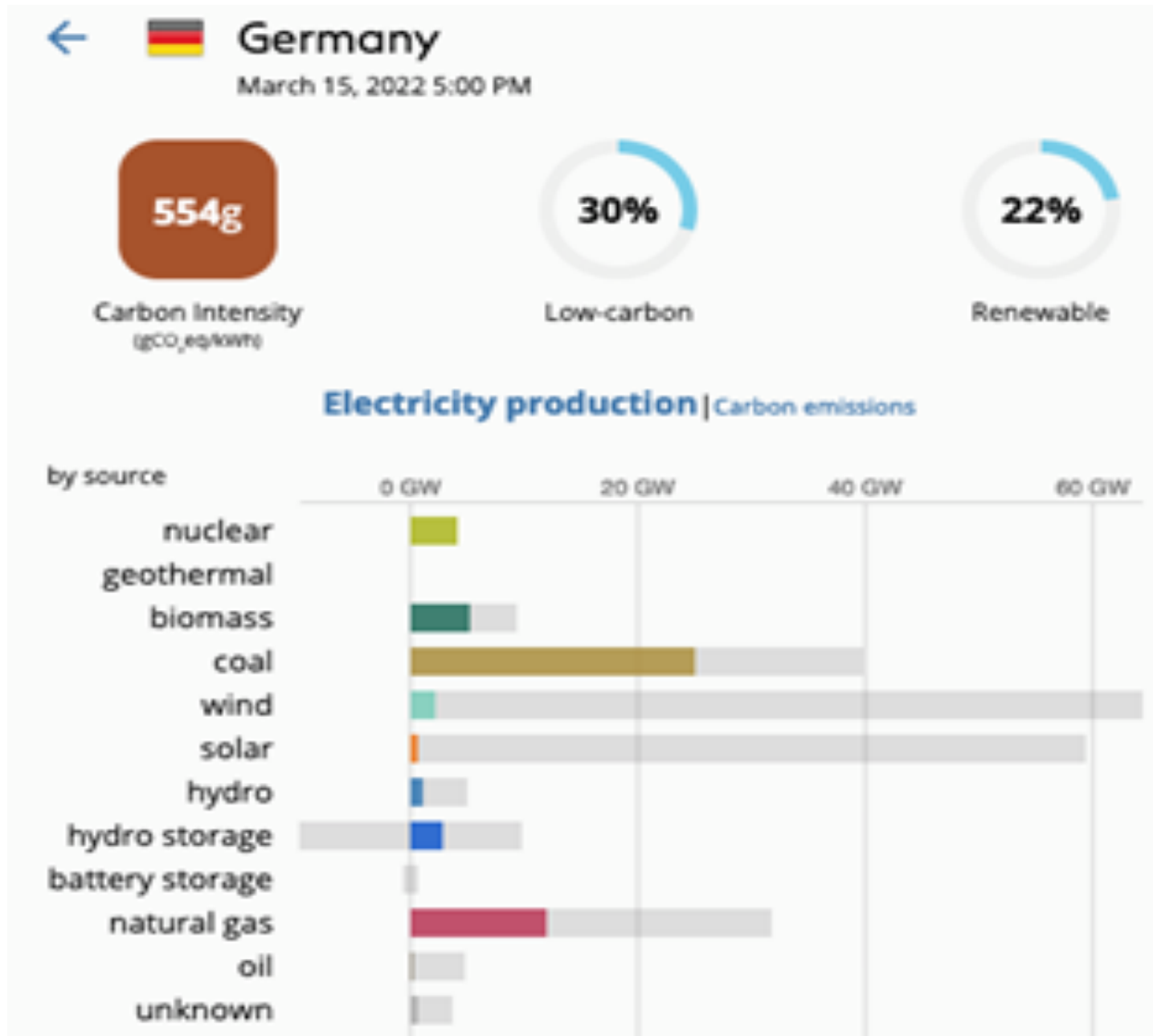


hydro



- ✓ **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
- ✓ **Energies de faible densité surfacique**
  - PV 150; Eolien 250; hydro 250; Nucléaire  $15 \cdot 10^3$  (GWh.yr<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>)
  - 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)

# L'Allemagne: exemple?



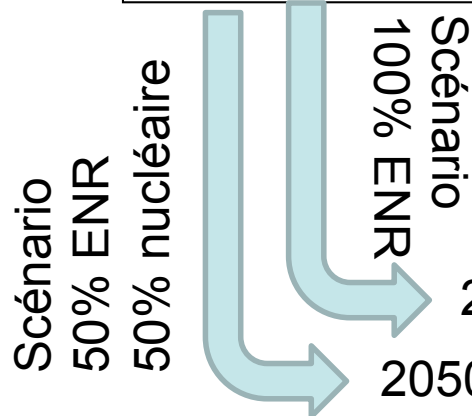
# Équilibre offre/demande-stabilité du réseau STOCKER les ENR



**INTERMITTENCE**  
(nuages, nuit,..)



**STOCKAGE  
de l'ENERGIE**



2020 (11 TWh/an):

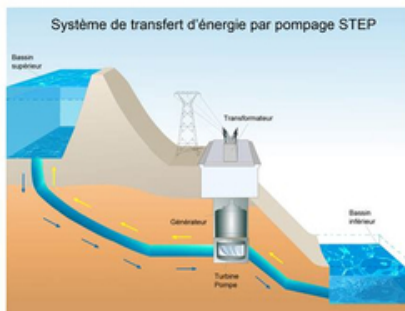
- Stockage hydraulique STEP**
- Centrales thermiques pilotables
- Échanges trans-frontaliers

2050 (120-150 TWh/an):

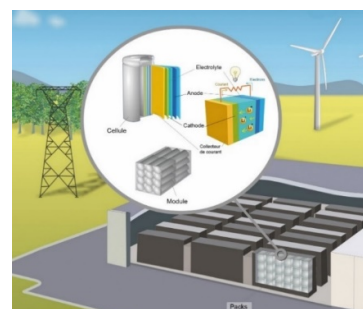
2050 (50-70 TWh/an):

## Moyens de flexibilité:

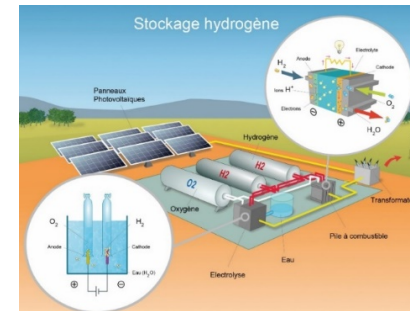
- STEP
- Échanges trans-frontaliers
- Flexibilité de la demande
- Stockage électrochimique
- Stockage chimique (H<sub>2</sub>)
- Centrales pilotables (réacteurs nucléaires, centrales à gaz décarboné)



STEP



batteries



hydrogène



Voilà pourquoi il faut un mix électrique:  
Nucléaire + ENRs + stockage



Et pour la part non électrique.....

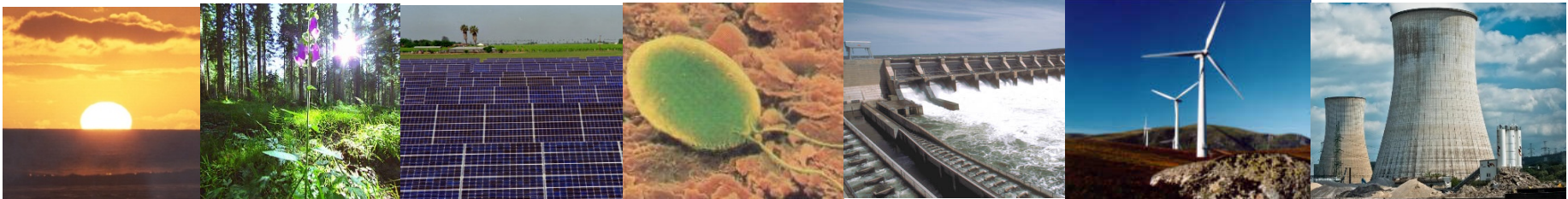
- Du carbone renouvelable (biomasse, CO2)
- Du biogaz
- De l'hydrogène
- et probablement du **GAZ NATUREL**



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

## CONCLUSION:

- Quelle baisse CREDIBLE de consommation d'énergie?
- Quelle proportion REALISTE d'électricité?
- Quel mix électrique de production d'énergie ?
- Quels besoins en stockage d'énergie (volume et infrastructures) ?
- Comment construire un CONSENSUS sur une trajectoire REALISTE ?
- ADAPTATION au changement climatique: un nouveau paradigme



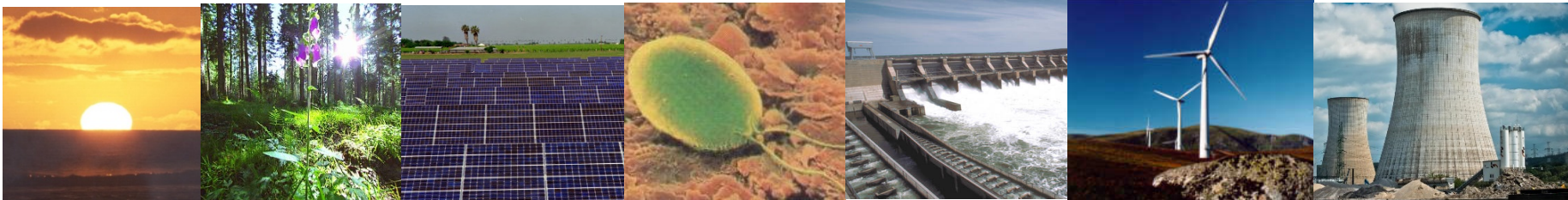


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

# Recherche et Innovation pour la transition énergétique:

**Marc FONTECAVE**

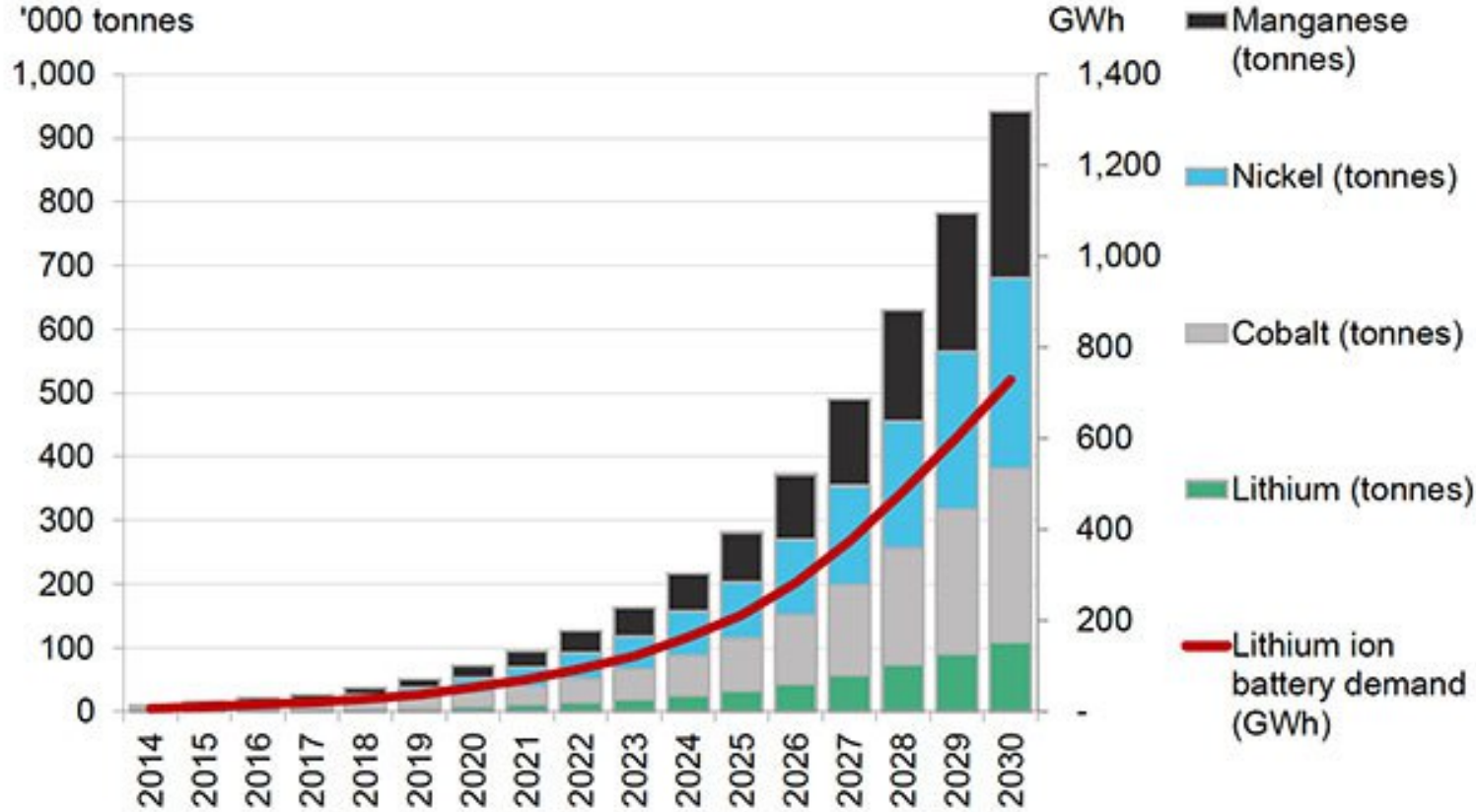
*Professeur au Collège de France  
Président du Comité de Prospective en Energie  
(Académie des Sciences)*





# Ressources minérales et nouvelles technologies

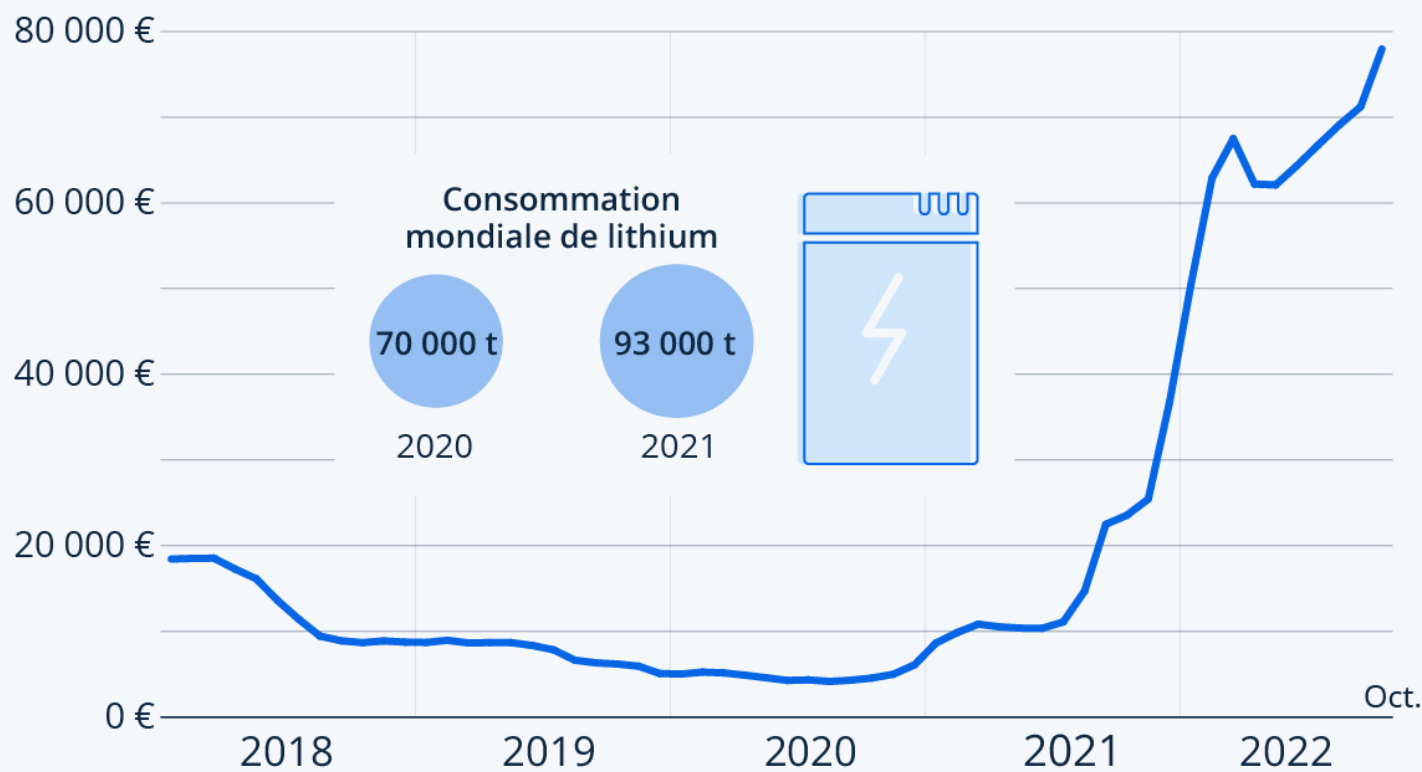
Figure 13: Global lithium-ion and materials demand forecast from EV sales, 2015–2030 (thousands of tonnes, GWh)



Source: Bloomberg New Energy Finance

# Lithium : la flambée de l'or blanc

Prix d'une tonne de carbonate de lithium négocié en Chine de janvier 2018 à octobre 2022 (moyenne mensuelle) \*



\* conversion yuan chinois/euro aux taux de change moyens mensuels.

Sources : Investing.com, U.S. Geological Survey

