
La politique énergétique française

Marc Fontecave

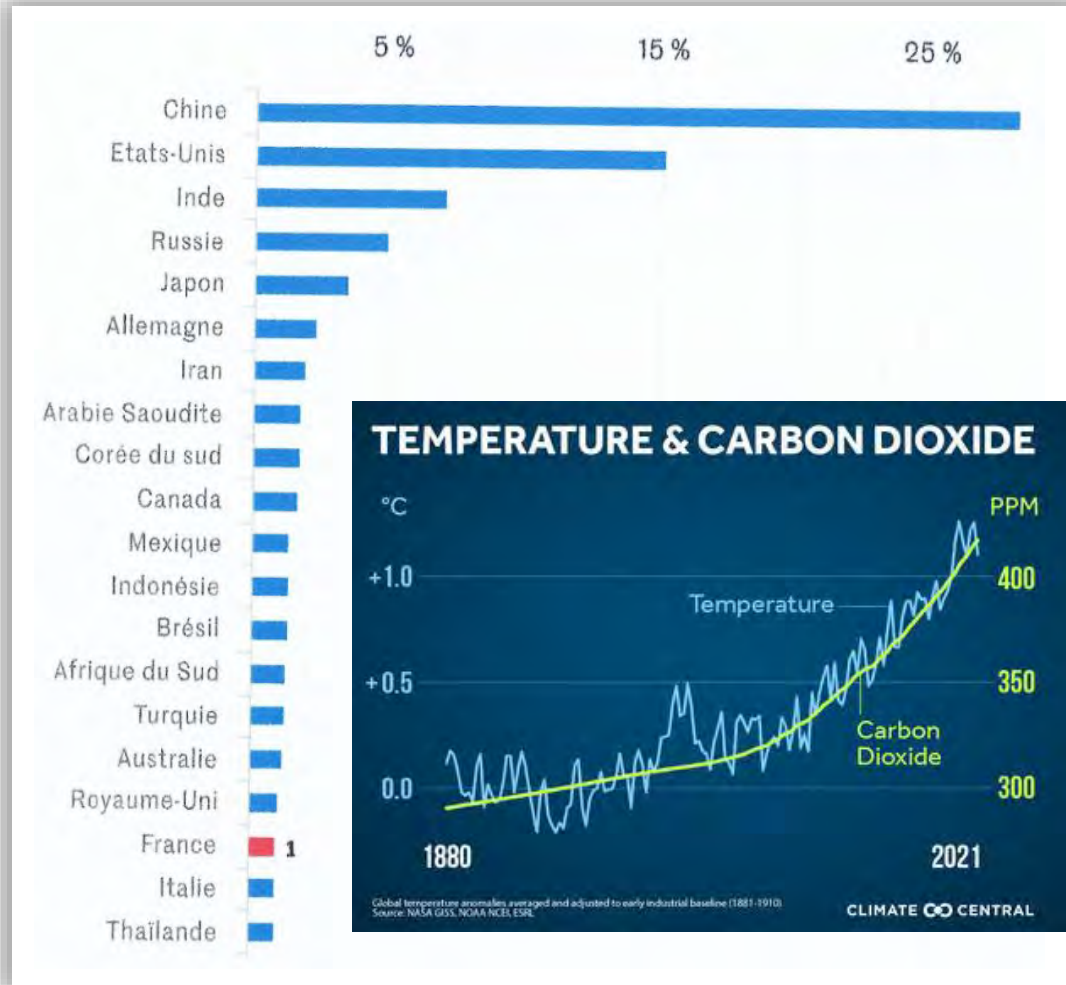
Professeur au Collège de France



ZÉRO-CARBONE (2050) : VRAIMENT ?

Une question globale

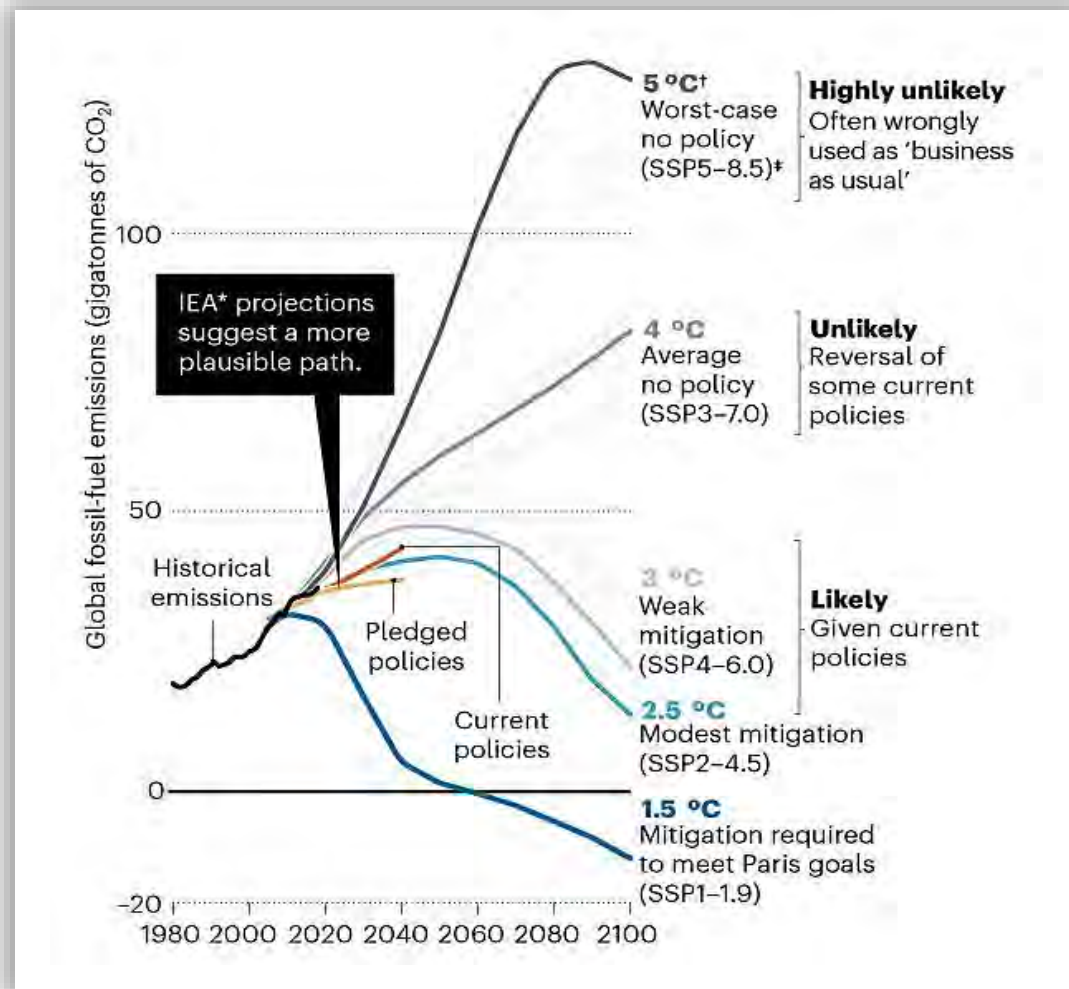
Demain, encore des fossiles



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

1,5°C (2100) : VRAIMENT ?

Plutôt 2,5-3 °C



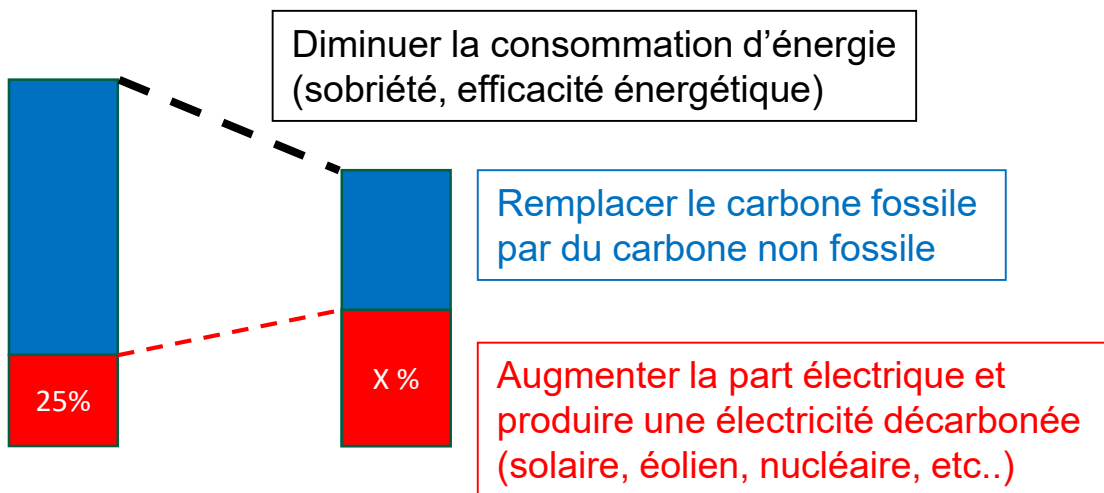
Adaptation au changement climatique !

- Rénovation de l'habitat- Climatisation-végétalisation
- Protection des infrastructures (usines, services publics,...)
- Protection des systèmes énergétiques
- Aménagement du territoire (littoral, zones inondables, à risque)
- Nouvel urbanisme (débitumisation, végétalisation, éclaircissement des toitures, réseaux de froid, mobilités, etc..)
- 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,..)
- Assurances (indemnisations catastrophes)

➔ **Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (fin 2023)**

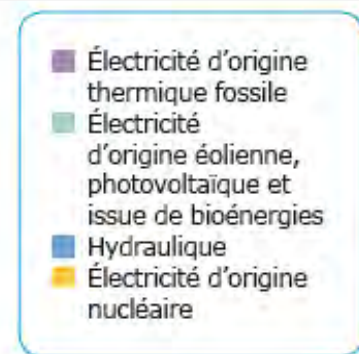
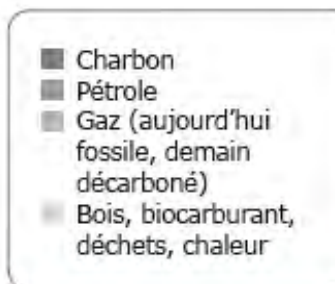
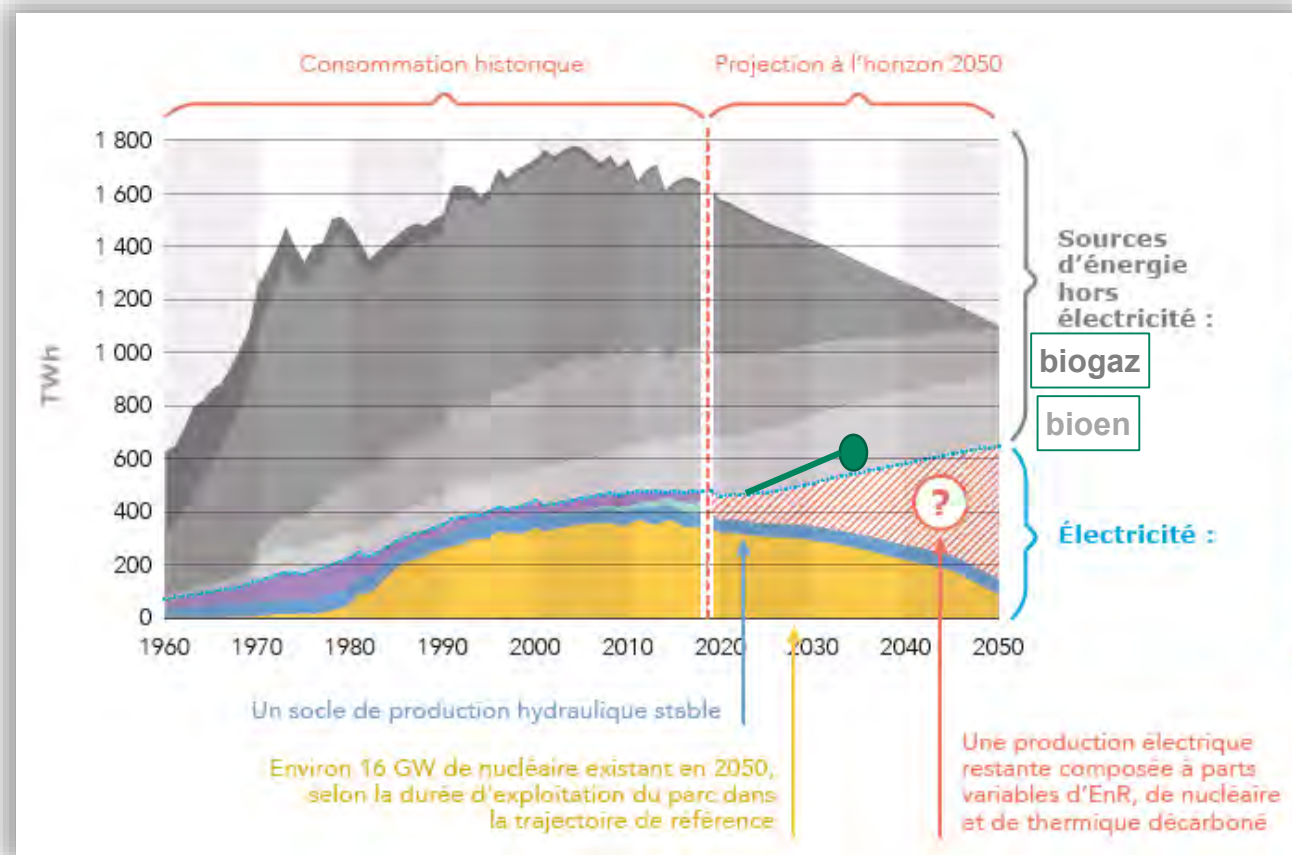
SCENARIOS 2050 (France)?

Scénario de référence RTE



Deux enjeux majeurs de la transition:

- ✓ augmenter la consommation électrique (470 TWh à 550-640-750-900 TWh ??)
- ✓ Trouver de nouvelles sources de carbone (au moins 400 TWh)



STRATEGIE POUR L'ENERGIE ET LE CLIMAT (France)

Mercredi 21 Novembre 2023 > Loi de programmation 2024

Diminution de la part des fossiles dans la consommation d'énergie

60% (2023) > 42% (2030) > 29% (2035)

Diminution de notre consommation d'énergie

- 40-50% (-640 à -800 TWh) entre 2021 et 2050 soit 1600 TWh > **800-1000 TWh (2050)**

- 30 % (-500 TWh) entre 2012 et 2030 soit 1700 TWh > 1200 TWh (2030)

Augmentation de la production d'électricité

+ 22% (+ 100 TWh) entre 2021 et 2035 soit 470 TWh > 570 TWh (2035)

+ 55% (+ 260 TWh) entre 2021 et 2050 soit 470 TWh > 730 TWh (2050)

STRATEGIE POUR L'ENERGIE ET LE CLIMAT (France)

Mercredi 21 Novembre 2023 > Loi de programmation 2024

Installation massive de capacités d'ENRs

Eolien + 18 GW (éolien en mer)* d'ici 2035 soit 17 GW > 35 GW (2035)

PV + 60 GW d'ici 2035 soit 15 GW > 70 GW (2035)

* l'équivalent de 36 parcs de type Saint Nazaire!!

Relance du nucléaire

Prolongation du parc nucléaire au-delà de 50 ans (voire 60 ans)

6 Nouveaux EPR et décision pour 8 supplémentaires en 2026

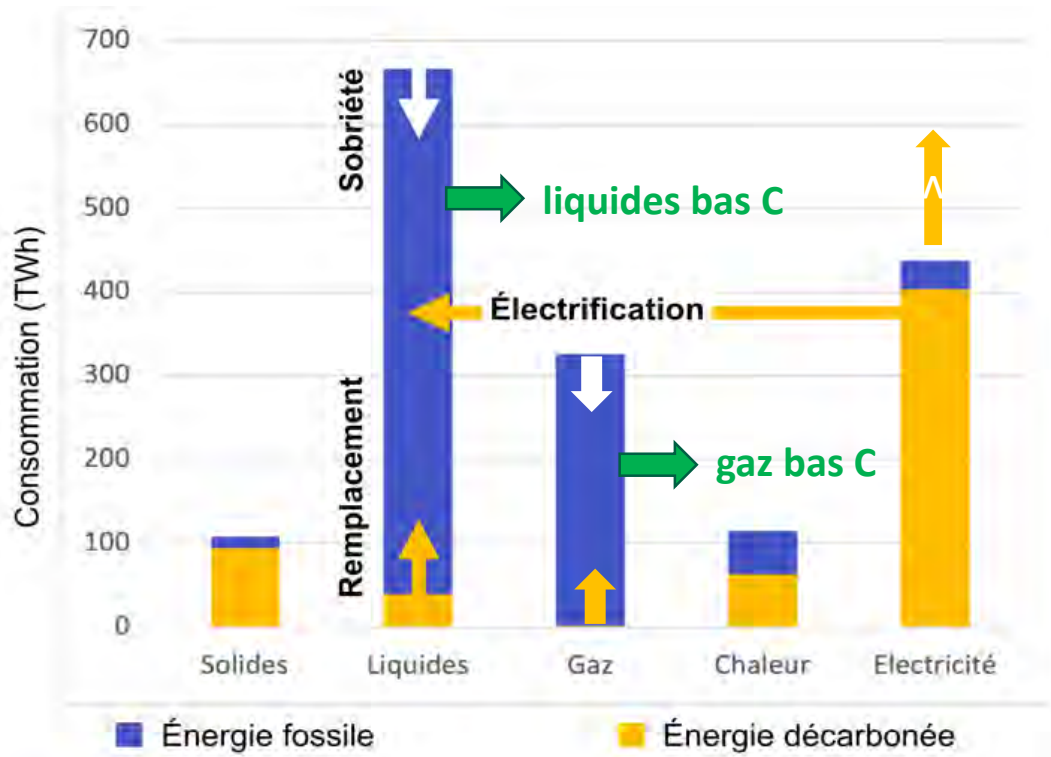
Lancement d'un premier SMR (2030)

Développement du biogaz

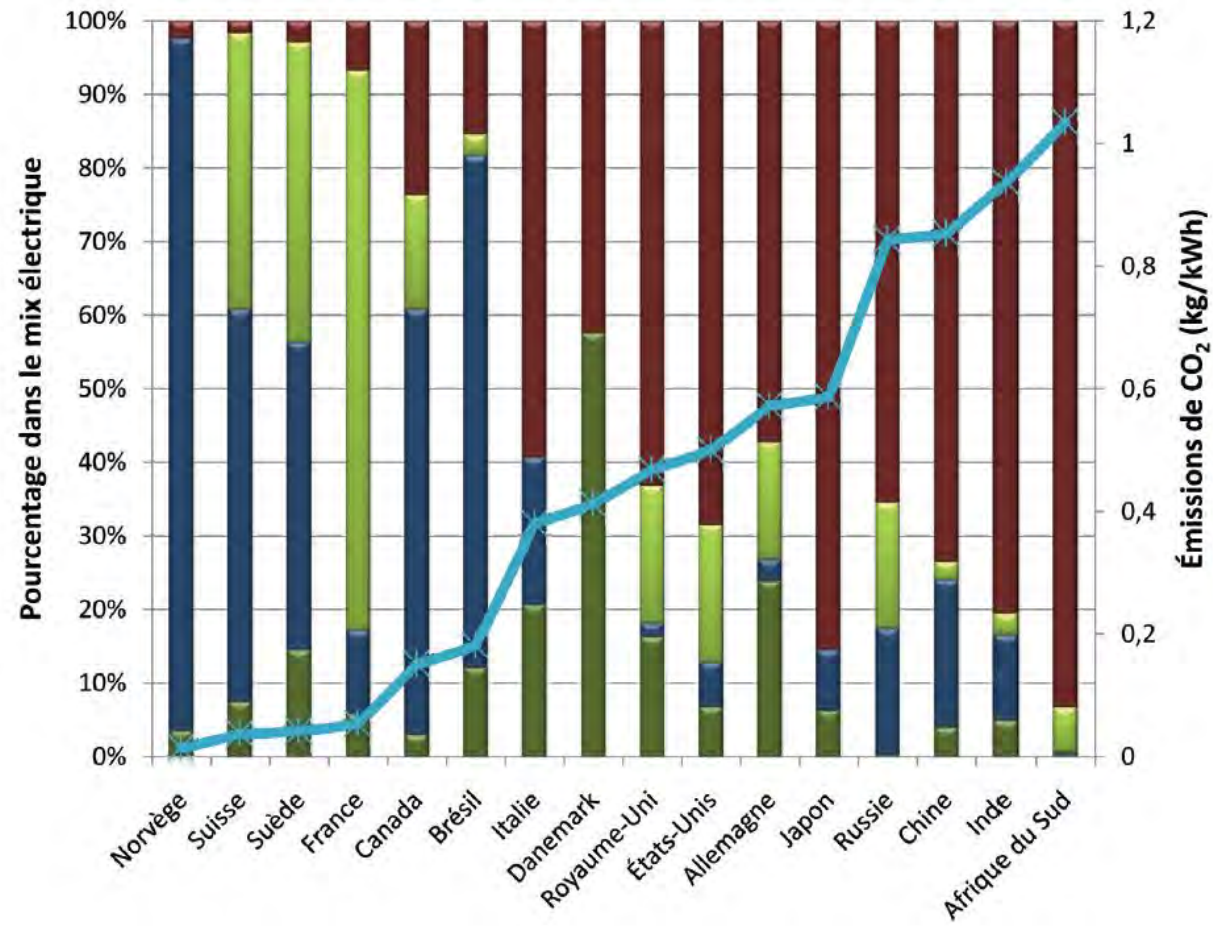
X 5 les capacités d'ici 2030 soit 10 TWh > 50 TWh (2030)

ELECTRICITE BAS CARBONE

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



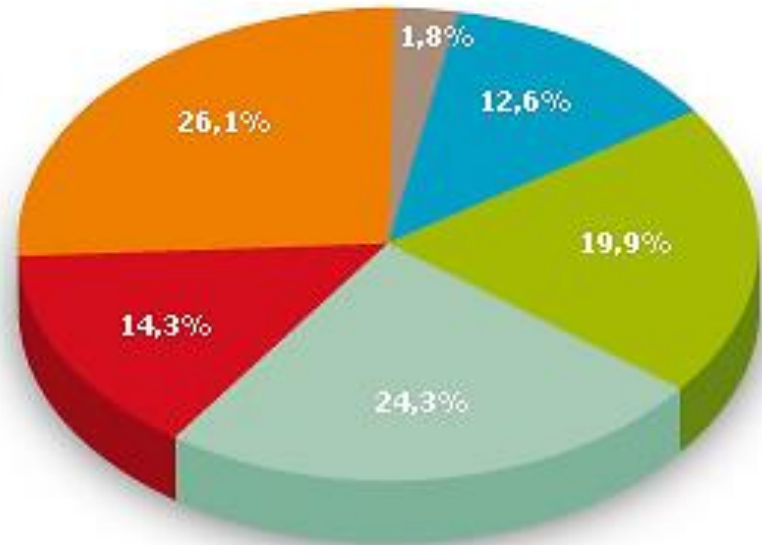
Répartition de la consommation finale suivant les différentes formes matérielles de l'énergie et entre fossiles (bleu) et sources bas carbone (jaune). Unité TWh



DÉFOSSILISER = ÉLECTRIFIER

Les secteurs émetteurs de CO₂

Défossiliser = électrifier



Habitat

- **Électrification** du chauffage (PAC)
- Rénovation thermique
- Nouveaux matériaux de structure, isolants

Transports

- **Electrification**
- Nouvelles batteries
- Nouveaux matériaux composites/plastiques

Industrie

- Nouveaux procédés de production (**électrification**) (acier, ciment, verre, aluminium, éthylène, chlore, papier,...)
- **Electrolyse** de l'eau (H₂)
- Production **électrique** de chaleur (fours électriques,...)

QUEL MIX ÉLECTRIQUE ?



Avis de l'Académie des Sciences (2021)

- Prolongation des centrales (40-80 ans)
- Construction de nouveaux réacteurs (EPR-SMR)
- Recherche et développement des réacteurs du futur : réacteurs neutrons rapides (RNR)

QUEL MIX ÉLECTRIQUE ?



Demain un mix complexe

Les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydroélectricité)

- intermittence
- Stockage d'énergie ?

L'énergie nucléaire

- EPR/SMR: combien ??
- RNR (4^{ème} génération) ??

L'énergie hydroélectrique

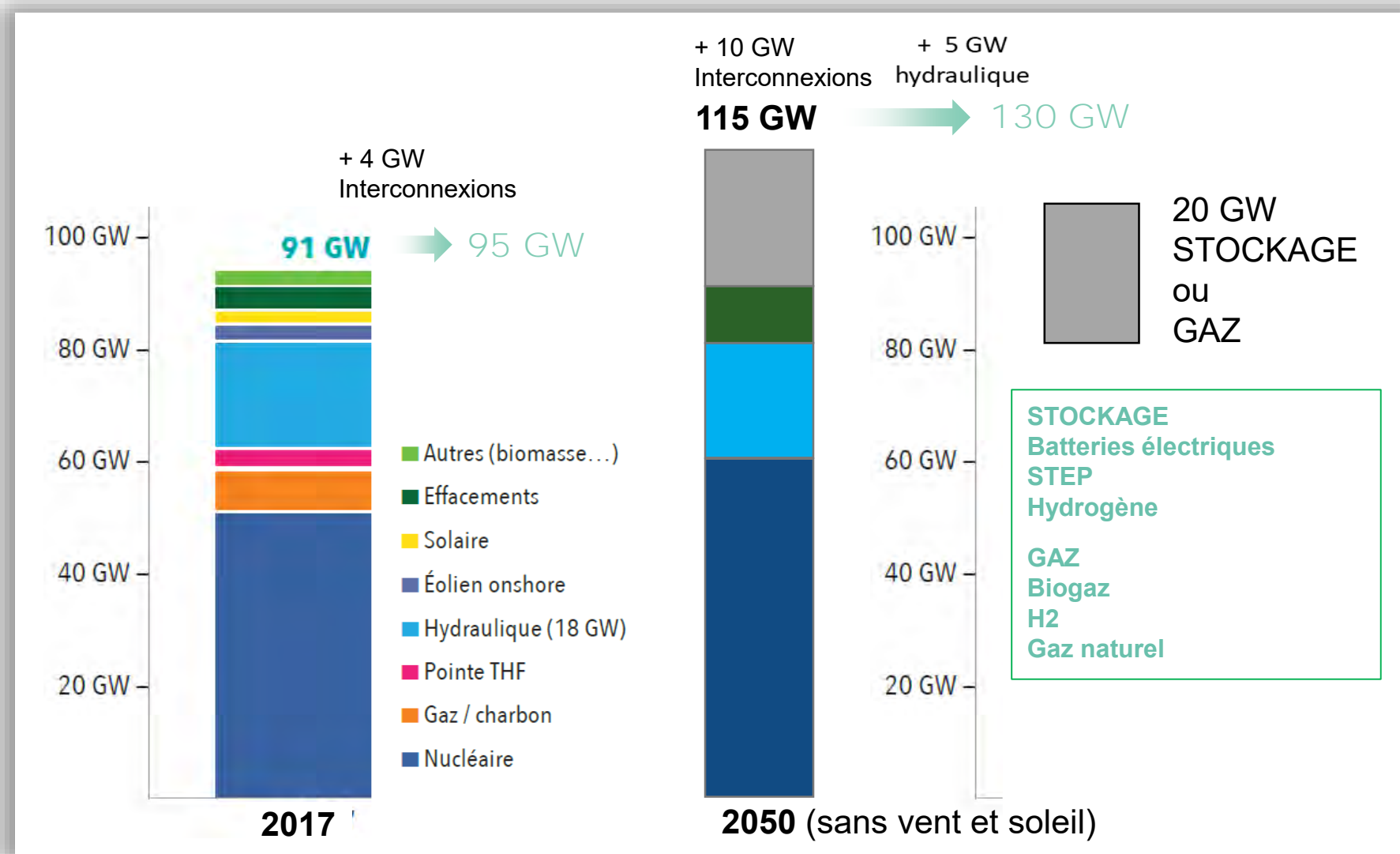
- STEP: combien ??

Le gaz

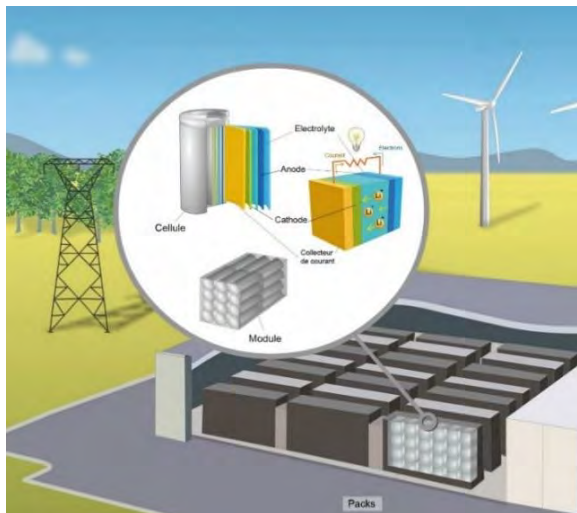
- Gaz naturel
- Gaz « décarboné » biomasse?

Le stockage d'énergie ??

DU GAZ POUR LES POINTES (France) ?



MOYENS DE FLEXIBILITE ?



**Stockage électrochimique
(batteries)**

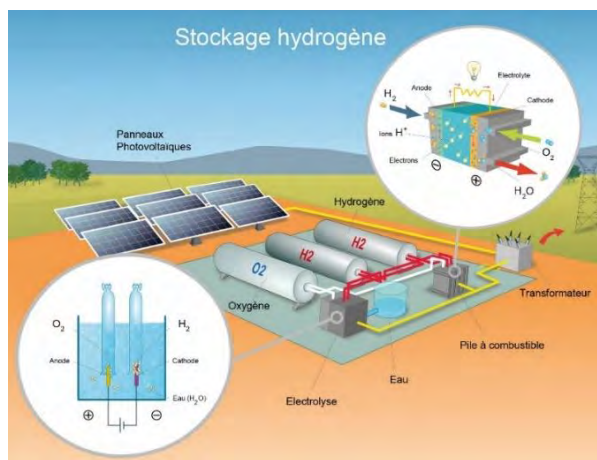
**Stockage hydraulique
(STEP)**



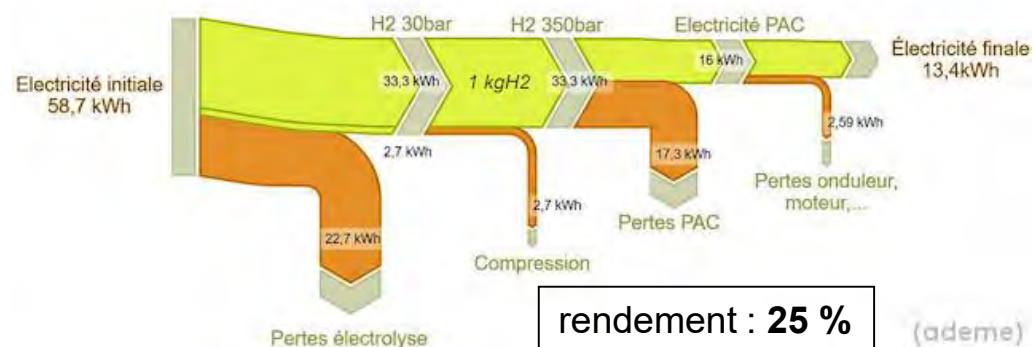
+ flexibilité de la demande

+ échanges trans-frontaliers

+ sources pilotables (gaz, nucléaire)



**Stockage chimique
(hydrogène)**



QUELLES ÉNERGIES NON ÉLECTRIQUES ?

Demain quel carbone ?

Carburants, plastiques, médicaments, ...

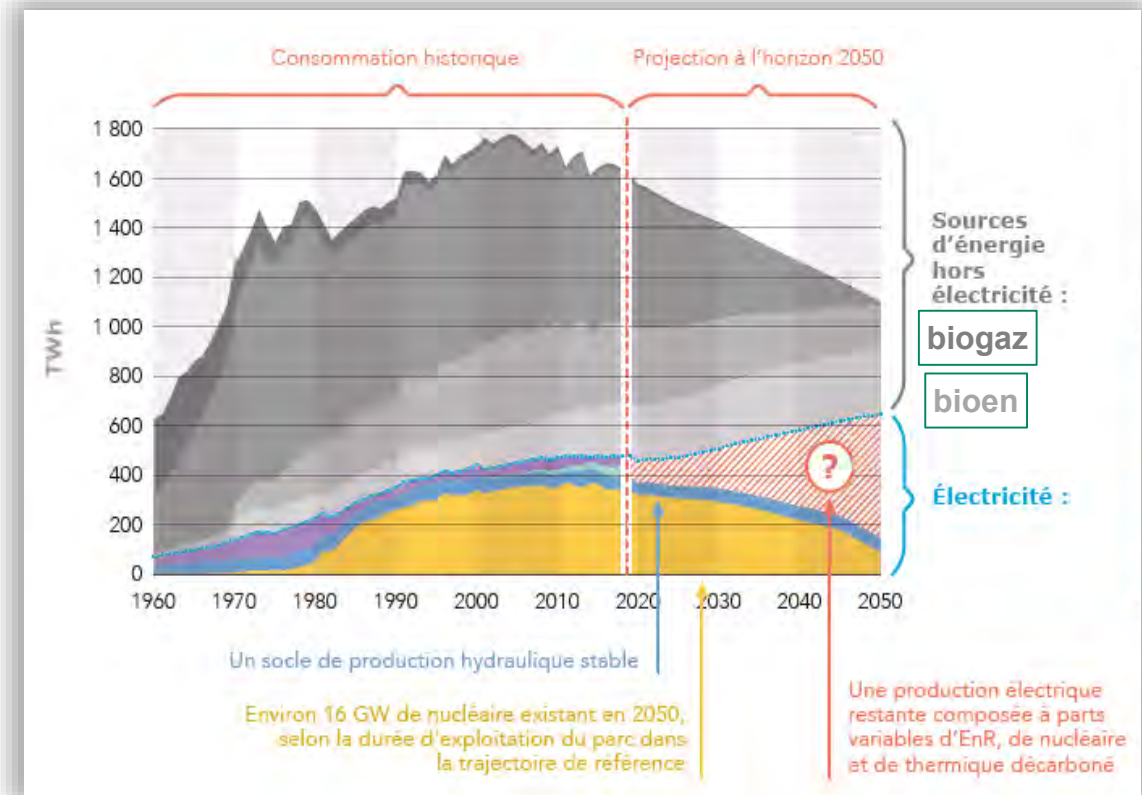
Production de chaleur

- > 10⁵
Products
- ~ 10³
Bulk chemicals & intermediates
- ~ 10²
Base chemicals
- 1 - 5
Carbon sources



- ↑
Gaz naturel
- ↑
Pétrole
- ↑
Charbon
- ↑
**Biomasse
CO₂/H₂**

Le scénario RTE: 450-500 TWh non électriques



- 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

QUELLES ÉNERGIES NON ÉLECTRIQUES ?

Demain quel carbone ?

Défossiliser = biomasse/déchets/CO₂

Les biocarburants (liquides)

(bioéthanol, biodiesels, biokerosene)

- Développer les biocarburants de 2ème génération (valorisation des matériaux ligno-cellulosiques)
- Estimation rigoureuse des gisements et ACV

Le biogaz

(biomasse agricole, déchets ménagers et industriels)

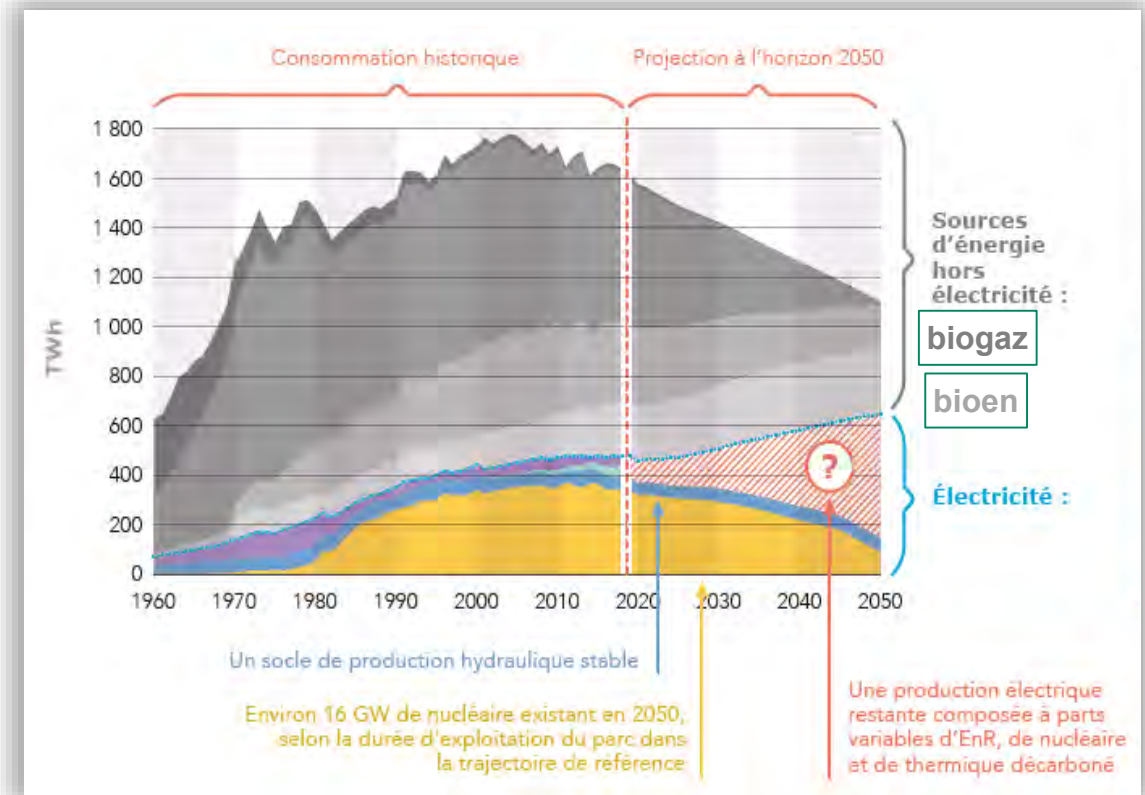
- Méthanisation/pyrogazéification
- Estimation rigoureuse des gisements et ACV

Le bois

Les carburants alternatifs (de synthèse)

- H₂
- Capture, stockage et valorisation du CO₂ (méthanation, électrolyse)

Le scénario RTE: 450-500 TWh non électriques



■ 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

QUELLES ÉNERGIES NON ÉLECTRIQUES ?

Demain quel carbone ?

Défossiliser = biomasse/déchets/CO₂

Les biocarburants (liquides)

(bioéthanol, biodiesels, biokerosene)

- Développer les biocarburants de 2ème génération (valorisation des matériaux ligno-cellulosiques)
- Estimation rigoureuse des gisements et ACV

Le biogaz

(biomasse agricole, déchets ménagers et industriels)

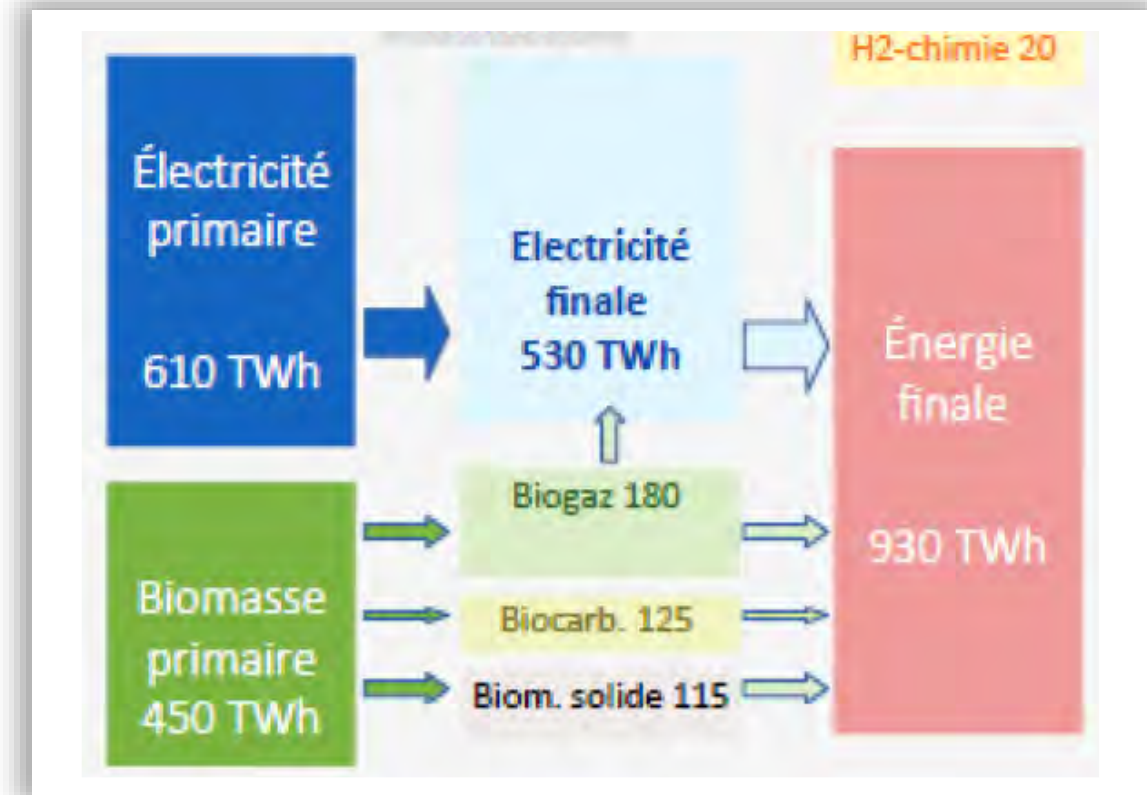
- Méthanisation/pyrogazéification
- Estimation rigoureuse des gisements et ACV

Le bois

Les carburants alternatifs (de synthèse)

- H₂
- Capture, stockage et valorisation du CO₂ (méthanation, électrolyse)

Le scénario SNBC: ~ 420 TWh biomasse

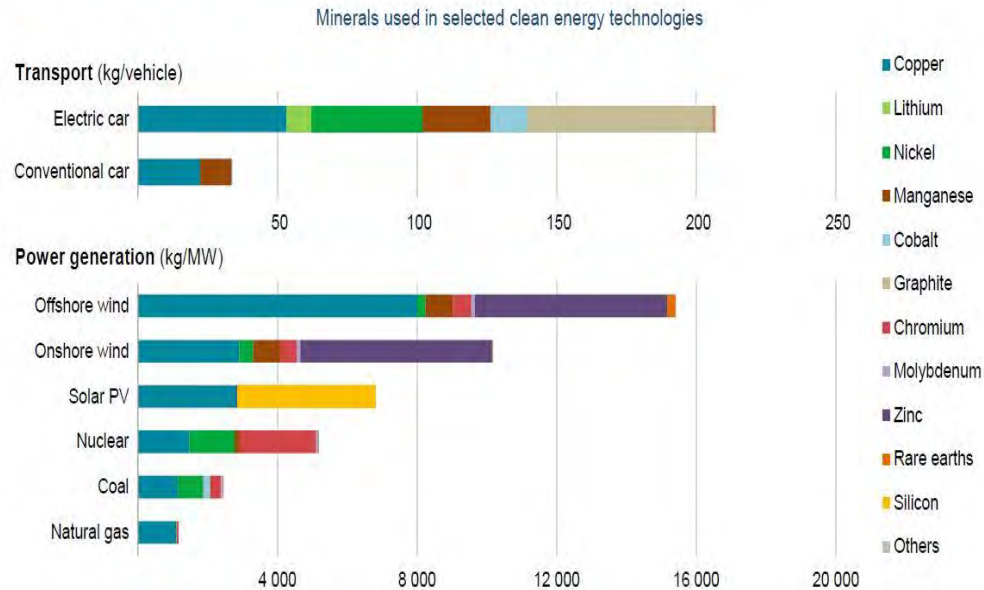


- Comment obtenir 450 TWh de biomasse ? (2022: 170 TWh)
- Importations (gaz et liquides)
- Capture/Stockage/Utilisation du CO₂

SOUVERAINETE ?

Ressources minérales

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



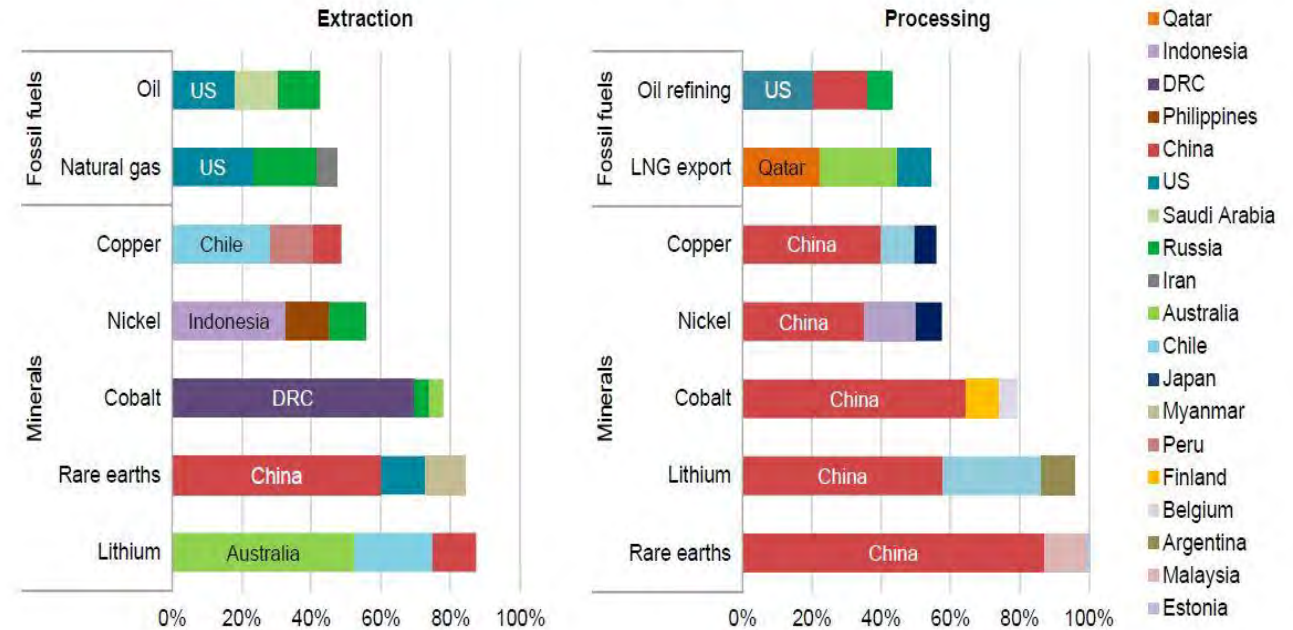
IEA. All rights reserved.

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

Le raffinage des métaux dominé par la Chine

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

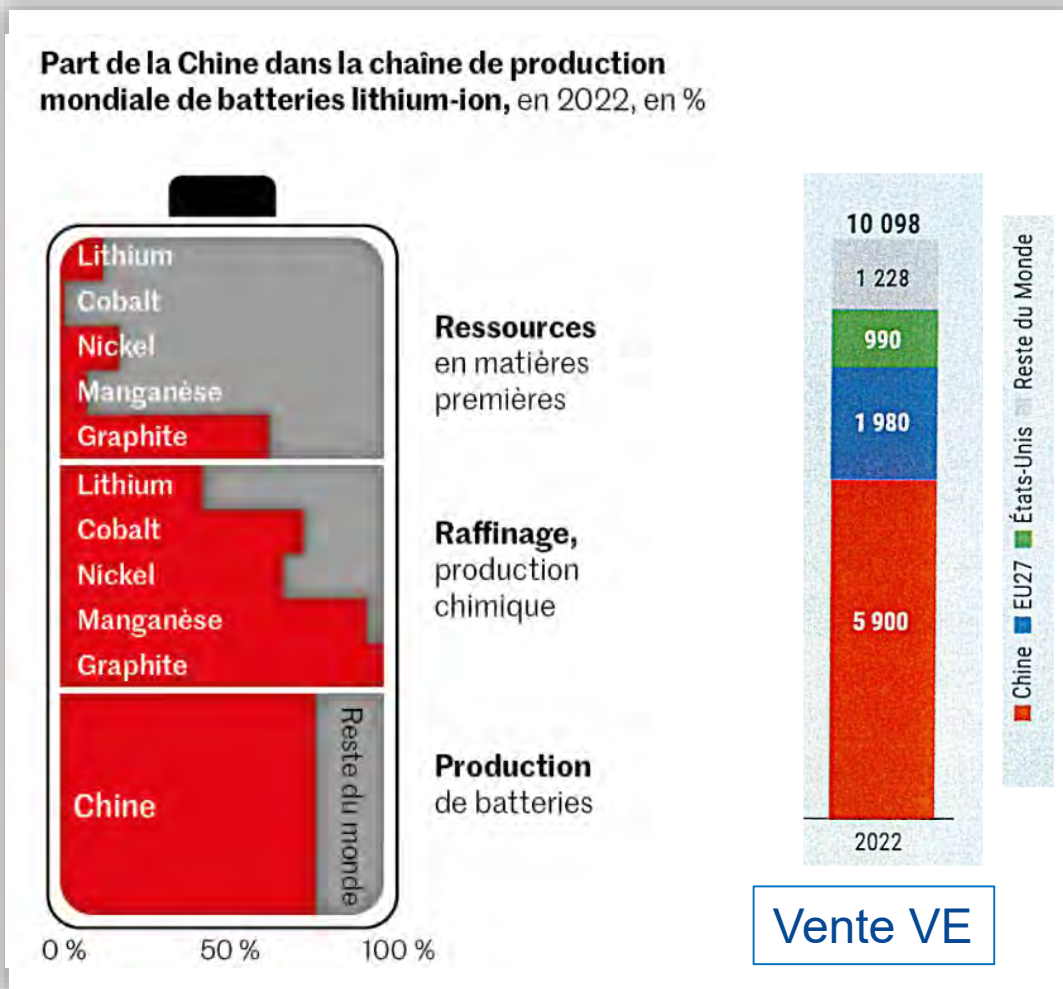


IEA. All rights reserved.

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).

SOUVERAINETE ?

Le cas du transport (batteries et VE)



Solutions

Une nouvelle industrie automobile européenne

- Gigafactories (production de batteries)

Sécurisation des approvisionnements

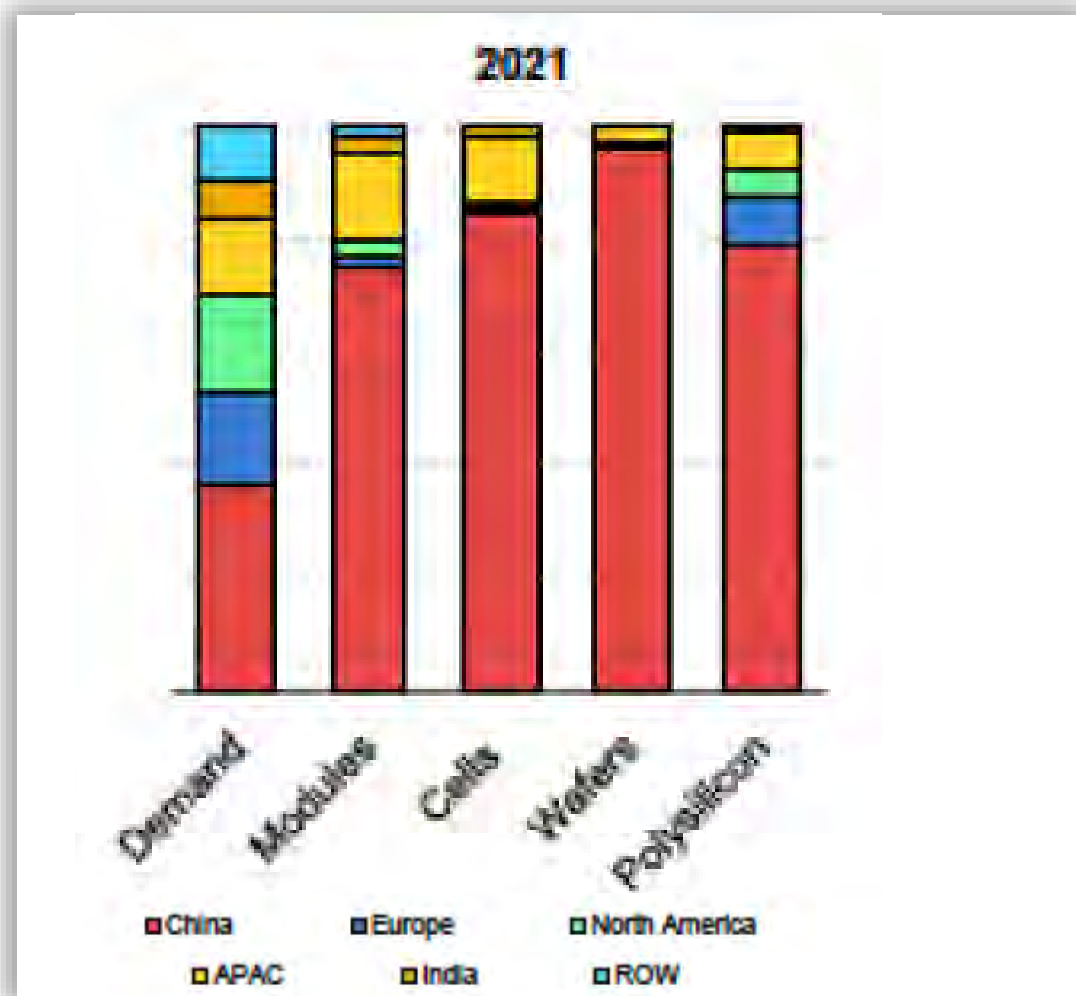
Récupération/Recyclage

Extraction

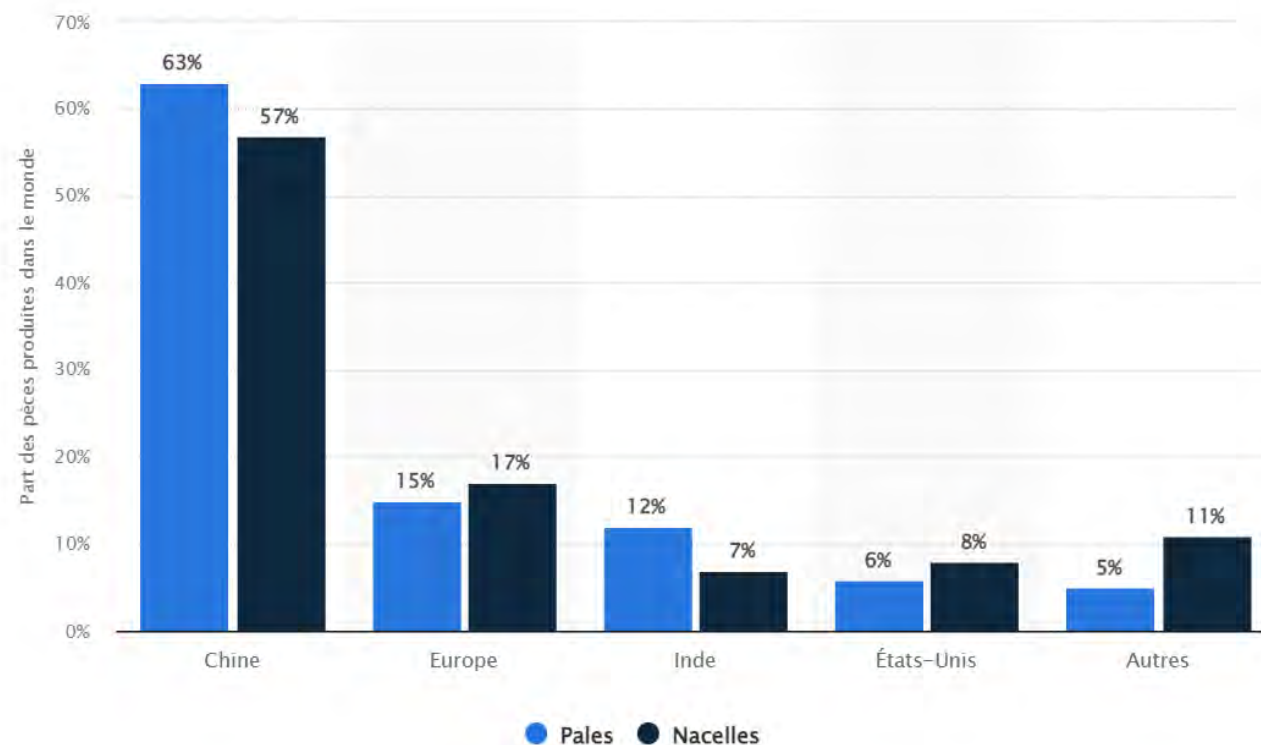
- Sous-sol riche en ressources minérales (France: Mo, Au, W, Li, Pb-Zn, Sn-Ta-Nb, Li,..)
- Inventaire minier, prospection
- Ouverture de mines (responsables)

SOUVERAINETE ?

Le cas du solaire (Si et cellules)



Le cas de l'éolien (pales et nacelles)



INNOVATION?

Exemples: H₂ et acier

HYDROGENE

Procédé « reformage » $CH_4 + 2 H_2O \rightarrow CO_2 + 4 H_2$

Électrolyse de l'eau $2 H_2O \rightarrow O_2 + 2 H_2$

Recherche fondamentale,
technologique, industrielle

Production d'HYDROGENE vert

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

Technologies de Récupération/Recyclage

(métaux, plastiques, batteries)

Cellules photovoltaïques

(stabilité, rendements, soutenabilité)

Extraction de métaux (mines responsables)

Décarbonation de l'industrie

(**ACIER**, ciment, béton ,verre, aluminium, éthylène,...)

Valorisation de la biomasse

(méthanation, pyrogazéification, biocarburants ...)

INNOVATION?

Exemples: H₂ et acier

HYDROGENE

Procédé « reformage » $CH_4 + 2 H_2O \rightarrow CO_2 + 4 H_2$

Électrolyse de l'eau $2 H_2O \rightarrow O_2 + 2 H_2$

ACIER

Procédé « charbon »
(France 11 Mt)
1 t d'acier > 2 t CO₂

$$2C(s) + O_2(g) \rightarrow 2CO(g) + \Delta$$
$$Fe_2O_3(s) + 3CO(g) \xrightarrow{\Delta} 2Fe(s) + 3CO_2(g).$$

Procédé « vert »
(ArcelorMittal)
« H₂ » ou « électrons »
1 t d'acier > 0.025 t CO₂

$$Fe_2O_3(s) + 3H_2(g) \rightarrow 2Fe(s) + 3H_2O(g).$$

Recherche fondamentale,
technologique, industrielle

Production d'HYDROGENE vert
(électrolyse de l'eau, matériaux pour réservoirs,...)

Technologies de Récupération/Recyclage
(métaux, plastiques, batteries)

Cellules photovoltaïques
(stabilité, rendements, soutenabilité)

Extraction de métaux (mines responsables)

Décarbonation de l'industrie
(**ACIER**, ciment, béton, verre, aluminium, éthylène,...)

Valorisation de la biomasse
(méthanation, pyrogazéification, biocarburants ...)



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 ?
- RECHERCHE, INNOVATION et REINDUSTRIALISATION
- ADAPTATION au changement climatique: un nouveau paradigme



La politique énergétique française

Marc Fontecave

Professeur au Collège de France



