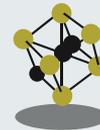
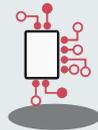
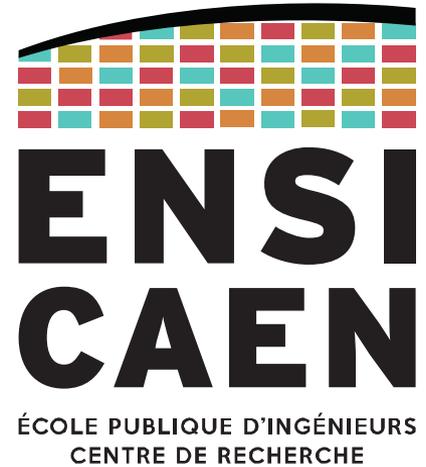


Chapitre 1

Production

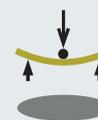
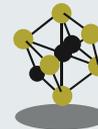
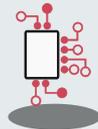
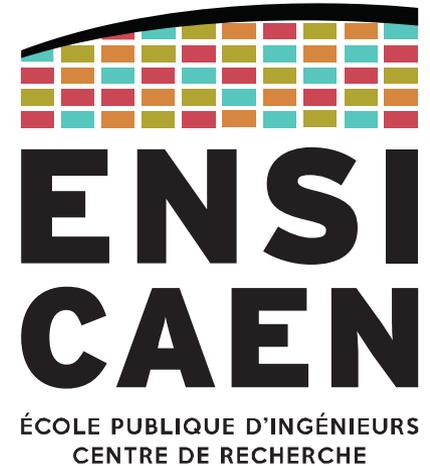


DÉFINITIONS

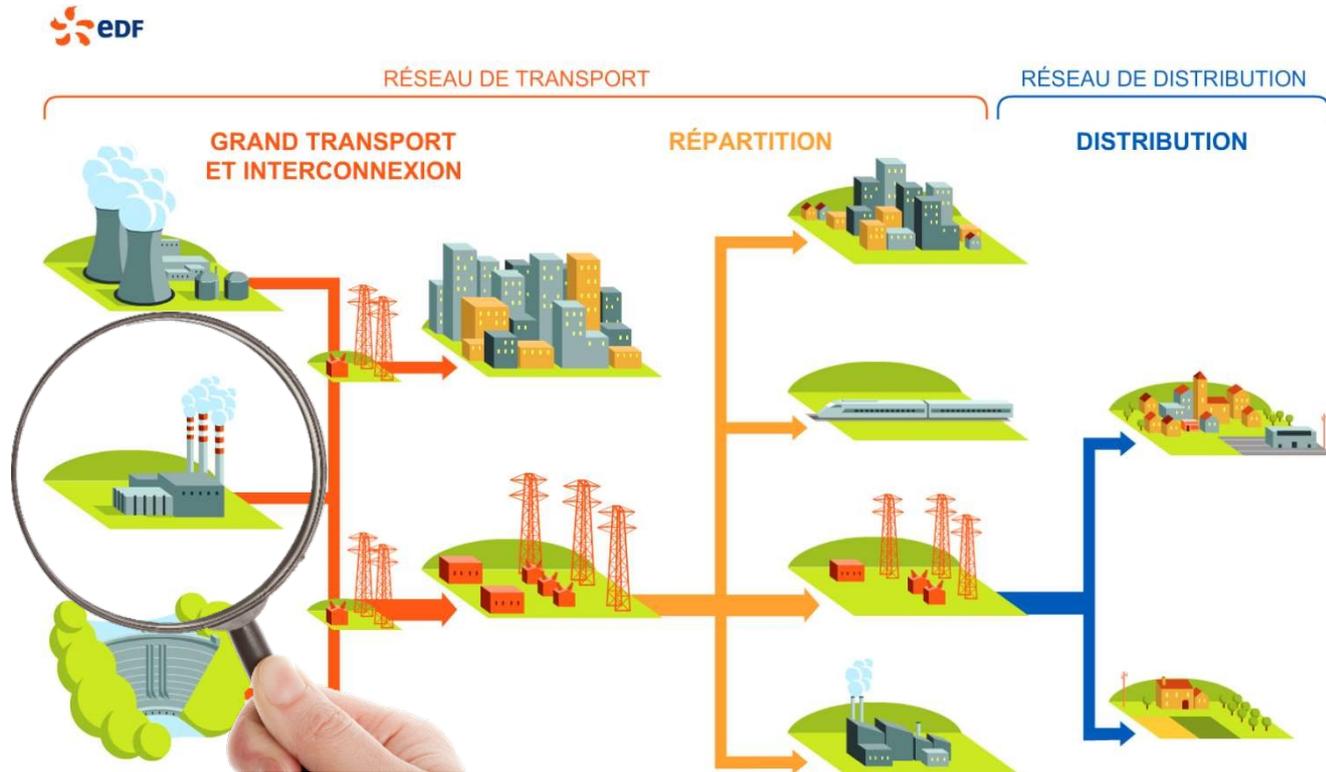
Énergie renouvelable vs. non-renouvelable

Énergie fossile, verte/propre/décarbonée

Énergie primaire, secondaire, finale



La production est un secteur industriel visant à assurer un service d'approvisionnement d'énergie le plus régulier, stable et sécurisé possible.



La production est le premier maillon de la chaîne d'énergie.

Production → Transport → Conversion → Stockage → Utilisation

Dans le monde

- La production totale d'énergie primaire est de ~180 000 TWh pour ~124 000 TWh d'énergie finale consommée.
- La consommation d'électricité (énergie finale) est de l'ordre de 30 000 TWh.

En France

- La production totale d'énergie primaire est de 1 420 TWh pour 1 549 TWh d'énergie finale consommée.
- La consommation d'électricité (énergie finale) est de l'ordre de 450 TWh.

La production d'énergie est liée à plusieurs problématiques d'envergure mondiale (souveraineté énergétique, relation diplomatiques, disponibilité des ressources, ...).

Les deux problématiques principalement évoquées dans les pages suivantes sont la quantité de ressources disponibles (durée d'exploitation des gisements) et leur impact sur l'environnement.

On va alors opposer énergie **non-renouvelable** et énergie **renouvelable**.

On va également faire apparaître la notion d'énergie **fossile** et d'énergie **verte/propre/décarbonée** (sans qu'il ne s'agisse d'antonymes au sens propre du terme).

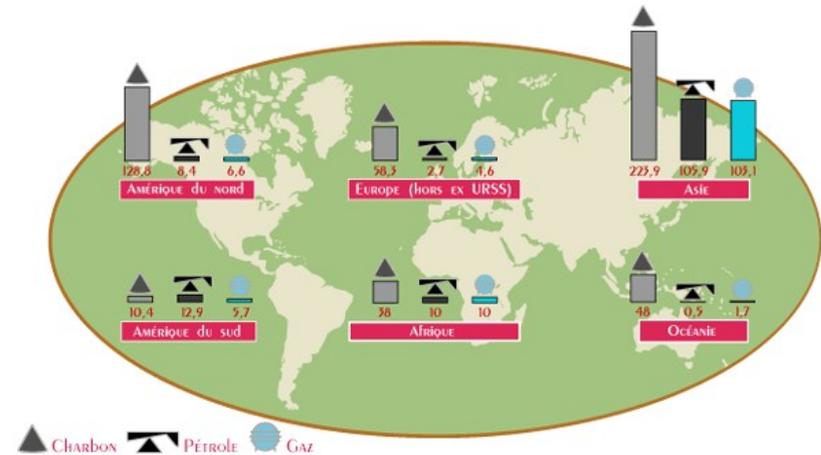
La production d'énergie repose sur deux catégories d'énergies, classées selon la disponibilité des ressources.

Énergie renouvelable

Énergie dont la production est basée sur l'exploitation de ressources inépuisables à l'échelle du temps humain.

Énergie non-renouvelable

Énergie dont la production est basée sur l'exploitation de ressources limitées à l'échelle du temps humain.



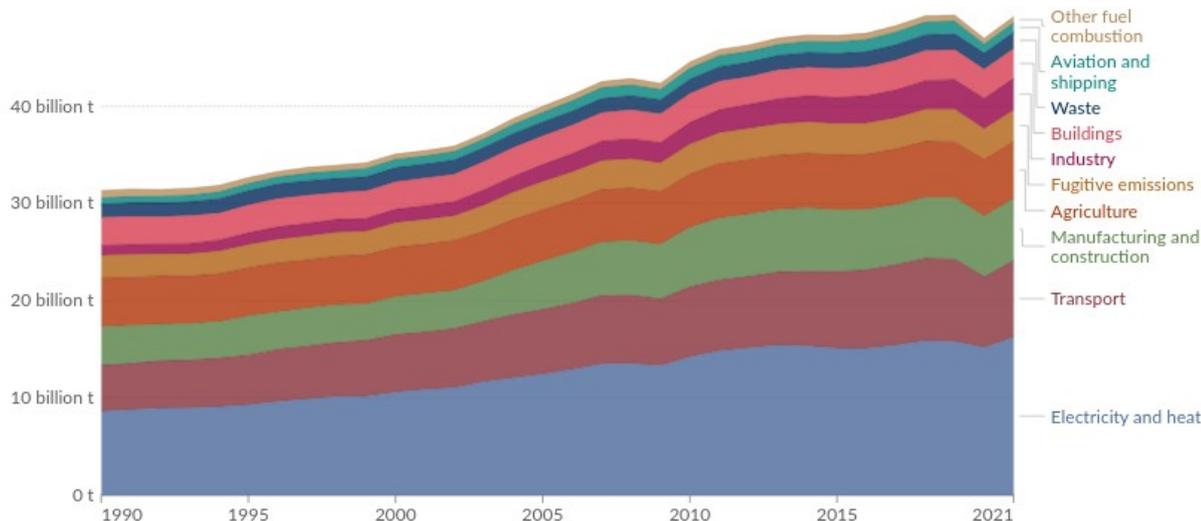
Aujourd'hui la majeure partie de la production mondiale d'énergie primaire s'appuie sur l'utilisation de ressources non-renouvelables.

Énergie fossile

Énergie dont la production repose sur l'exploitation de matières d'origine organique. Ces ressources sont généralement brûlées pour générer de l'énergie thermique, et libèrent beaucoup de gaz à effet de serre (GES).

Énergie propre / verte / décarbonée

Énergie dont la production ne génère peu ou pas de GES. Attention : les termes sont nombreux et subjectifs !



Émissions de gaz à effet de serre par secteur dans le monde, 1990-2021

Climate Watch (2024), données traitées par : <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

Énergie primaire, secondaire, finale

Selon sa place dans la chaîne *Production* → *Utilisation*, l'énergie est classifiée dans l'une des trois catégories suivantes.

Énergie primaire

Énergie disponible sous forme de ressource brute (charbon, pétrole, hydraulique, vent, solaire, ...) avant transformation (raffinage, ...), transport et distribution (réseau de chaleur, réseau électrique, ...).

Pour le nucléaire, c'est la chaleur de la réaction qui est considérée comme énergie primaire (et non l'uranium).

Énergie secondaire

Énergie disponible après transformation d'énergie primaire, avec un critère de disponibilité auprès de l'utilisateur (pétrole raffiné, gaz de ville, électricité, ...).

Énergie finale

Énergie réellement consommée par l'utilisateur (et facturée ...), pouvant venir d'une source primaire (charbon, bois, ... pour se chauffer) ou d'une source secondaire (fioul pour se chauffer, pétrole pour se déplacer ...).

DÉFINITIONS

Énergie primaire, secondaire, finale

Ressources primaires

Disponible dans la nature

(Total 2023 : 178 000 TWh)

Énergie finale

*Commercialisable et
directement utilisable*

(Total 2023 : 124 000 TWh)

Utilisation

*Commercialisable et
directement utilisable*

Non renouvelables

Fossiles (gaz, pétrole, charbon)

Fissiles (uranium, thorium)

Renouvelables

Solaire, vent, géothermie, hydro,
marée, biomasse

Combustibles

Liquides (essence, gasoil, kérosène, ...)

Gazeux (gaz, biogaz, hydrogène, ...)

Solides (granulés de bois, charbon, ...)

Chaleur

Électricité

Éclairage

Froid

Chaleur

Mobilité

Force motrice

Processus industriels

Traitement de l'information

...

Pertes
(transformation, distribution, ...)

Pertes
(conversion)



Plusieurs unités d'énergies sont présentes dans ce document.

L'unité d'énergie du système international est le Joule J (= 1 W·s).

Pour votre facture d'électricité, on exprime l'énergie en kiloWatt-heure : 1 kWh = 3 600 000 J = $3.6 \cdot 10^6$ J.

Pour quantifier l'énergie au niveau mondial, on parlera plutôt de teraWatt-heure : 1 TWh = 10^9 kWh = $3.6 \cdot 10^{15}$ J.

Enfin, on utilise la tonne-équivalent-pétrole (*tonne-of-oil-equivalent*) pour désigner le pouvoir calorifique moyen d'une tonne de pétrole (en généralement utilisé pour tous les combustibles) : 1 tep \approx 42 GJ

Par exemple (production mondiale d'énergie en 2023) :

$$640 \text{ EJ} \approx 178\,000 \text{ TWh} \approx 15 \text{ Gtep}$$

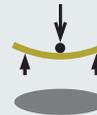
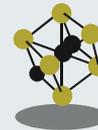
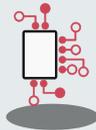
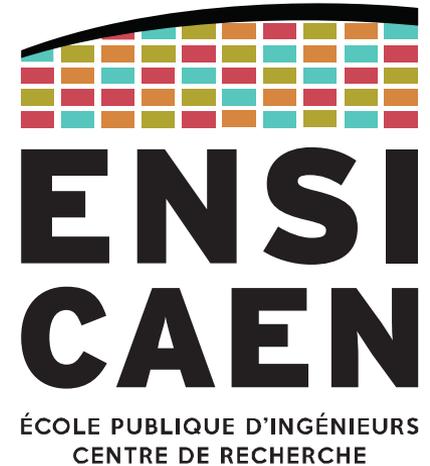
Avant d'aborder la production d'électricité en France, il est nécessaire de prendre du recul sur deux points.

Pour prétendre avoir une vue fine de l'utilisation de l'électricité, encore faut-il mettre cette énergie en regard avec les autres. Nous traiterons donc des différentes sources d'énergies (électricité, pétrole, gaz, charbon, ...) pour mieux saisir la place de l'électricité dans cet écosystème.

Dû à sa politique pro-nucléaire, la situation de production d'énergie en France n'est pas représentative de la situation mondiale. Nous aborderons donc la production d'énergie aux échelles internationales puis nationales.

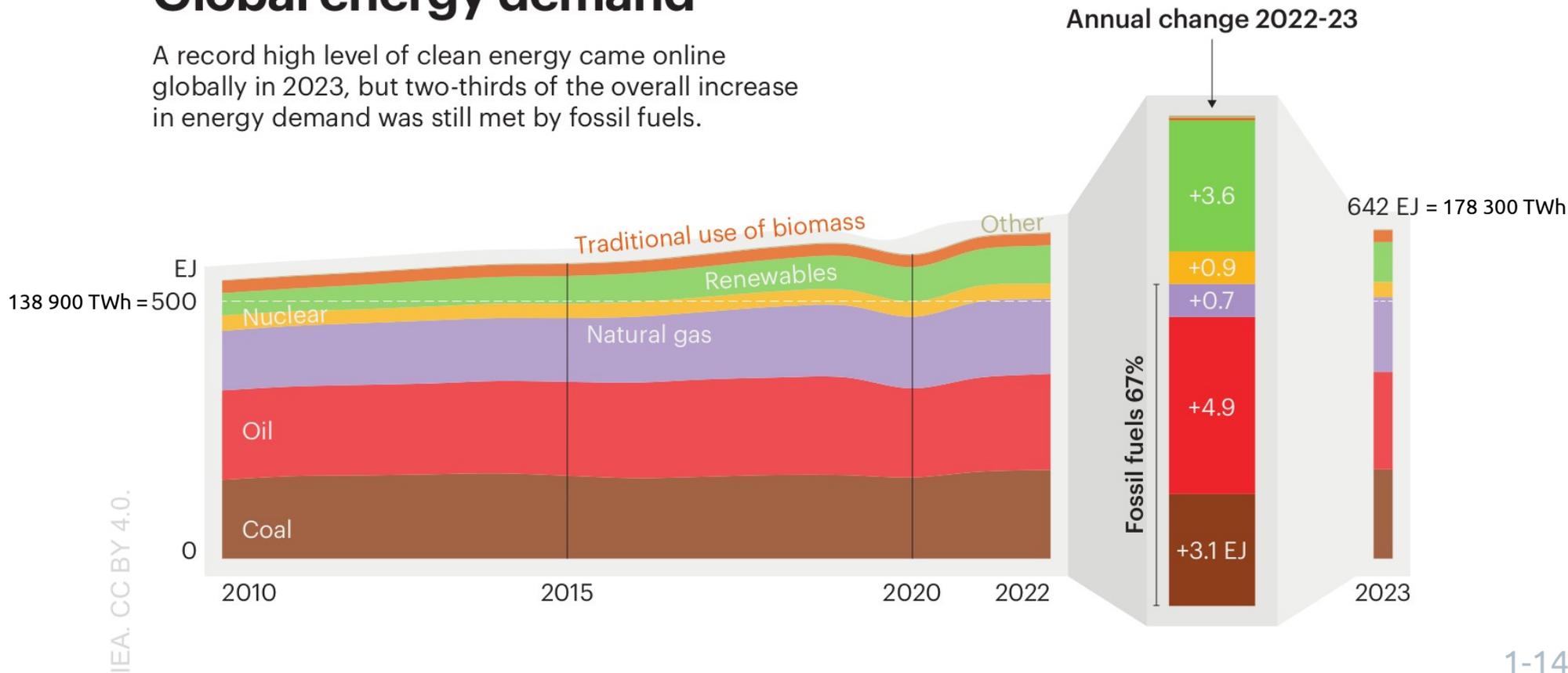
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Diversité des sources d'énergie
Hétérogénéités des mix énergétiques



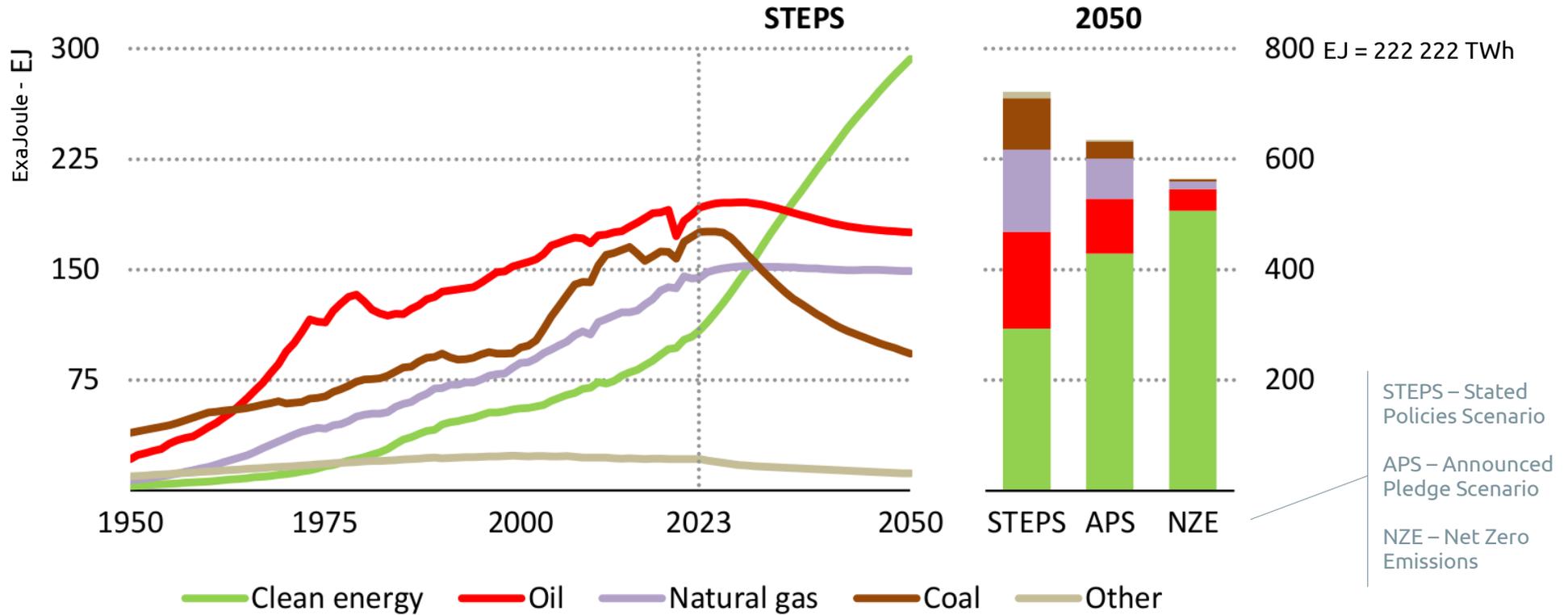
Global energy demand

A record high level of clean energy came online globally in 2023, but two-thirds of the overall increase in energy demand was still met by fossil fuels.



Production mondiale d'énergie primaire (1950-2050)

Figure 1.1 ▶ Global energy mix by scenario to 2050



« *I want to play a game* » - Jigsaw

Dans les diapos suivantes, les prévisions de demande d'énergie de plusieurs régions du monde sont montrées selon le *Stated Policies Scenario* (STEPS).

À vous d'associer les régions du monde suivantes avec ces graphiques :

- Afrique
- Amérique Latine et Caraïbes
- Asie du Sud-Est
- Chine
- États-Unis
- Eurasie
- Inde
- Japon et Corée
- Moyen-Orient
- Union Européenne

Plus que pour le jeu, l'intérêt ici est de voir les différences de mix énergétiques dans les régions du monde en fonctions de leurs ressources et de leurs utilisations.

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Production d'énergie primaire par région

Population
Million people

2023
338

2050
373

GDP

Trillion USD
(2023, PPP)

2023
27.5

2050
46.1

Population
Million people

2023
240

2050
255

GDP

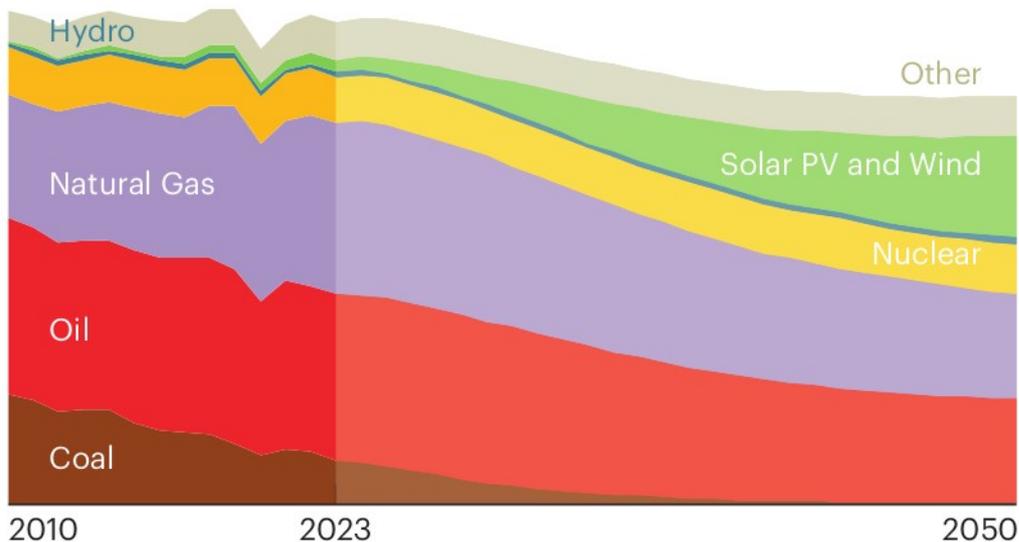
Trillion USD
(2023, PPP)

2023
6.8

2050
10.0

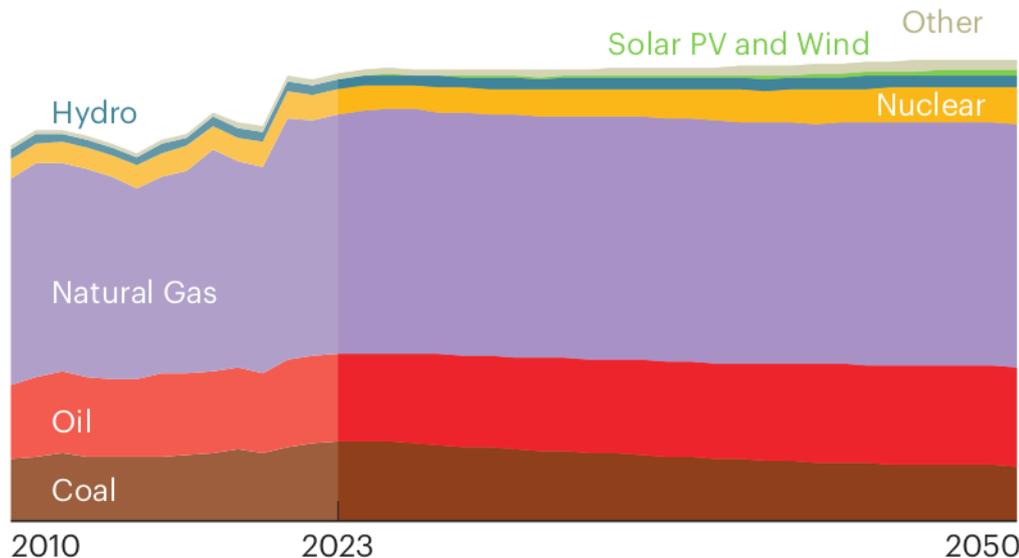
Energy demand in the Stated Policies Scenario

100 EJ



Energy demand in the Stated Policies Scenario

50 EJ



PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Production d'énergie primaire par région

Population
Million people

2023
663

2050
748

GDP

Trillion USD
(2023, PPP)

2023
12.8

2050
24.0

Population
Million people

2023
1 419

2050
1 307

GDP

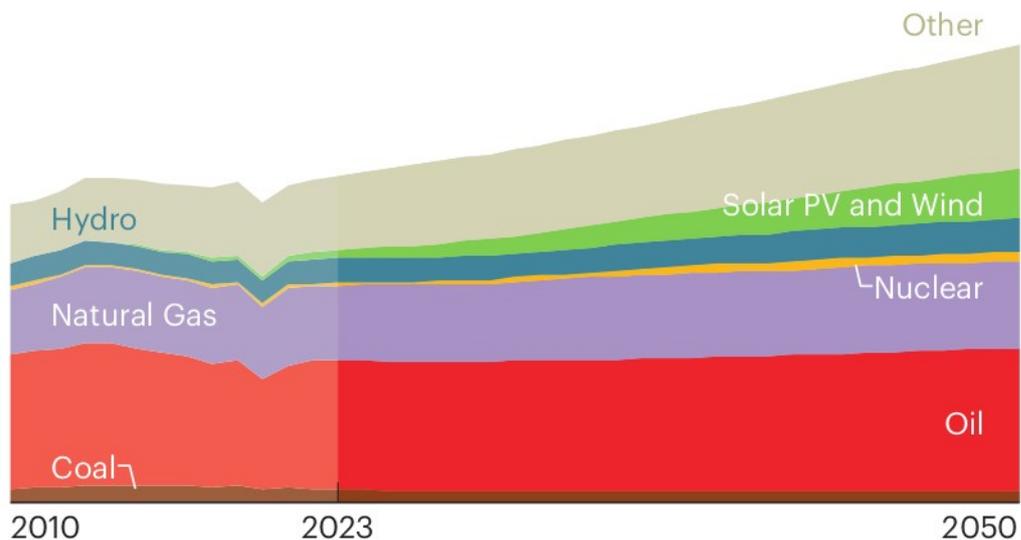
Trillion USD
(2023, PPP)

2023
33.5

2050
69.3

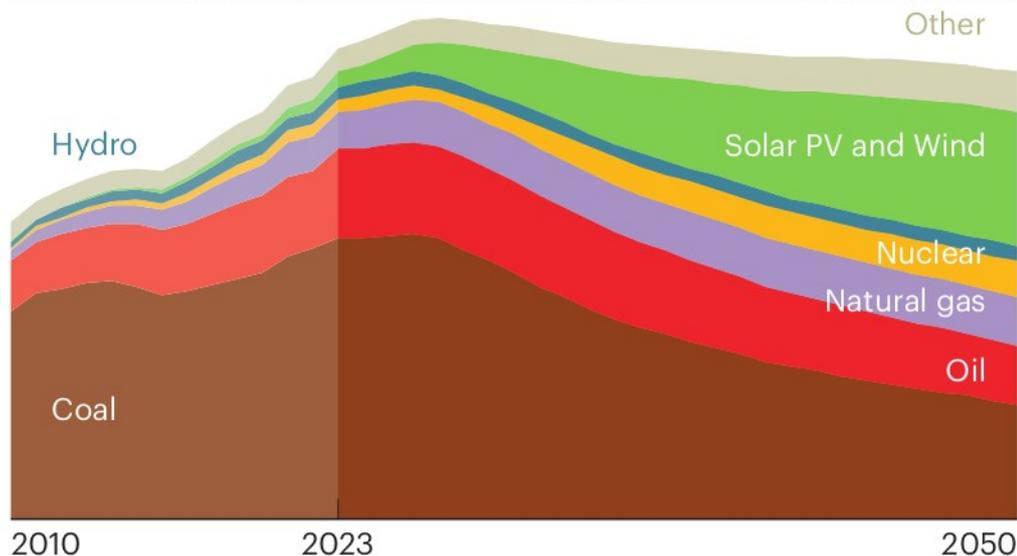
Energy demand in the Stated Policies Scenario

60 EJ



Energy demand in the Stated Policies Scenario

190 EJ



PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Production d'énergie primaire par région

Population
Million people

2023
449

2050
425

GDP

Trillion USD
(2023, PPP)

2023
25.4

2050
35.1

Population
Million people

2023
1 429

2050
1 670

GDP

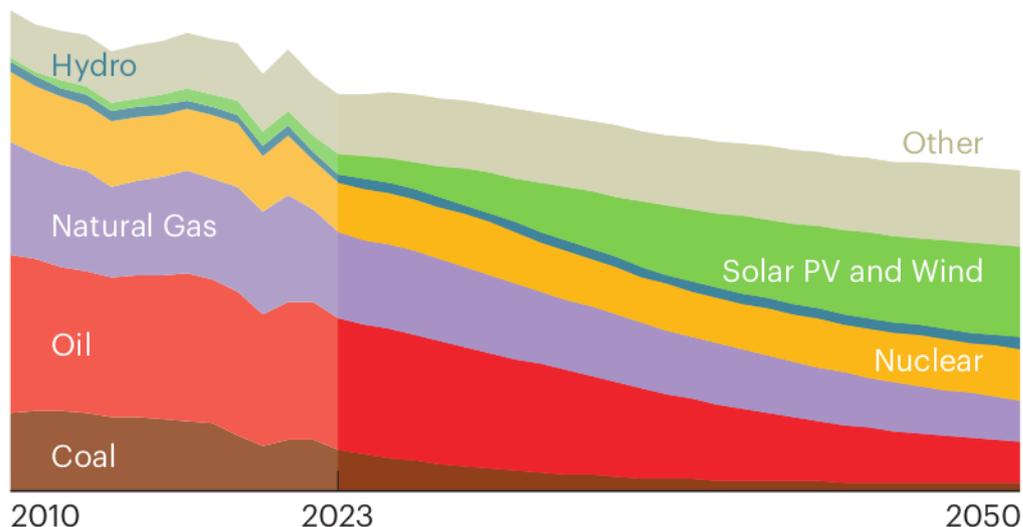
Trillion USD
(2023, PPP)

2023
13.3

2050
47.8

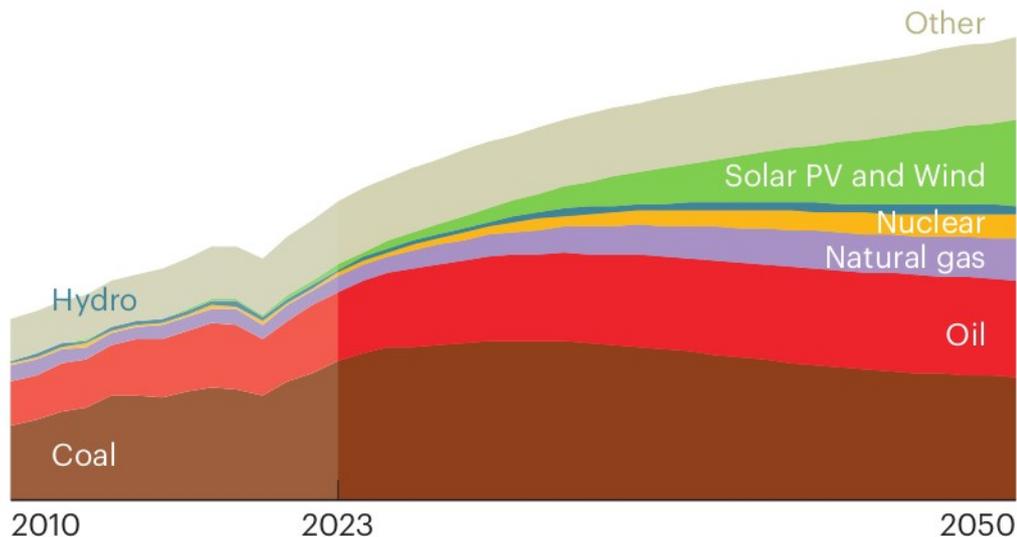
Energy demand in the Stated Policies Scenario

70 EJ



Energy demand in the Stated Policies Scenario

80 EJ



PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Production d'énergie primaire par région

Population
Million people

2023
1 458

2050
2 482

GDP

Trillion USD
(2023, PPP)

2023
9.0

2050
25.9

Population
Million people

2023
176

2050
150

GDP

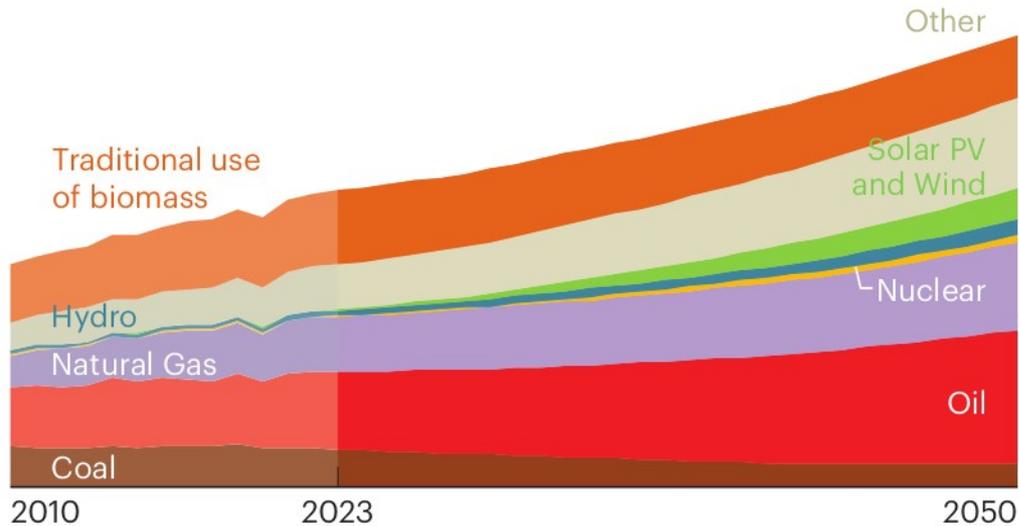
Trillion USD
(2023, PPP)

2023
9.4

2050
12.0

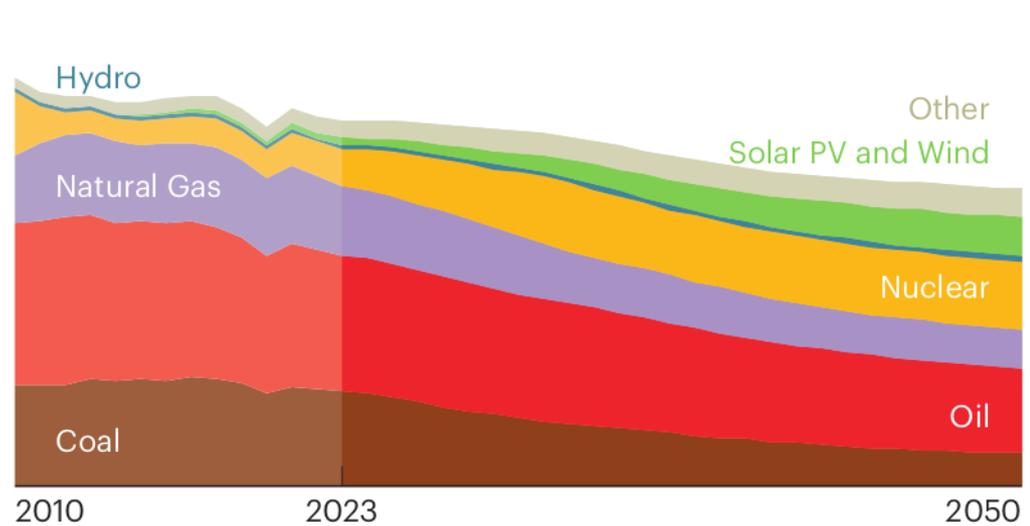
Energy demand in the Stated Policies Scenario

60 EJ



Energy demand in the Stated Policies Scenario

40 EJ



PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Production d'énergie primaire par région

Population
Million people

2023
269

2050
364

GDP

Trillion USD
(2023, PPP)

2023
6.7

2050
15.6

Population
Million people

2023
685

2050
787

GDP

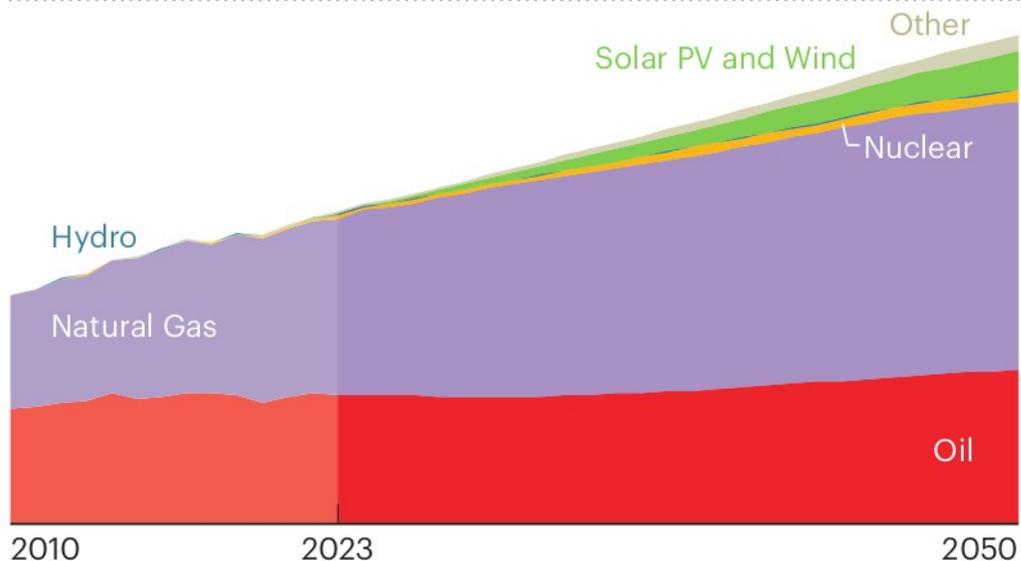
Trillion USD
(2023, PPP)

2023
11.2

2050
29.9

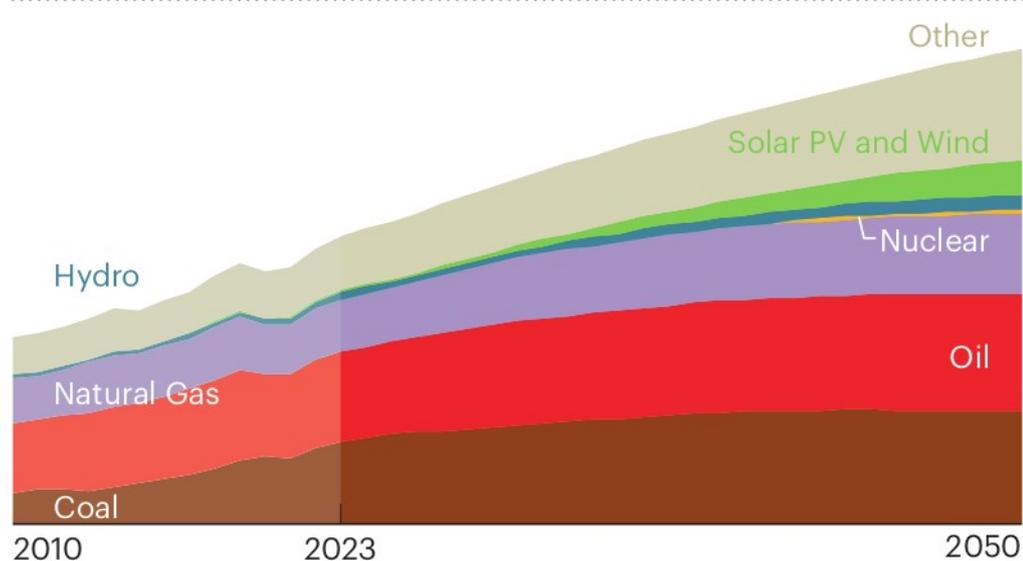
Energy demand in the Stated Policies Scenario

60 EJ



Energy demand in the Stated Policies Scenario

60 EJ



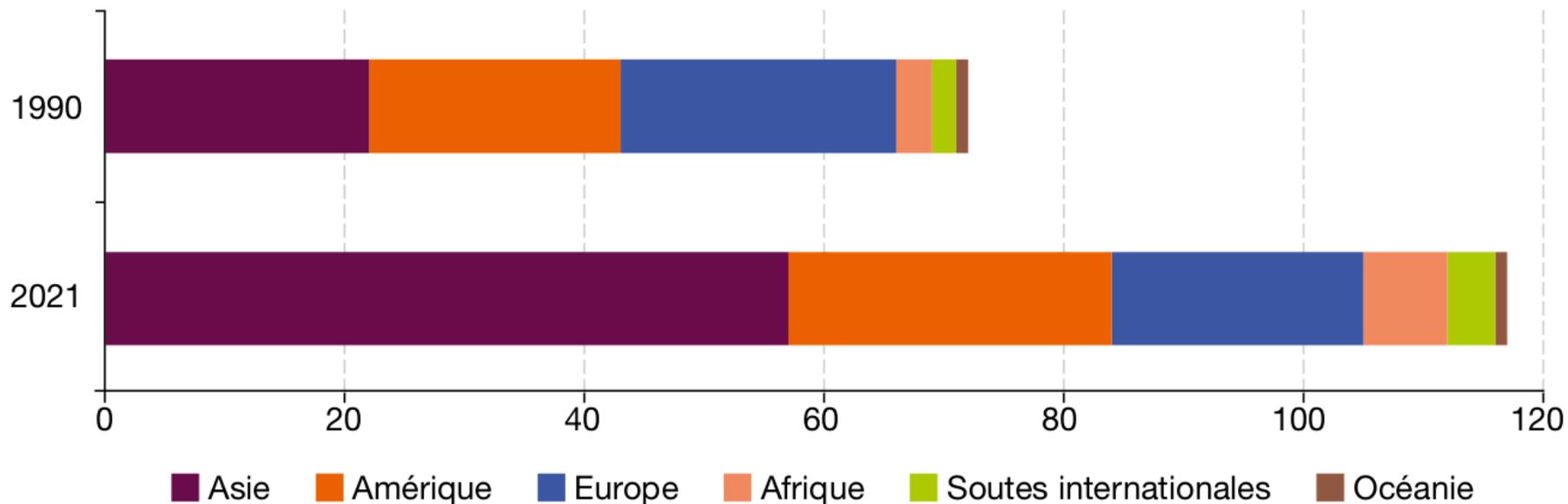
Quelques conclusions à tirer des ces relevés géographiques :

- Pour les grandes puissances économiques, la prévision de demande d'énergie est à la baisse
- La demande d'énergie progresserait dans le même sens que la population, mais pas de lien avec le PIB (qui est en augmentation quelle que soit la région)
- Chaque région joue avec ses ressources
 - Gaz naturel (États-Unis, Eurasie, Moyen-Orient)
 - Pétrole (États-Unis, Moyen-Orient, Eurasie)
 - Charbon (Chine, Inde, Asie du Sud-Est)
- Le charbon aurait tendance à diminuer partout, sauf en Asie du Sud-Est et potentiellement en Inde
- En regardant par région, le pétrole n'aurait pas tendance à décroître. Sauf qu'il baisserait dans les régions les plus demandeuses d'énergie (États-Unis, Union Européenne, Japon et Corée)
- Les énergies renouvelables (PV et éolien) augmenteraient partout

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE MONDIALE

Consommation d'énergie finale par continent

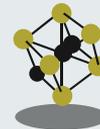
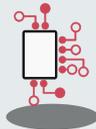
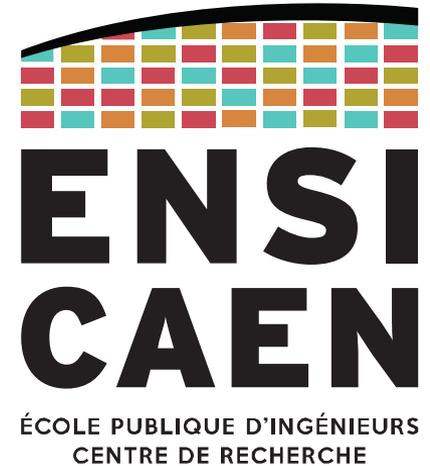
En milliers de TWh



Source : calculs SDES, d'après les données de l'AIE

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Toutes les productions d'énergie en France



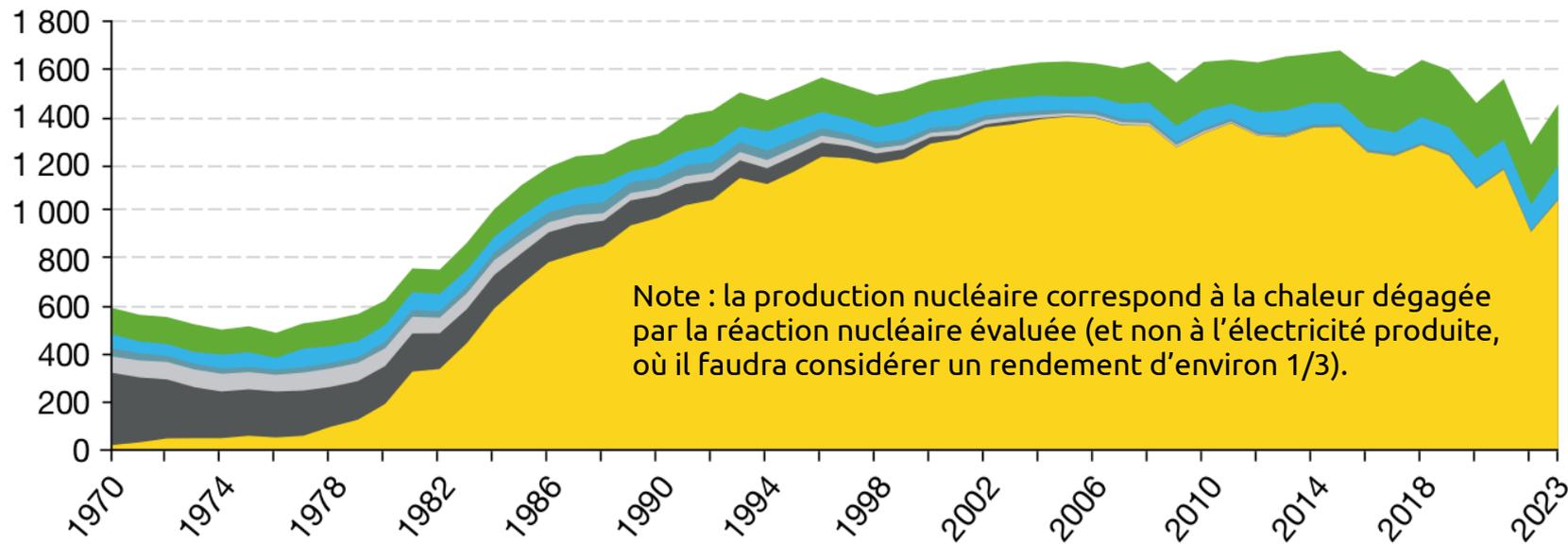
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique (1970-2023)

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

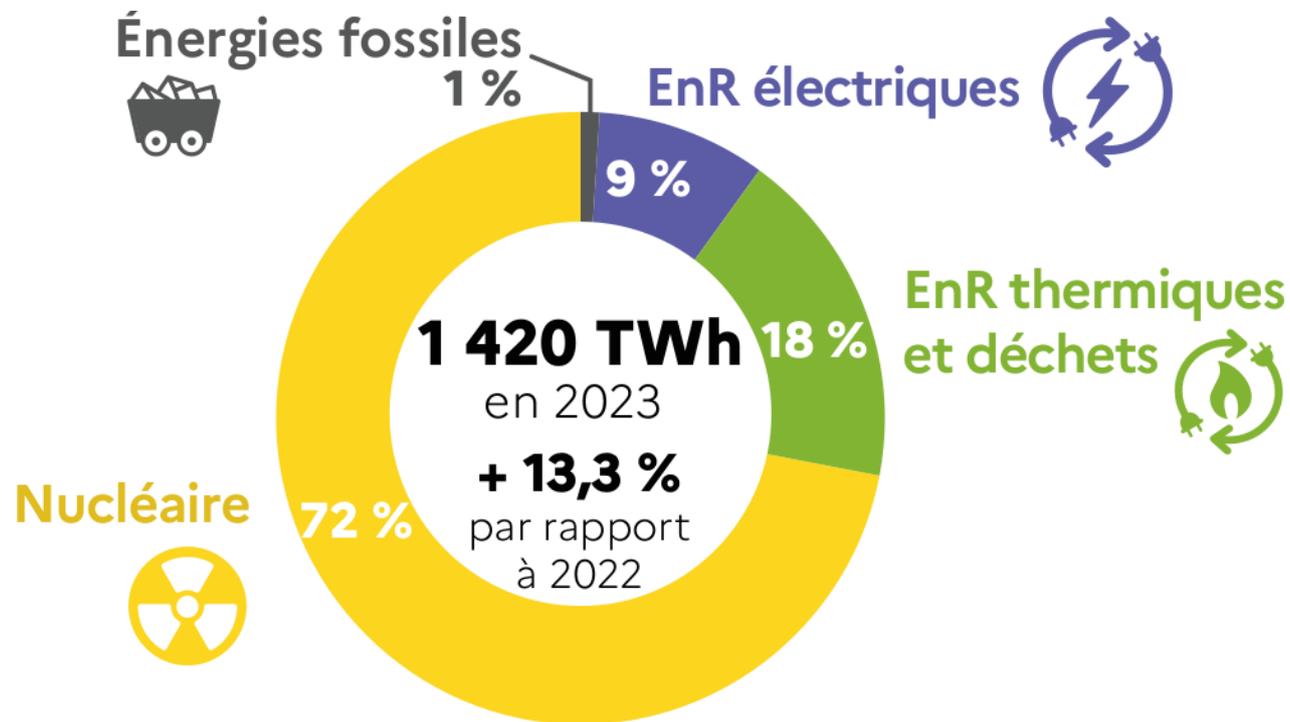
TOTAL : 1 420 TWh en 2023

En TWh



PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique national vs mondial



Production mondiale
d'énergie en 2023 :

178 333 TWh (+2.0% /2022)

Répartition :

Fossiles	67%
Renouvelables	19.5 %
Nucléaire	6.5 %

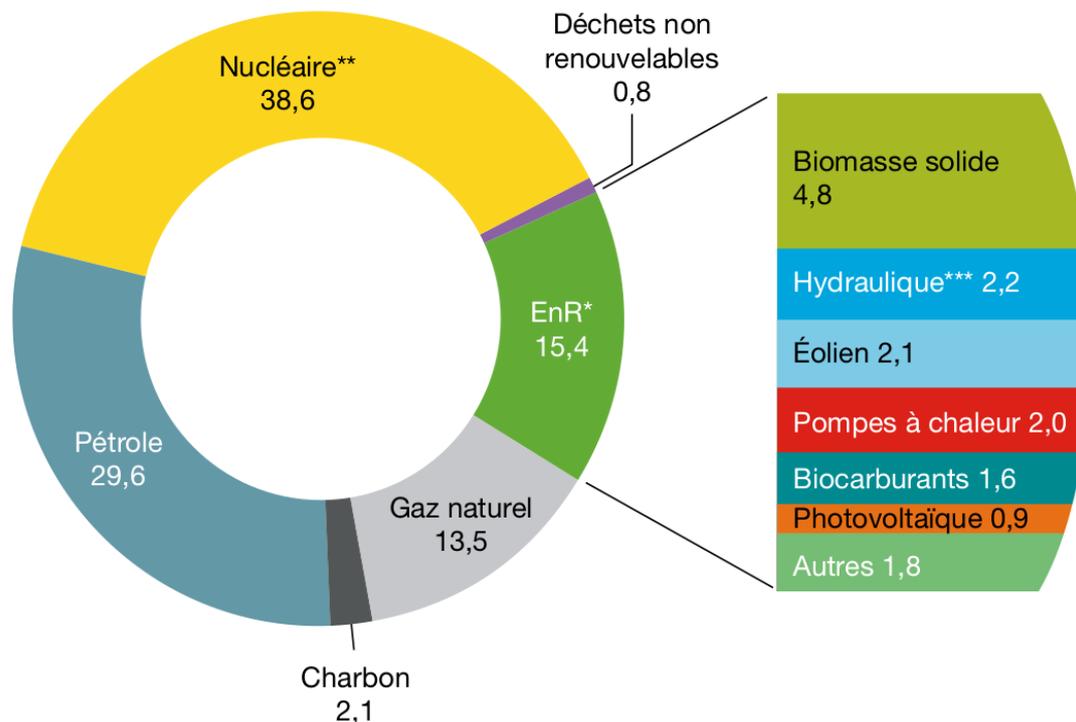
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Consommation d'énergie primaire

RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 2 523 TWh en 2023 (donnée non corrigée des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)



La consommation d'énergie primaire de la France correspond à la demande intérieure d'énergie avant transformation et usages internes de la branche énergie.

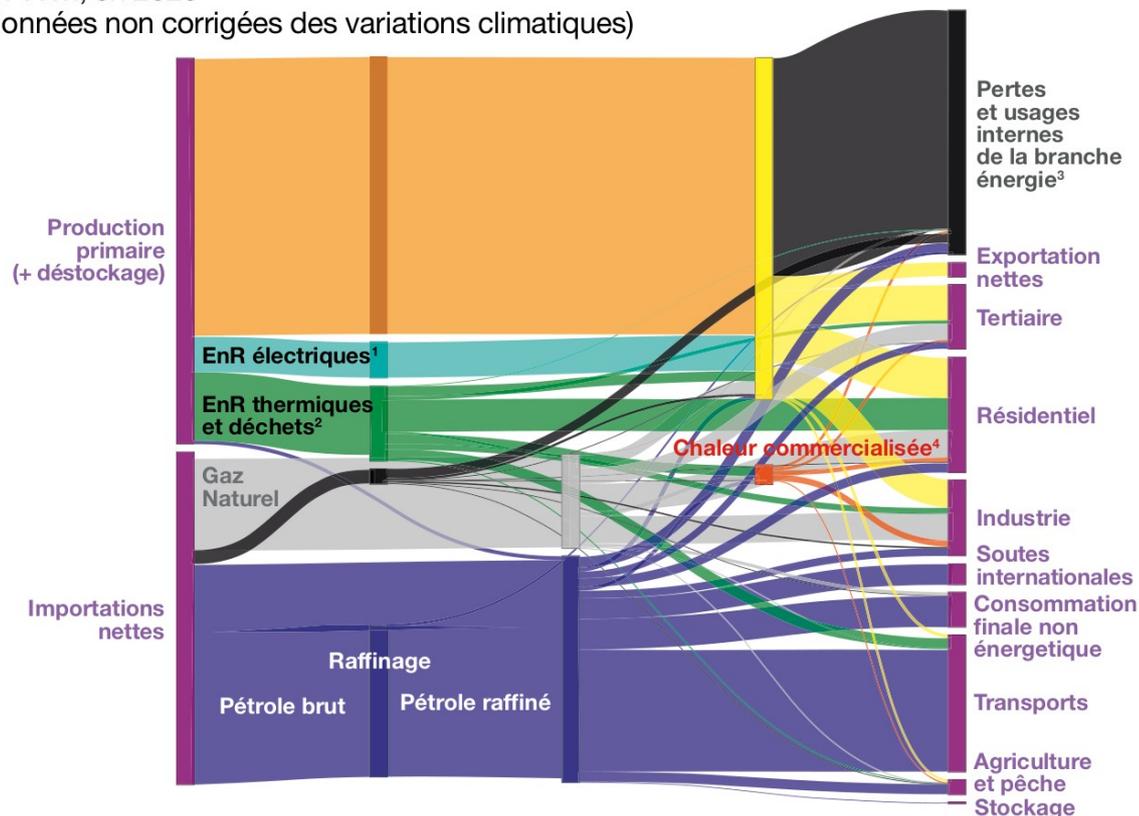
Elle s'établit à 2 523 TWh en 2023 (en données réelles non corrigées des variations climatiques).

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Consommation d'énergie primaire

ENSEMBLE DES ÉNERGIES - BILAN ÉNERGÉTIQUE DE LA FRANCE

En TWh, en 2023
(données non corrigées des variations climatiques)



La France produit 1420 TWh d'énergie primaire et en importe 1103 TWh, pour un total de 2523 TWh.

Elle consomme 1496 TWh d'énergie finale (diapo suivantes).

La différence est constituée des pertes et usages internes du système énergétique (902 TWh au total), des exportations nettes d'électricité (50 TWh) et des soutes aériennes et maritimes internationales (carburant des bateaux et avions, 75 TWh) exclues par convention de la consommation finale.

1. Y compris énergies marines, hors accumulation par pompage.
2. Énergies renouvelables thermiques.
3. L'importance des pertes dans le domaine de l'électricité tient au fait que la production nucléaire est comptabilisée pour la chaleur produite par la réaction, chaleur dont un tiers de l'énergie est convertie en énergie électrique, les deux tiers restants étant dissipés dans l'environnement.
4. La chaleur retracée ici est la chaleur vendue (par les réseaux de chaleur ou cogénérée).

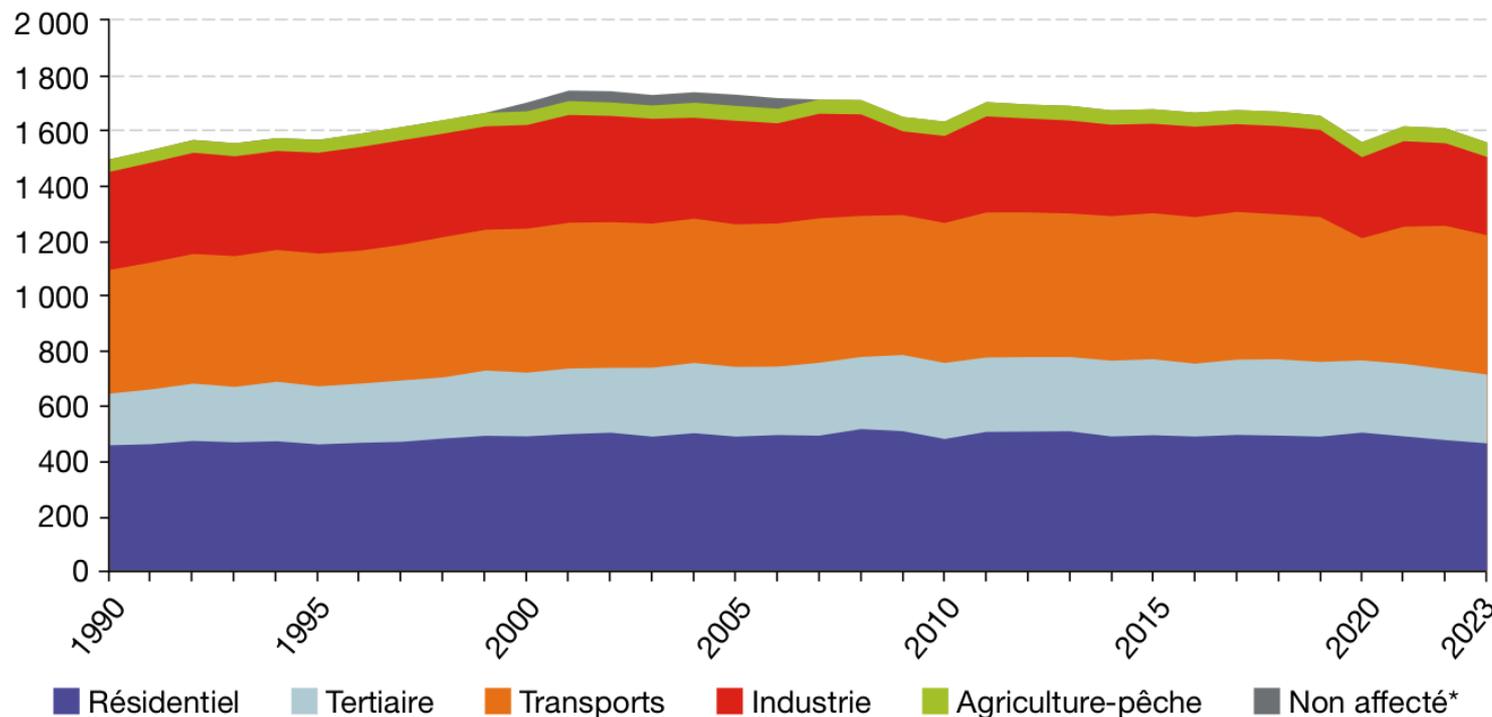
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Consommation d'énergie finale (1990-2023)

CONSOMMATION FINALE ÉNERGÉTIQUE PAR SECTEUR

TOTAL : 1 549 TWh en 2023 (donnée corrigée des variations climatiques)

En TWh (données corrigées des variations climatiques)

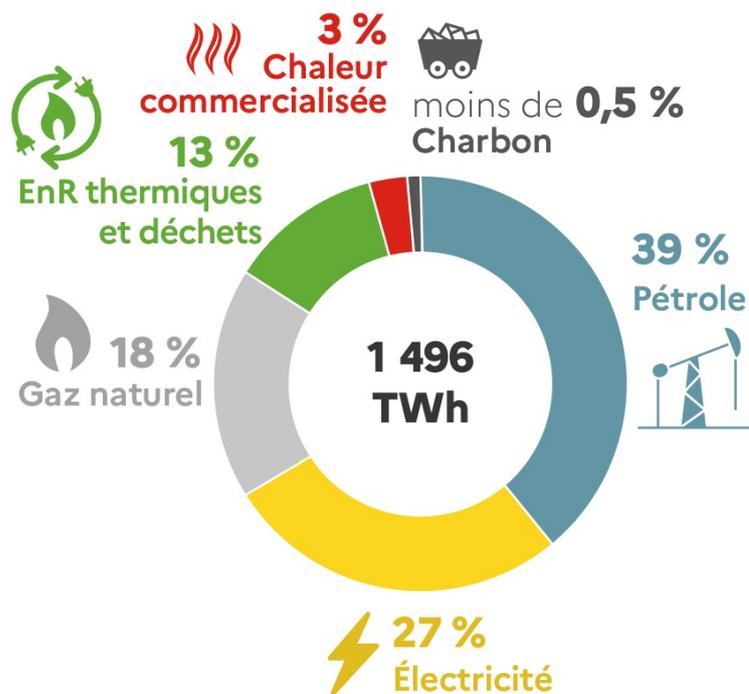


Après une croissance quasi continue entre 1990 et 2001, la consommation finale énergétique en France s'est infléchie (-0,7 % en moyenne annuelle entre 2011 et 2022, à climat corrigé).

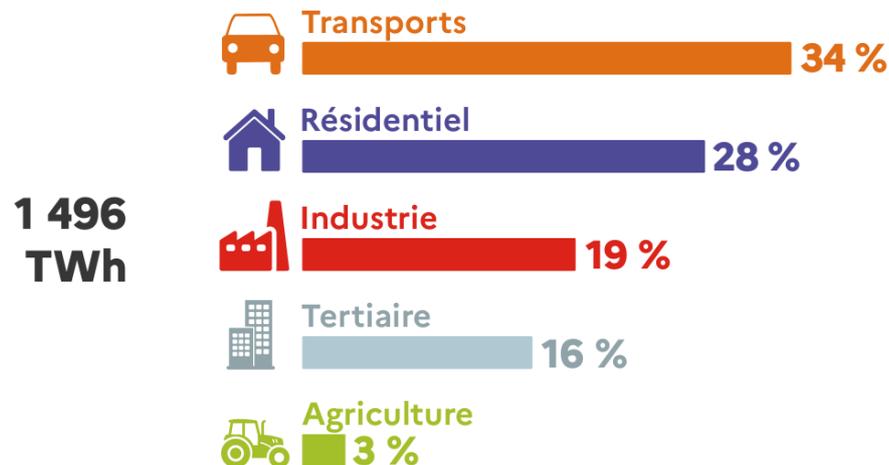
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Consommation d'énergie finale (2023)

Consommation finale à usage énergétique par énergie en 2023



Consommation finale énergétique par secteur en 2023



Note : la valeur de 1 549 TWh de la diapo précédente correspond à la version « à climat corrigé » des 1 496 TWh affichés sur cette diapo.

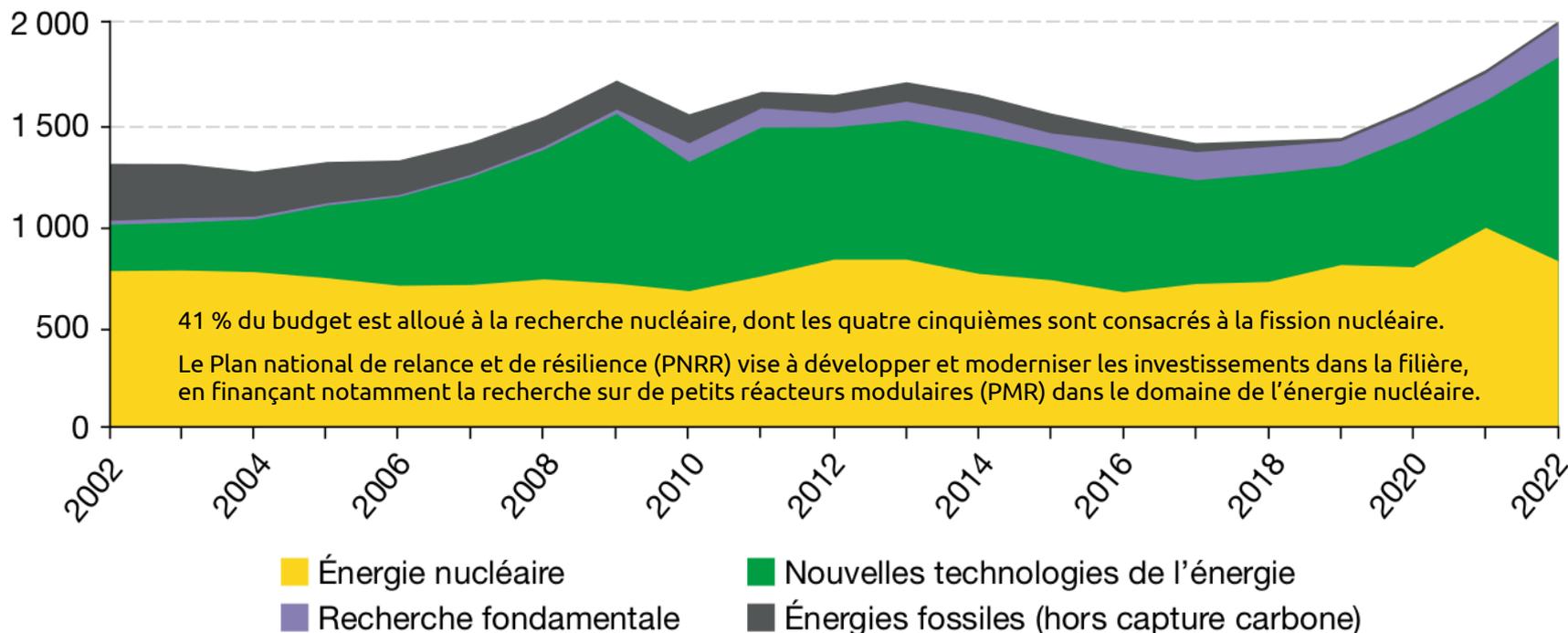
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Dépenses publiques de R&D (2002-2022)

DÉPENSES PUBLIQUES DE R&D SELON LE DOMAINE D'APPLICATION

TOTAL : 2,0 milliards d'euros en 2022

En millions d'euros constants 2022



Pour rester vigilant sur le vocabulaire employé ...

Les diapos suivantes traitent des moyens production d'énergie primaire en France, et non uniquement des moyens de production d'électricité.

On peut par exemple penser au gaz naturel, qui peut être :

- employé pour alimenter un réseau de gaz de ville. Auquel cas il s'agit de l'énergie finale achetée par l'utilisateur, qui pourra ensuite la convertir en chaleur.
- Brûlé pour générer de l'électricité. Auquel le gaz est de l'énergie primaire et l'électricité produite est l'énergie finale.

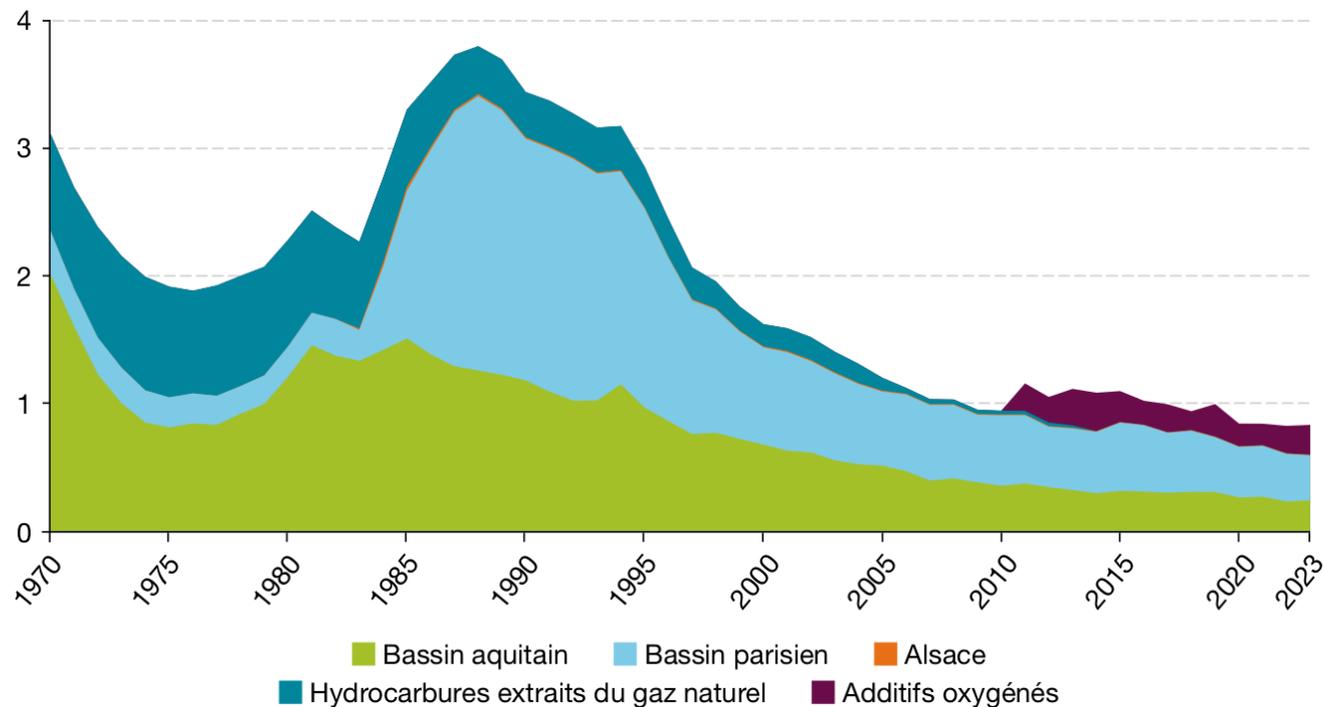
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : pétrole

PRODUCTION PRIMAIRE DE PÉTROLE*

TOTAL : 0,8 Mtep en 2023, soit 9,7 TWh

En Mtep



Divisée par 3 depuis le début des années 1990, la production primaire de pétrole ne représente plus que 1 % de la consommation nationale.

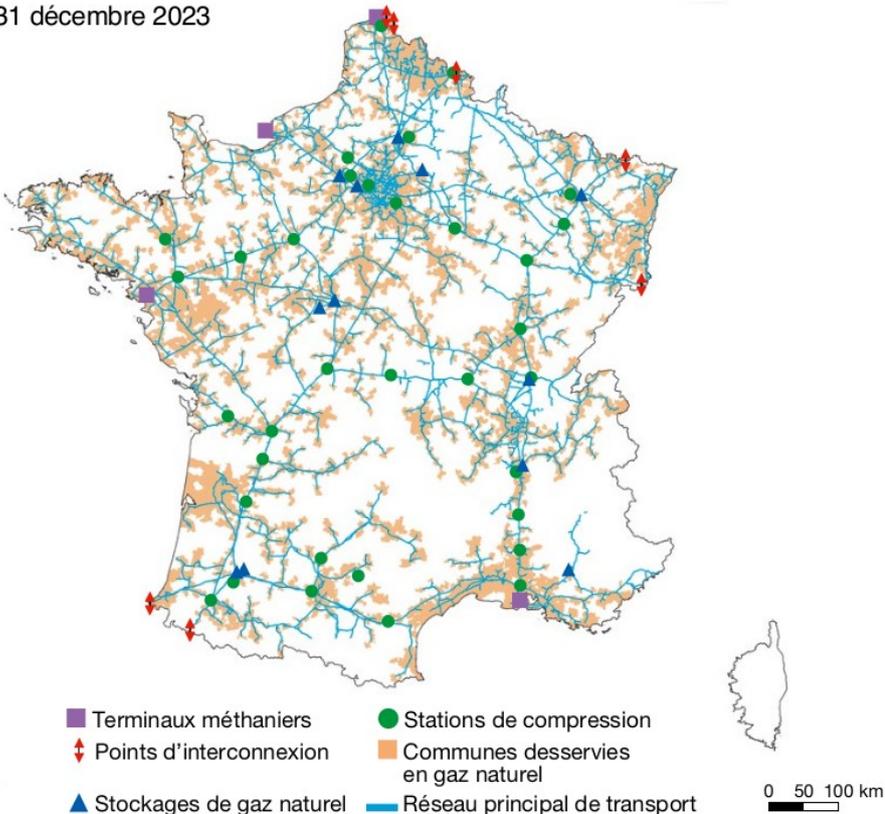
Au 1^{er} janvier 2024, les réserves de pétrole brut de la France (9.3 Mtep) représentent 11 ans d'exploitation au rythme actuel, et un peu plus de deux mois de consommation nationale.

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : gaz naturel

RÉSEAUX DE TRANSPORT, DE STOCKAGE ET COMPRESSION DE GAZ NATUREL

Situation au 31 décembre 2023



Dans un contexte de moindre recours aux centrales thermiques, d'efforts de sobriété et de niveau de stockage assez élevé en fin d'année 2022, les importations françaises de gaz naturel diminuent en 2023 pour s'établir à 532 TWh PCS (- 16,7 % par rapport à 2022).

Les importations de gaz via gazoduc se replient davantage que celles de gaz naturel liquéfié (GNL), respectivement de 18,2 % et de 15,7 % par rapport à 2022. La part du GNL dans les importations, qui a fortement progressé en 2022 dans le contexte de réduction des exportations de gaz russe vers l'Union européenne, se stabilise à 59 %, en 2023 comme en 2022. Elle était beaucoup plus faible auparavant (35 % en 2021).

Les exportations de gaz, qui avaient nettement cru en 2022 en raison de l'exportation plus massive vers les pays voisins, se replient de 9,0 % en 2023 et atteignent 156 TWh PCS.

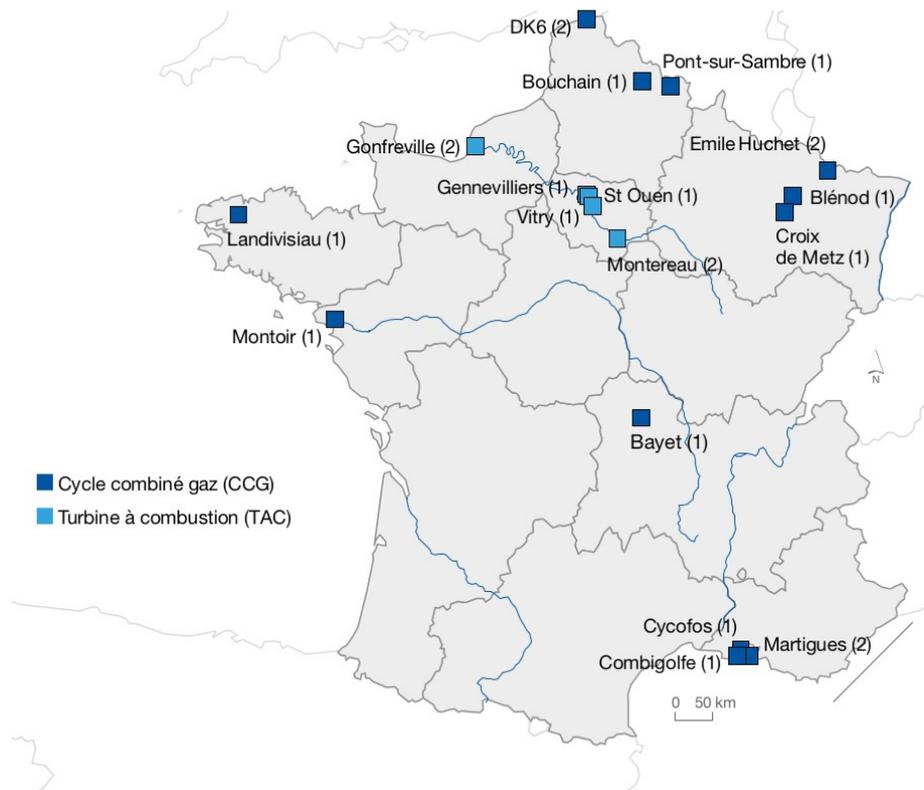
1 TWh PCS = 1 TWh en pouvoir calorifique supérieur (dégagement maximal théorique de chaleur pendant la combustion).

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : gaz naturel

LES CENTRALES À GAZ EN FRANCE

Situation au 31 décembre 2023



Source : RTE

Parmi les centrales thermiques ne produisant que de l'électricité, celles fonctionnant au gaz affichent en moyenne le meilleur rendement.

Elles convertissent ainsi en moyenne 50 % de l'énergie contenue dans le combustible en électricité (nette de la consommation des auxiliaires), contre 37 %, 35 % et 24 % pour celles utilisant respectivement des produits pétroliers, du charbon ou des énergies renouvelables et des déchets.

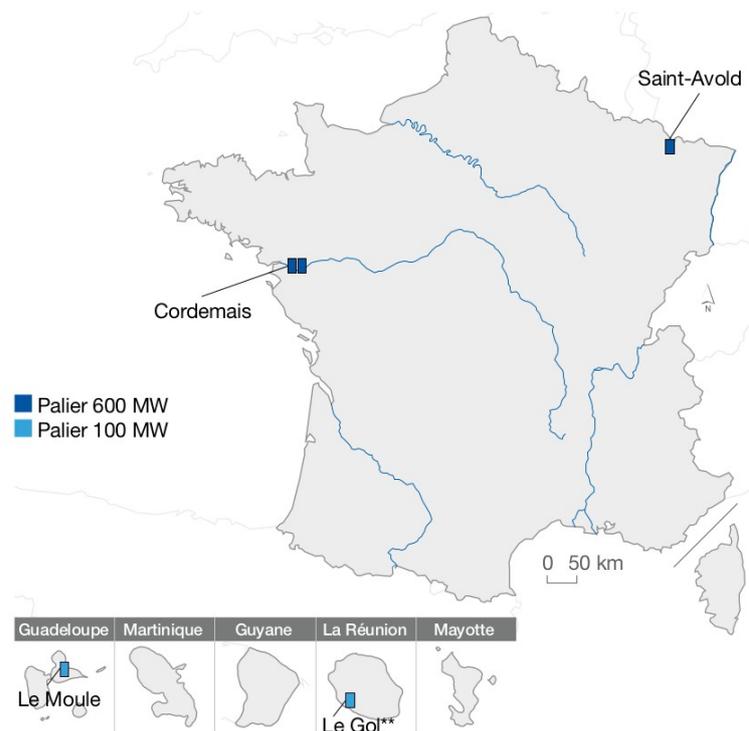
En effet, la transformation de gaz en électricité est aujourd'hui essentiellement assurée (hors cogénération) par des centrales à cycle combiné, plus efficaces d'un point de vue énergétique que les centrales thermiques traditionnelles.

PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : charbon

LES CENTRALES THERMIQUES AU CHARBON EN FRANCE*

Situation au 31 décembre 2023



En métropole, seules trois unités de production, réparties sur deux sites, Saint-Avold et Cordemais, sont encore actives fin décembre 2023 à la suite de la fermeture, début 2021, des sites du Havre et de Provence.

En outre-mer, les centrales à charbon utilisent également un combustible renouvelable issu de la canne à sucre, la bagasse, durant la campagne sucrière. Leur conversion en centrales utilisant 100 % de combustibles renouvelables (bagasse-biomasse) est en cours. Certaines usines de rhum ou sucre sont d'ailleurs autonomes en énergie grâce à la bagasse.

Dans ce cadre, l'installation de Bois-Rouge à La Réunion n'utilise plus de charbon depuis mars 2023, et celle du Gol a été convertie entièrement en février 2024.

* Capacité totale : 2 024 MW en décembre 2023.

** Installation convertie à la biomasse en février 2024.

Source : SDES, d'après EDF, GazelEnergie, Albioma

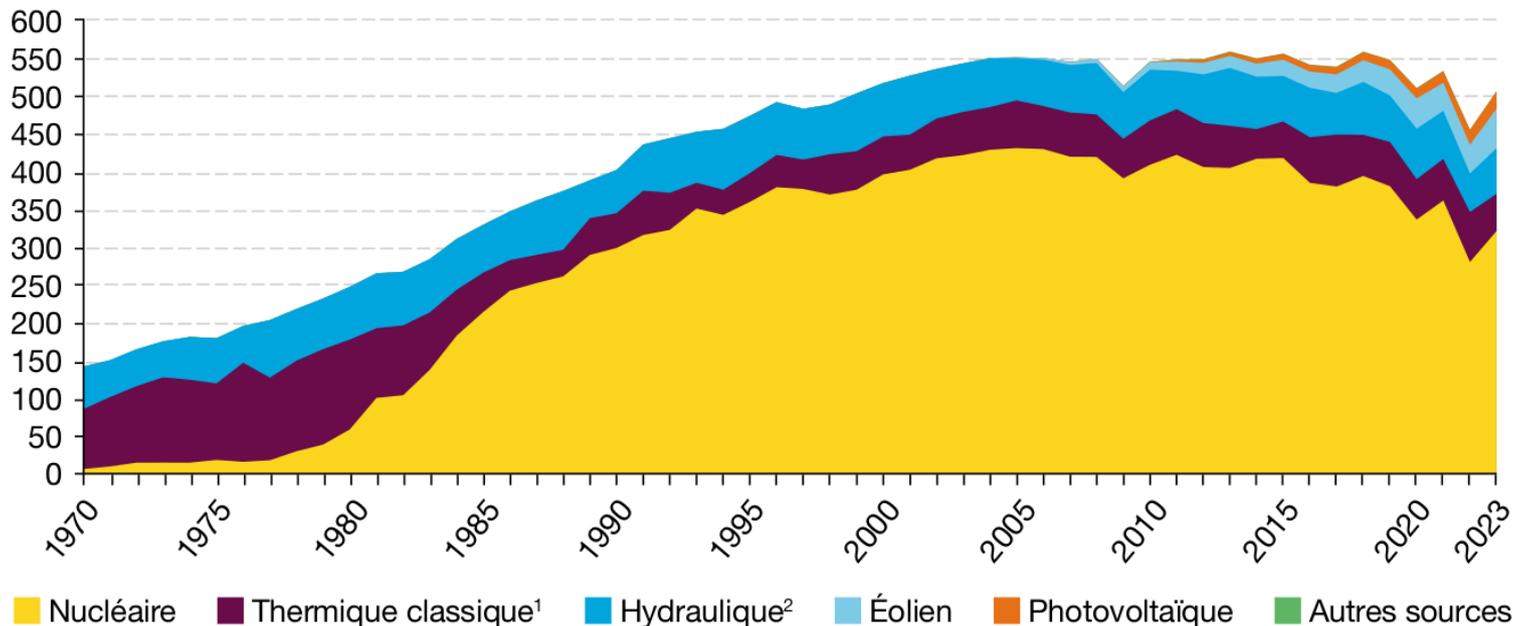
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : électricité

PRODUCTION NETTE D'ÉLECTRICITÉ

TOTAL : 505 TWh en 2023

En TWh



¹ Thermique à combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel), biomasse ou déchets.

² Y compris énergie marémotrice.

Mix énergétique : électricité

En 2023, la production nette d'électricité s'élève à 505 TWh, elle augmente de 11 % par rapport à l'année précédente.

- Nucléaire
 - rebond de production après l'arrêt de nombreux réacteurs en 2022 dû à la corrosion sous contrainte (+ 15 %, à 320 TWh).
- Hydraulique
 - augmente de 18,6 % (y compris pompage) après une année 2022 marquée par la sécheresse.
- Éolien
 - augmente de 38 % par rapport à son niveau 2022 en raison de l'augmentation du parc installé et des conditions de vent favorables.
- Photovoltaïque
 - progresse de 16 % en raison de la croissance du parc.
- Thermique
 - dans ce contexte, les centrales thermiques ont été beaucoup moins sollicitées en 2023 pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité (- 26 %, à 49 TWh).

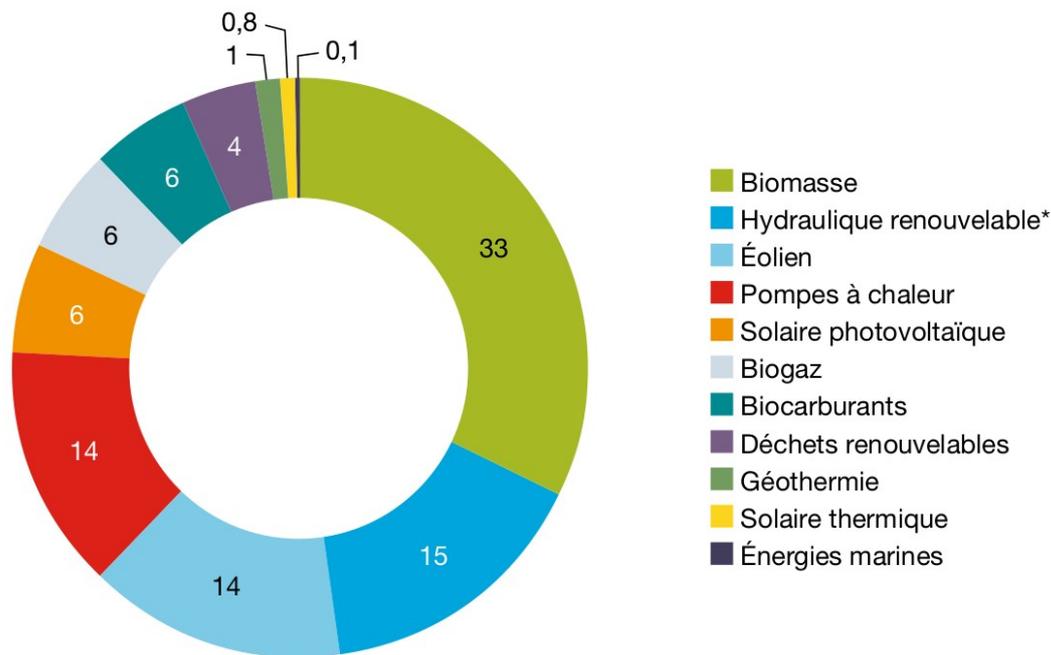
PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE

Mix énergétique : renouvelable

PRODUCTION PRIMAIRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES PAR FILIÈRE

TOTAL : 365 TWh en 2023

En %



En 2023, la production primaire d'énergies renouvelables s'élève à 365 TWh, soit 26 % de la production primaire d'énergie en France.

Les principales filières sont :

- la biomasse (33 %),
- l'hydraulique renouvelable (15 %),
- l'éolien (14 %),
- les pompes à chaleur (14 %),
- le solaire photovoltaïque (6 %).

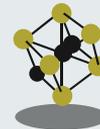
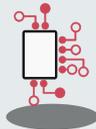
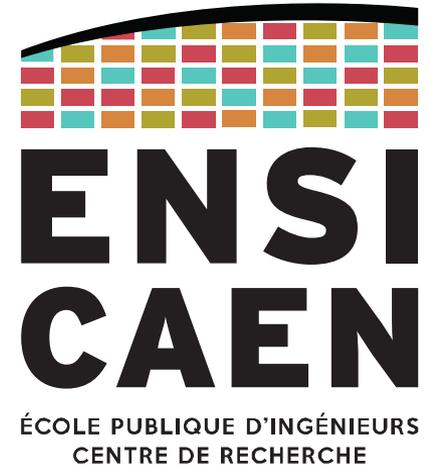
* Hydraulique hors pompages.

Champ : France.

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Dans le monde, en Europe, en France



PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

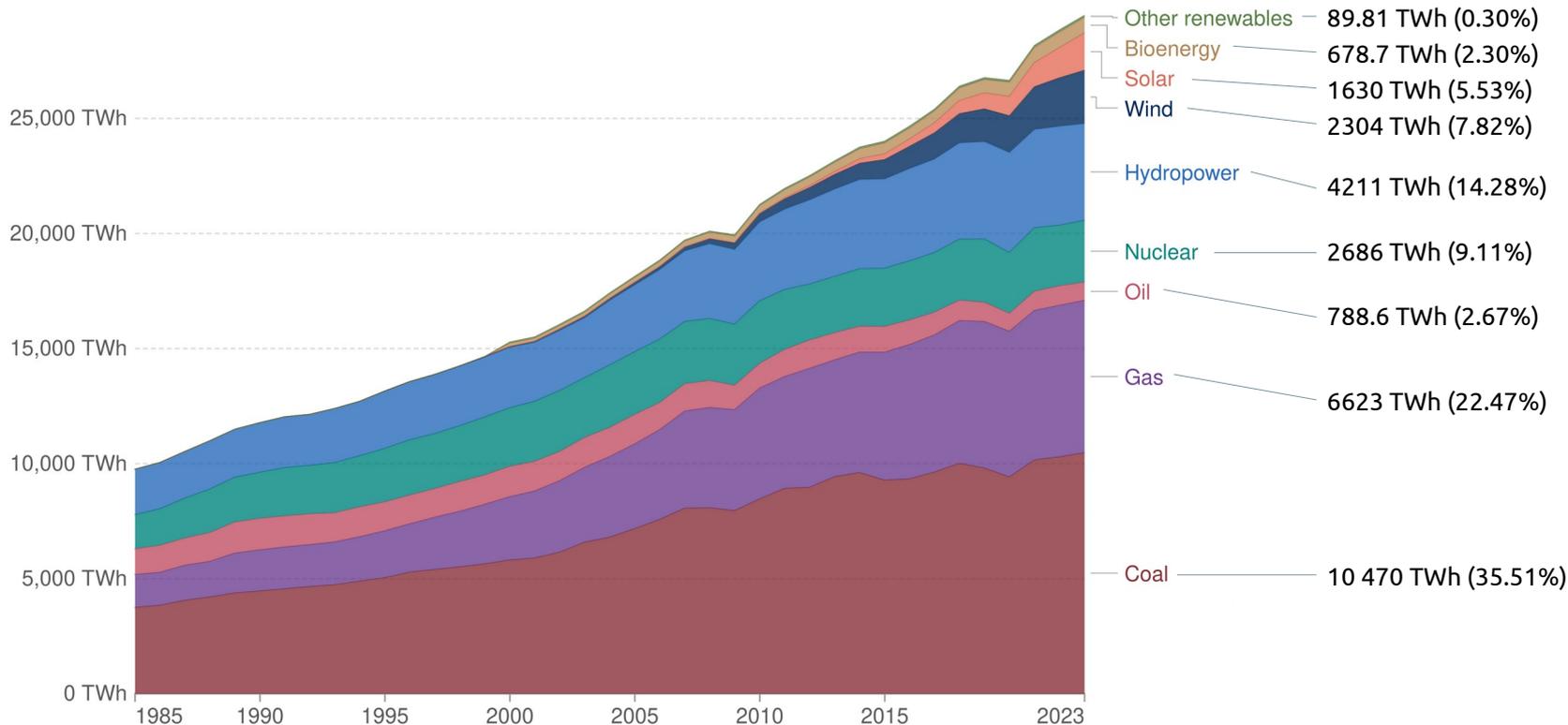
Les sources d'énergie électrique au niveau mondial

Electricity production by source, World

Measured in terawatt-hours¹.

Our World
in Data

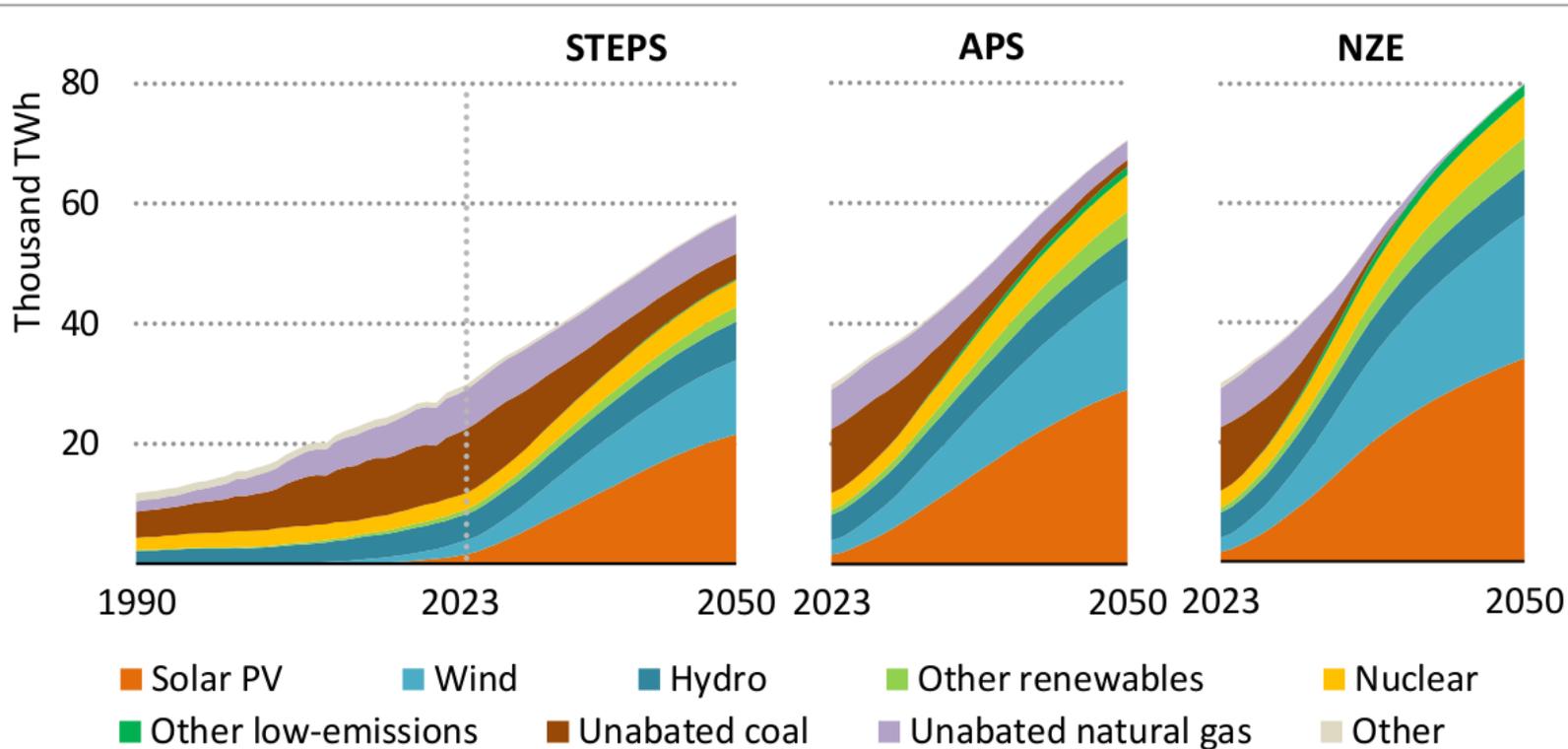
En 2023 : 29 479 TWh



PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau mondial

Figure 3.21 ▶ Global electricity generation by source and scenario, 1990-2050



Après plusieurs décennies de domination des énergies fossiles, les énergies renouvelables vont devenir la principale source de production d'électricité.

Other renewables : Géothermique, solaire thermique, marine
Other low-emissions : hydrogène, ammoniac, captage et stockage CO₂

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau mondial

Figure 1.14 ▶ Global installed clean power capacity and electricity generation, 2010-2023

Entre 2010 et 2023 :

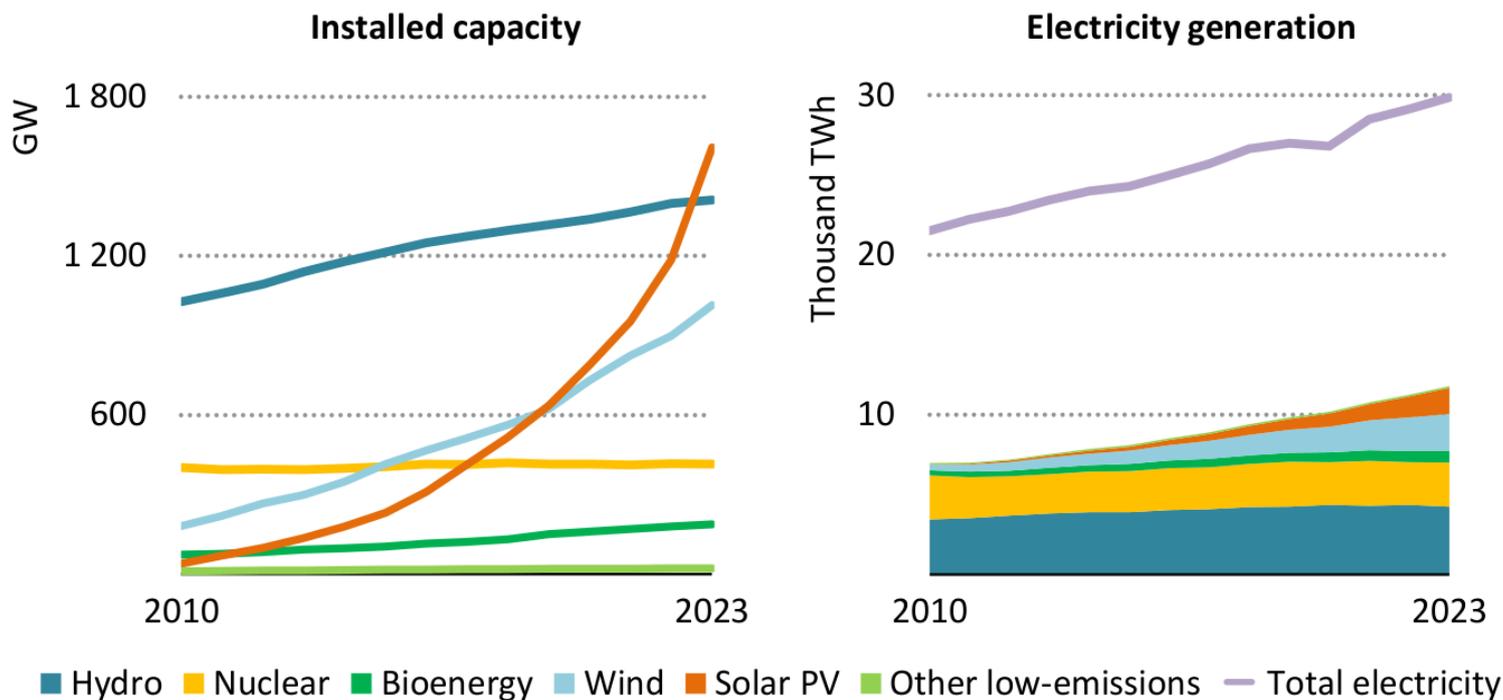
PV = x40

Éolien = x6

Bioénergie = x2.5

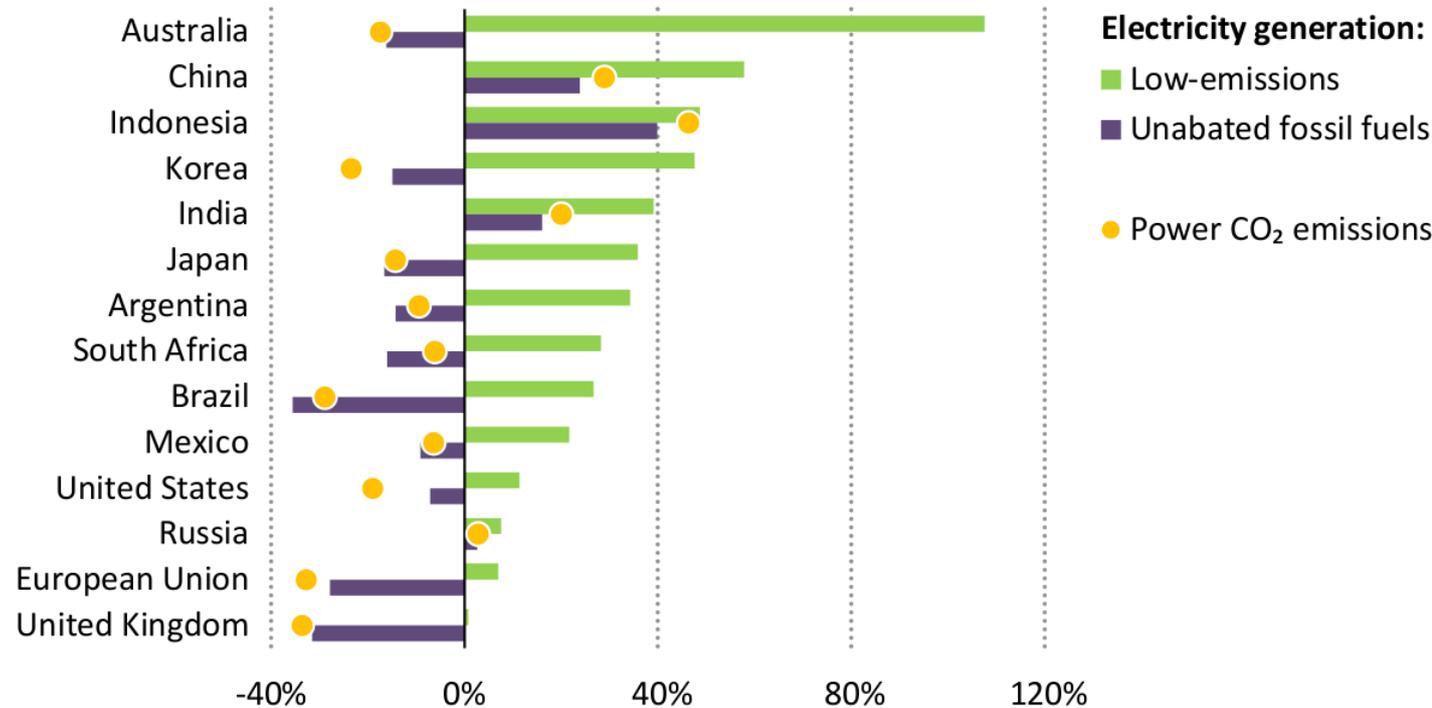
Hydraulique = x1.4

Cependant la demande d'énergie augmente plus vite que la production d'énergie verte.



Les sources d'énergie électrique au niveau mondial

Figure 1.15 ▶ **Change in electricity generation by source and power sector CO₂ emissions in selected regions, 2018-2023**



Entre 2018 et 2023, les sources d'énergie électrique à faible émission ont dépassé les sources d'énergies fossiles.

Note de traduction :

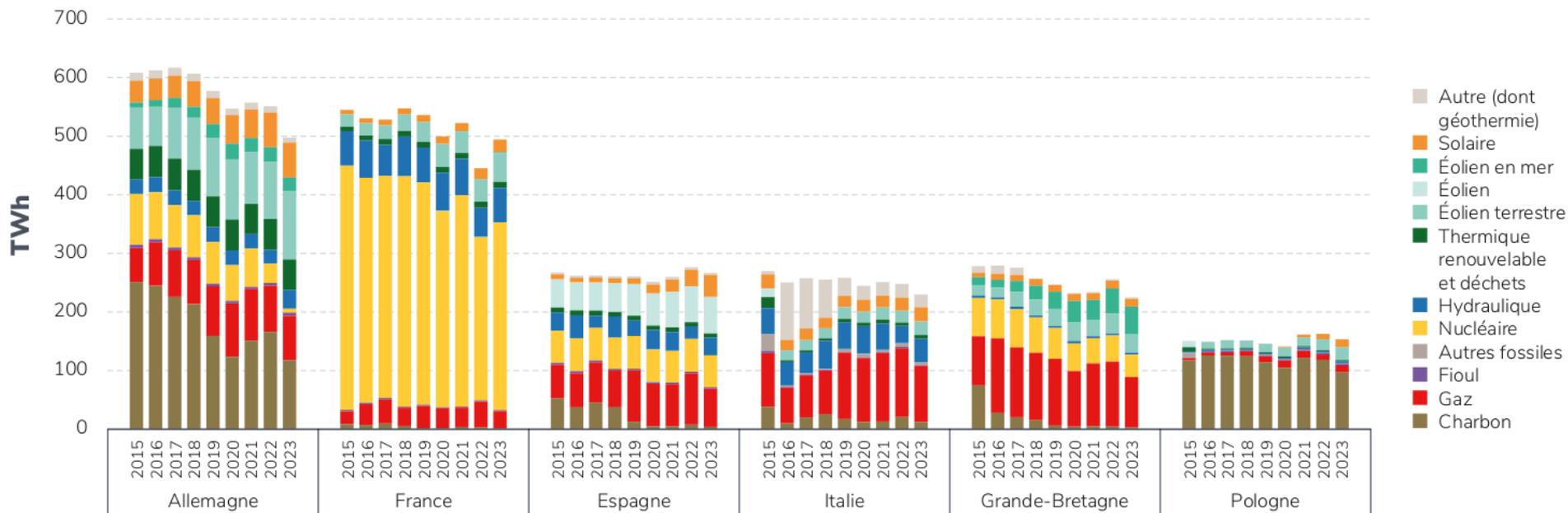
Unabated fossil fuels: production sans dispositif de capture ou de stockage du CO₂

CCUS = Carbon Capture, Utilization and Storage

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau européen

Figure 8.7 : Évolution de la production d'électricité, par filière, pour les six pays principaux producteurs en Europe



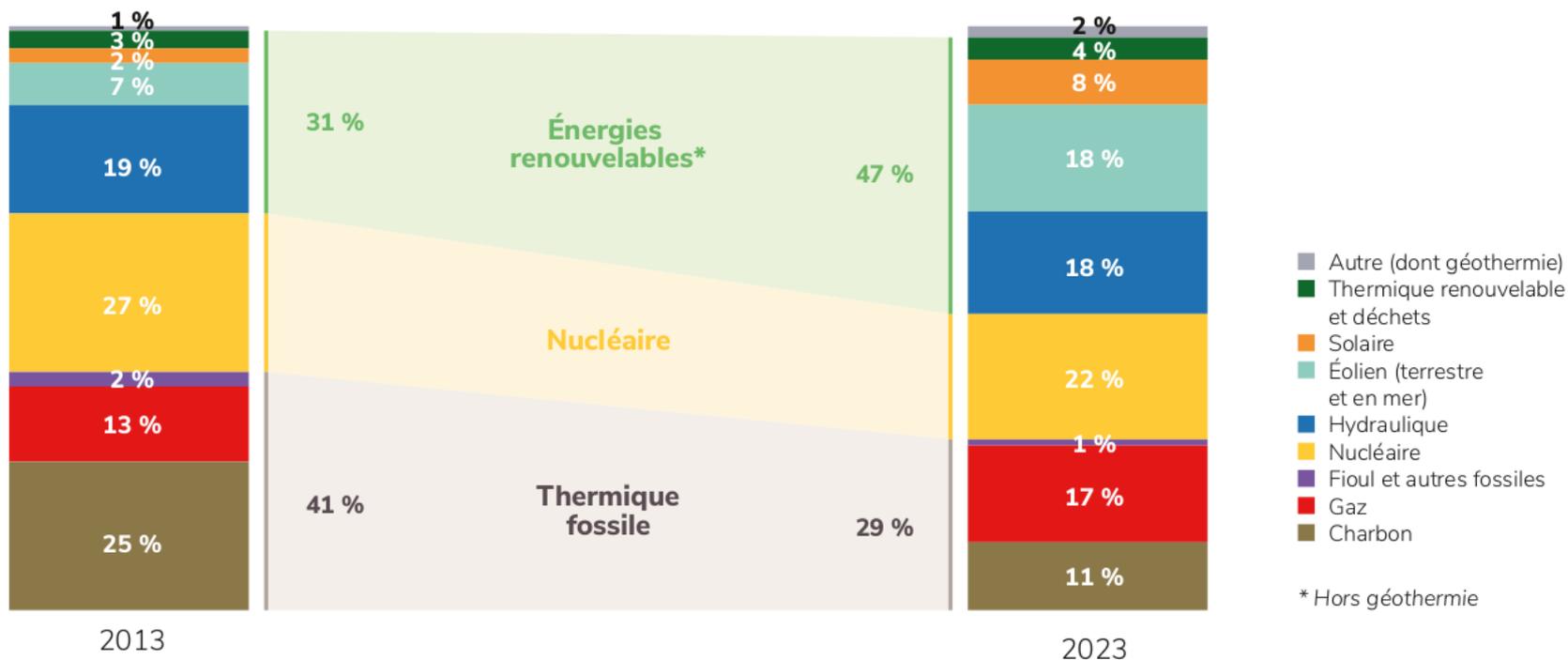
Sources : ENTSO-E, National Grid, Energy-Charts, REE

Certaines sources de données agrègent les catégories « éolien terrestre » et « éolien en mer » sous l'appellation « éolien ».

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau européen

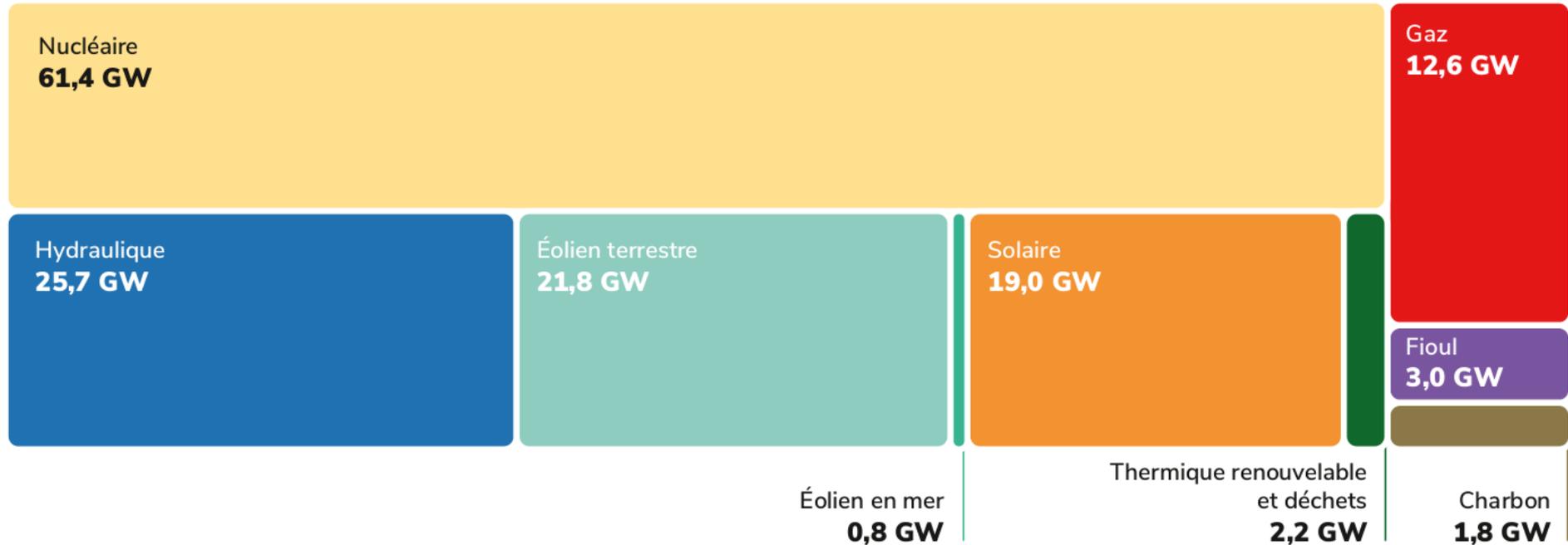
Figure 8.8 : Évolution de la production électrique en Europe, par filière, au cours des dix dernières années (périmètre ENTSO-E + Grande-Bretagne)



PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau national

Figure 2.5 : Parc de production d'électricité en France à fin 2023 et répartition par filière

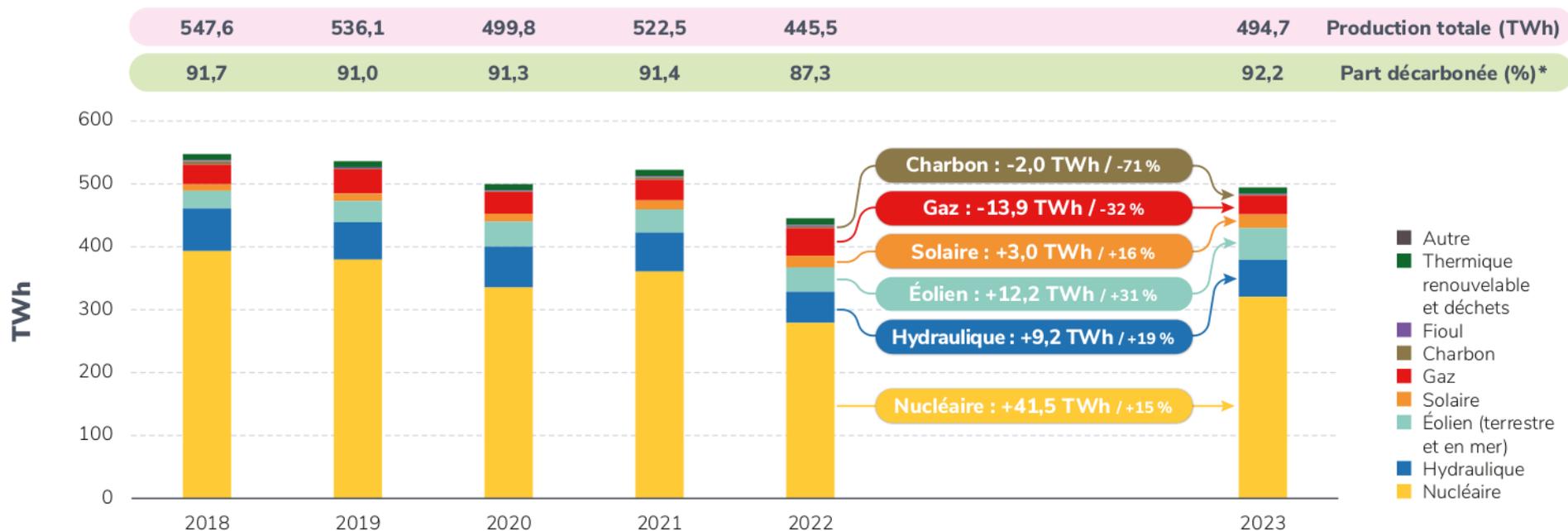


→ Soit une capacité totale de 148.3 GW, dont 88 % décarbonée.

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau national

Figure 2.1 : Évolution de la production totale d'électricité par filière, en France, entre 2018 et 2023, et part de production décarbonée

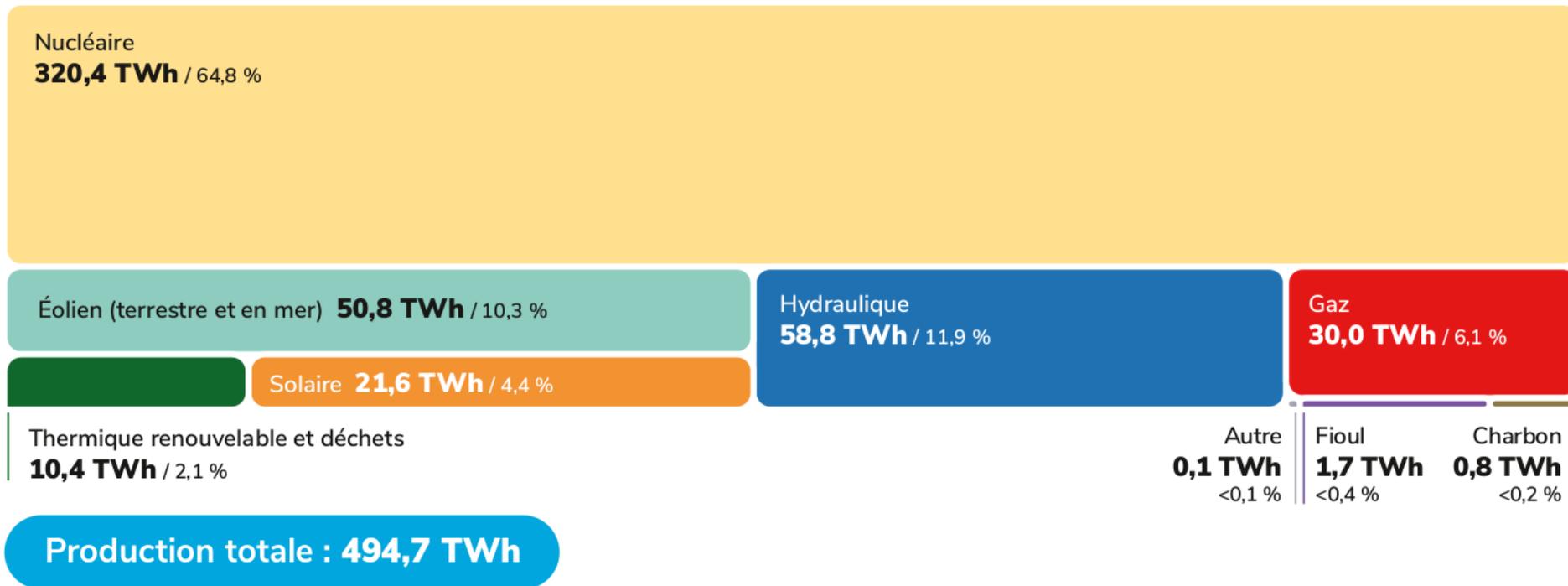


* La production à partir de déchets ménagers est considérée renouvelable à 50 %. La production hydraulique est retranchée de 70 % de la consommation de pompage des STEP selon la Directive européenne 2009/28/CE.

PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau national

Figure 2.3 : Production totale d'électricité en France en 2023 et répartition par filière



→ Soit une puissance instantanée moyenne de 56.47 GW pendant 8760 h chaque année.

Rappel : capacité de production installée = 148.3 GW, soit 38.1 % de facteur de charge.

Petit bonus, pour mettre ces chiffres en perspective (ou pas ...)

En 2022, au niveau mondial

Consommation globale des data-centers : 460 TWh

Data-centers « classiques » : 340 TWh

Fermes de crypto-monnaies* : 110 TWh

Data-centers dédiés IA : 10 TWh

En 2023, au niveau national

495 TWh : production totale d'électricité

320 TWh : production nucléaire

110 TWh : production hydraulique + éolien

10 TWh : production thermique renouvelable

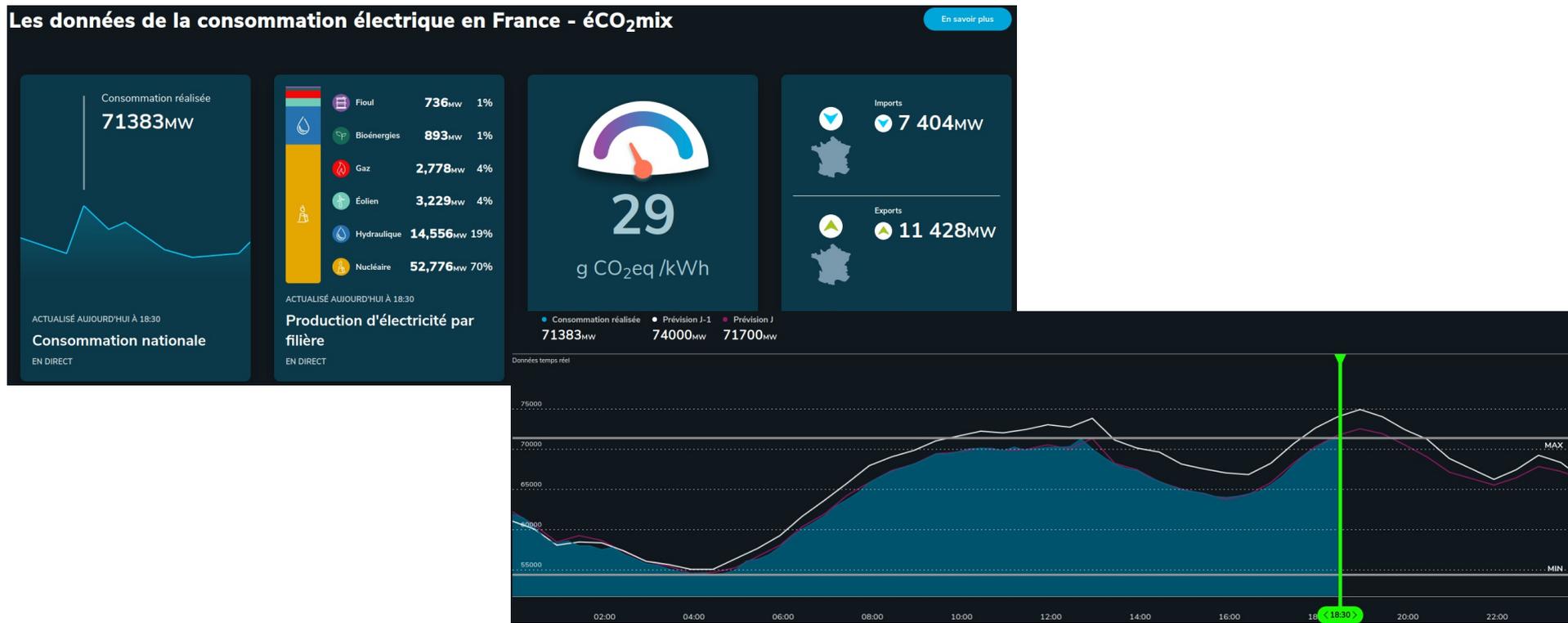
En 2022 les data-centers en Irlande représentent 17 % de la consommation électrique du territoire. On estime que ces data-centers consommeront un tiers de l'électricité Irlandaise en 2026.

* Quasi-exclusivement pour du Bitcoin ; Ethereum (n°2 en quantité de marché) ayant drastiquement réduit la consommation de son algorithme de minage.

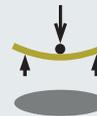
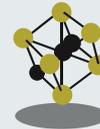
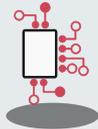
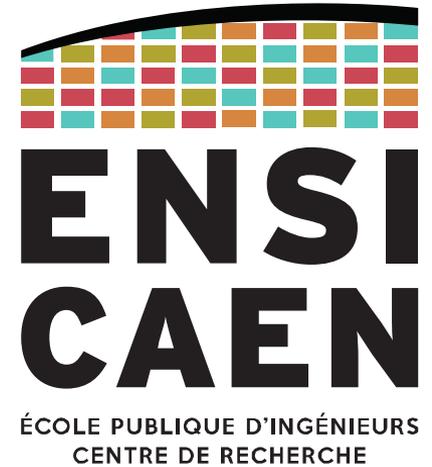
PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Les sources d'énergie électrique au niveau national

RTE met à disposition un site et une application éco2mix pour visualiser la consommation électrique française en temps-réel.



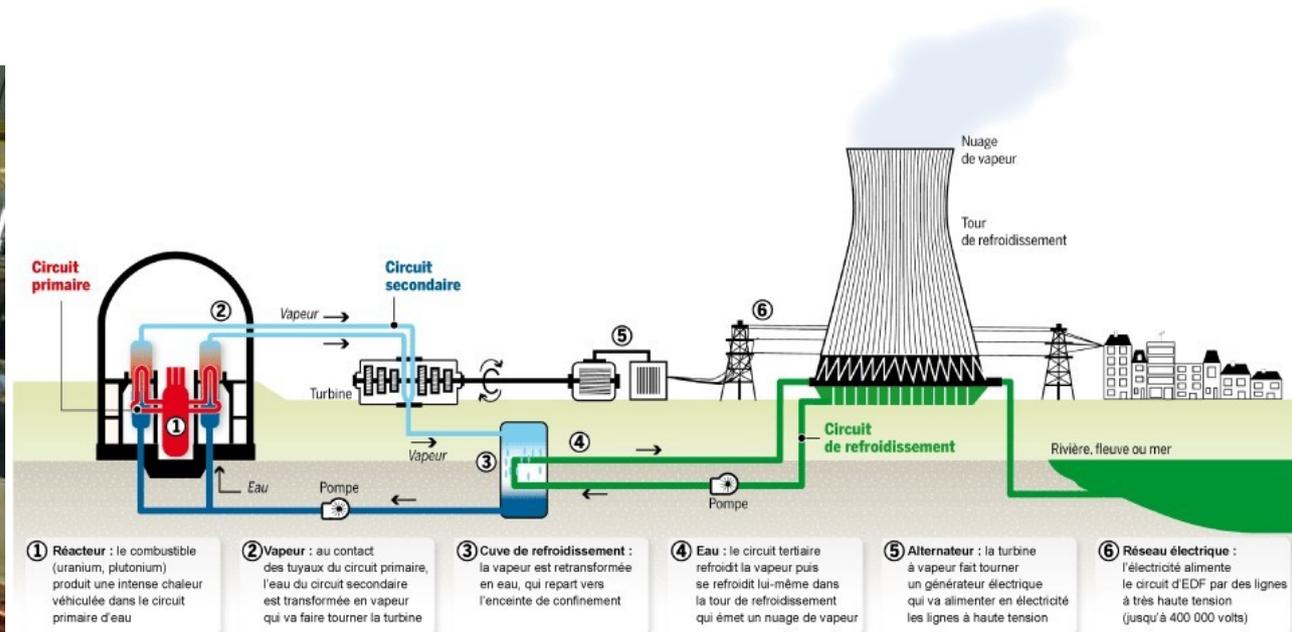
PRODUCTION NUCLÉAIRE



La production d'énergie électrique est assurée par un turbo-alternateur (ensemble turbine à vapeur et alternateur).

Dans le cadre de cet enseignement, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'alternateur synchrone, au transport et à la distribution de l'énergie électrique.

Turbo-alternateur d'un des REP de Flamanville



Avantages

- Peu sensible au prix de la matière première
- Stockage de la source relativement simple
- Coût de construction et d'exploitation
- Puissance unitaire de production élevée
- Coûts externes faible car peu de rejet de GES

Inconvénients

- Dépendance à la ressource (souveraineté, épuisement)
- Retraitement et stockage des déchets
- Démantèlement complexe et coûteux
- Risque d'accident et d'exposition aux radiations
- Rendement faible
(~33 % pour un REP, ~35 % pour un EPR)

En 2023, on dénombre 418 réacteurs nucléaires en fonctionnement et 59 en construction (dont 25 en Chine), pour une part à 9.11 % dans la production d'électricité.

Dans l'ordre, on retrouve en 2023 :

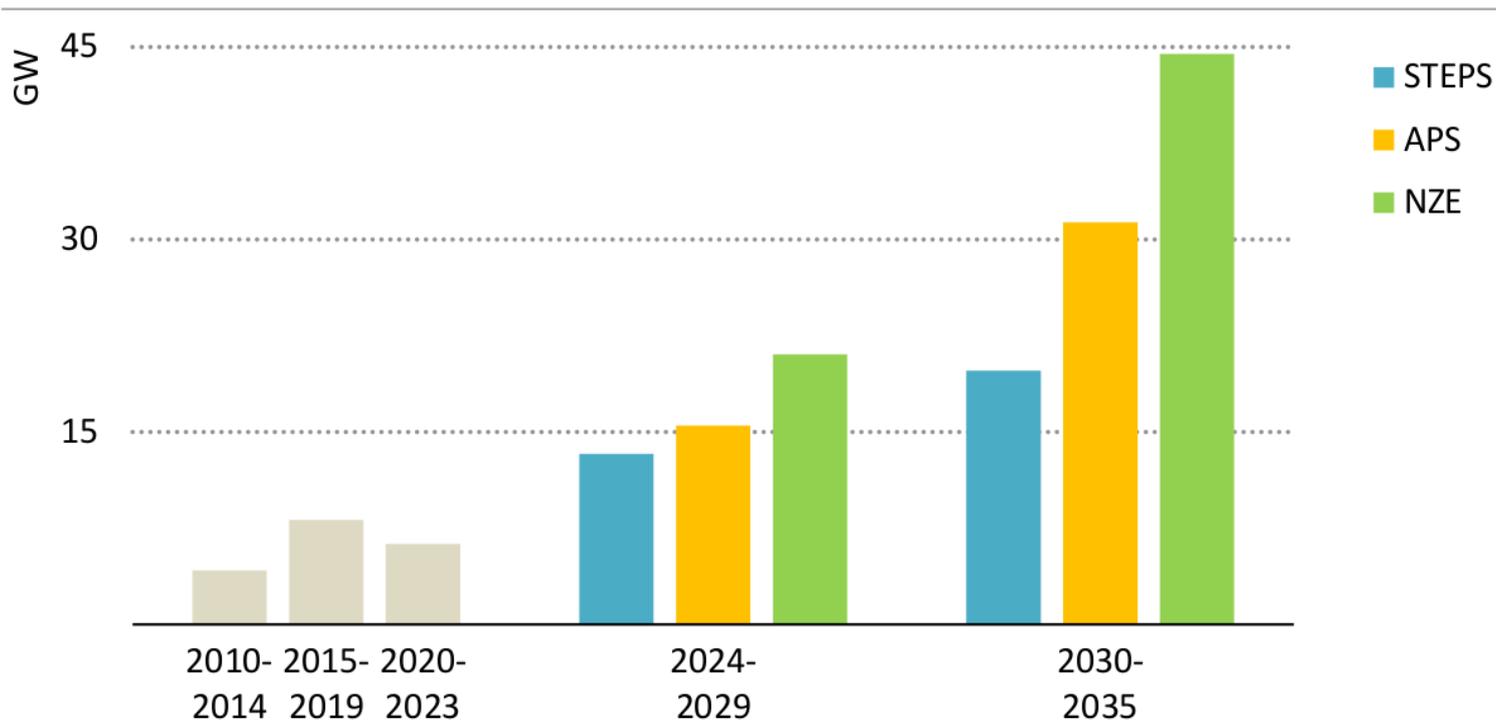
- 1) États-Unis, 93 réacteurs, 95.8 GW et 779 TWh
- 2) France, 56 réacteurs, 61.4 GW et 323 TWh
- 3) Chine, 55 réacteurs, 53.2 GW et 406 TWh



En 2010, le Japon occupait la troisième place du podium avec 54 réacteurs et 279 TWh produits. Toutefois avec l'accident nucléaire de Fukushima (11 mars 2011), le Japon arrêté tous ses réacteurs.

Depuis 2015 les Nippons ont entamé une remise en marche progressive avec de nouvelles règles de sécurité. Ainsi 12 réacteurs sont aujourd'hui en service, 21 toujours à l'arrêt et 27 définitivement arrêtés.

Figure 3.45 ▸ Annual average nuclear power capacity additions by scenario, 2010-2035



Au niveau mondial, l'installation de sources de production nucléaire augmentera dans tous les scénarios.

La Chine comptera pour 40 % des installations de nucléaires d'ici à 2035 avec le scénario STEPS, voire 50 % avec le NZE.

PRODUCTION NUCLÉAIRE

Sites de productions français

LES SITES NUCLÉAIRES EN FRANCE

Situation au 31 décembre 2023

- * REP : Réacteur à Eau Pressurisée
- ** EPR : Réacteur Pressurisé Européen
- *** Bugey est en circuit mixte

Palier REP* standardisé

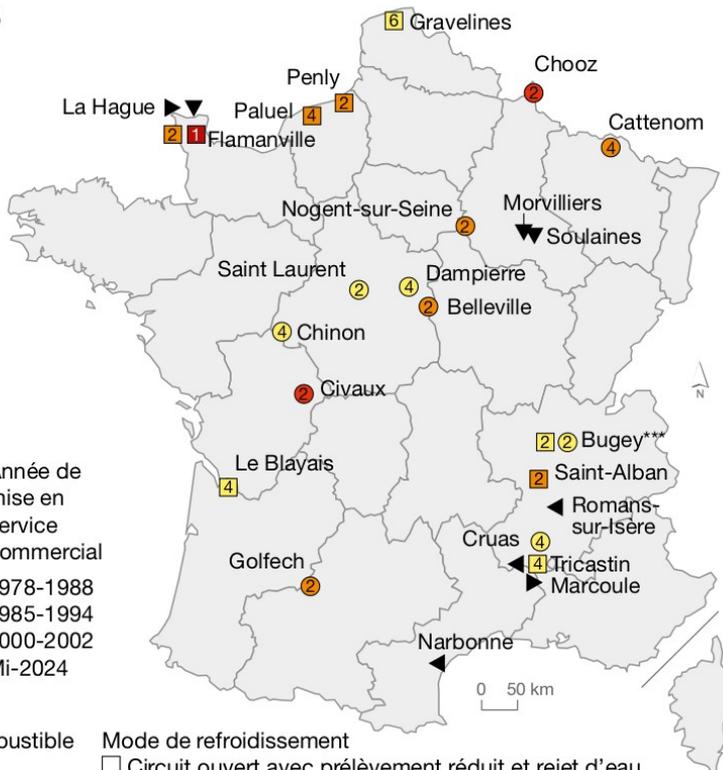
Puissance électrique nette	Nombre de tranches	Année de mise en service commercial
900 MW	32	1978-1988
1 300 MW	20	1985-1994
1 500 MW	4	2000-2002
1 650 MW (EPR**)	1 (en construction)	Mi-2024

4 Nombre de réacteurs

- ◀ Usine de l'amont du cycle du combustible (enrichissement...)
- ▶ Usine de l'aval du cycle du combustible (retraitement...)
- ▼ Centre de stockage des déchets

Mode de refroidissement

- Circuit ouvert avec prélèvement réduit et rejet d'eau dans les cours d'eau et la mer
- Circuit fermé avec prélèvement réduit et rejet de vapeur dans l'atmosphère via des tours aéroréfrigérantes



La France compte 56 réacteurs en service fin 2023.

Ils utilisent tous la technologie à eau pressurisée (REP) et ont été mis en service entre la fin des années 1970 et le début des années 2000.

Depuis décembre 2024, l'EPR de Flamanville est opérationnel.

PRODUCTION NUCLÉAIRE

Sites de productions français : Flamanville

Le site de Flamanville accueille deux REP (depuis 1985, 1986) et un EPR (2024).

Débuté en 2007 pour une fin estimée en 2012 avec un coût prévu à 3.4 Md€, l'EPR sera au final terminé en 2024 pour un coût de 23.7 Md€⁽¹⁾. Le réacteur est mis en service en mai 2024 et raccordé au réseau en décembre 2024.



Site de Flamanville (EPR en chantiers, les deux REP en fonctionnement)



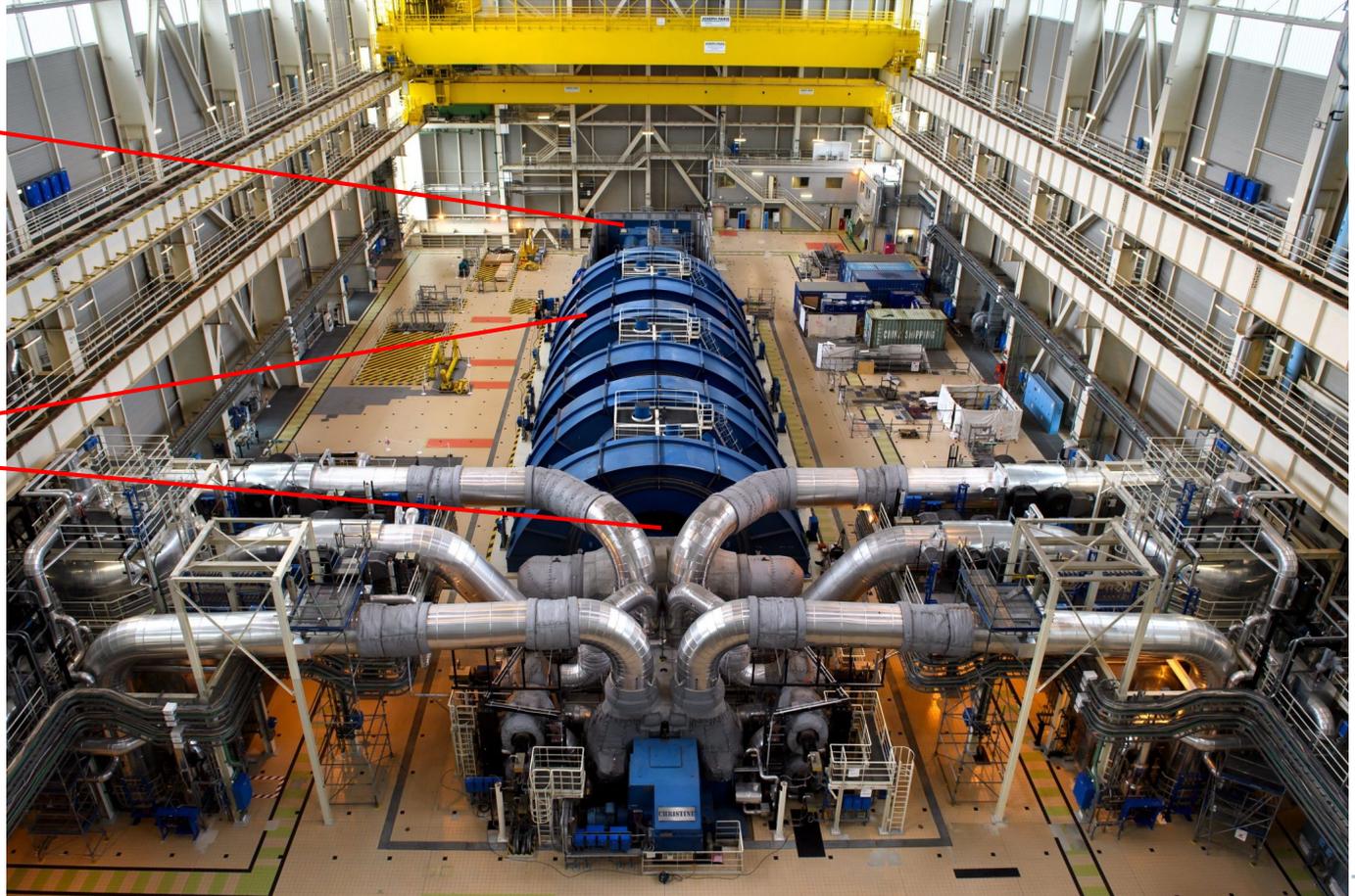
Chargement du combustible dans l'EPR (8 mai 2024)

Salle de l'EPR de Flamanville

Alternateur
Gigatop 4 pôles
(2000 MVA)

Turbine 1700 MW
(Arabelle-1700)

→ Basse pression
→ Haute pression



PRODUCTION NUCLÉAIRE

Sites de productions français : Flamanville

Turbine Arabelle-1700 de l'EPR

1700 MW, 1500 tr/min, lames d'1.90 m

Jusqu'à 75 bar, 300 °C



Alternateur Gigatop 4 pôles, 2000 MVA

Introduction du rotor de l'alternateur dans le stator



Stator 420 t au premier plan, Rotor en arrière-plan

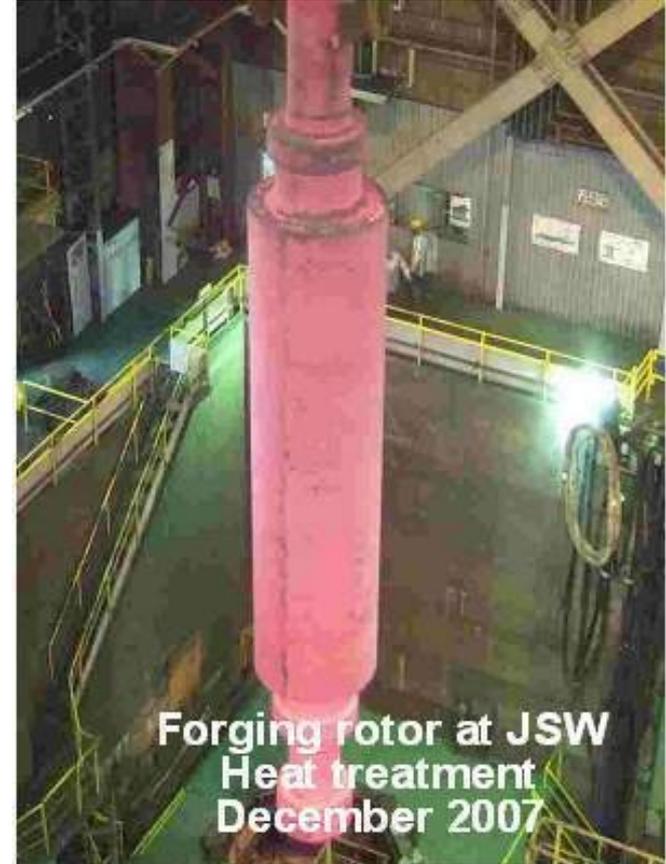


Fabrication



Forge du rotor de l'alternateur

- Lingot de 600 t
- 270 t pré-usiné



Le principal producteur français d'électricité est **EDF (Électricité de France)**, dont l'État français est actionnaire à 100 % (depuis le 31 juillet 2023, renationalisation).

En 2017, il s'agissait du deuxième producteur en terme de puissance installée (derrière *China Energy Investment*).



Malgré les nombreux débats autour du nucléaire (dont une bonne partie est justifiée), 64.8 % de l'électricité est produite à partir de l'énergie atomique en 2023, et plus de 93 % de la production d'électricité française ne génère aucune émission de gaz à effet de serre (à la production).

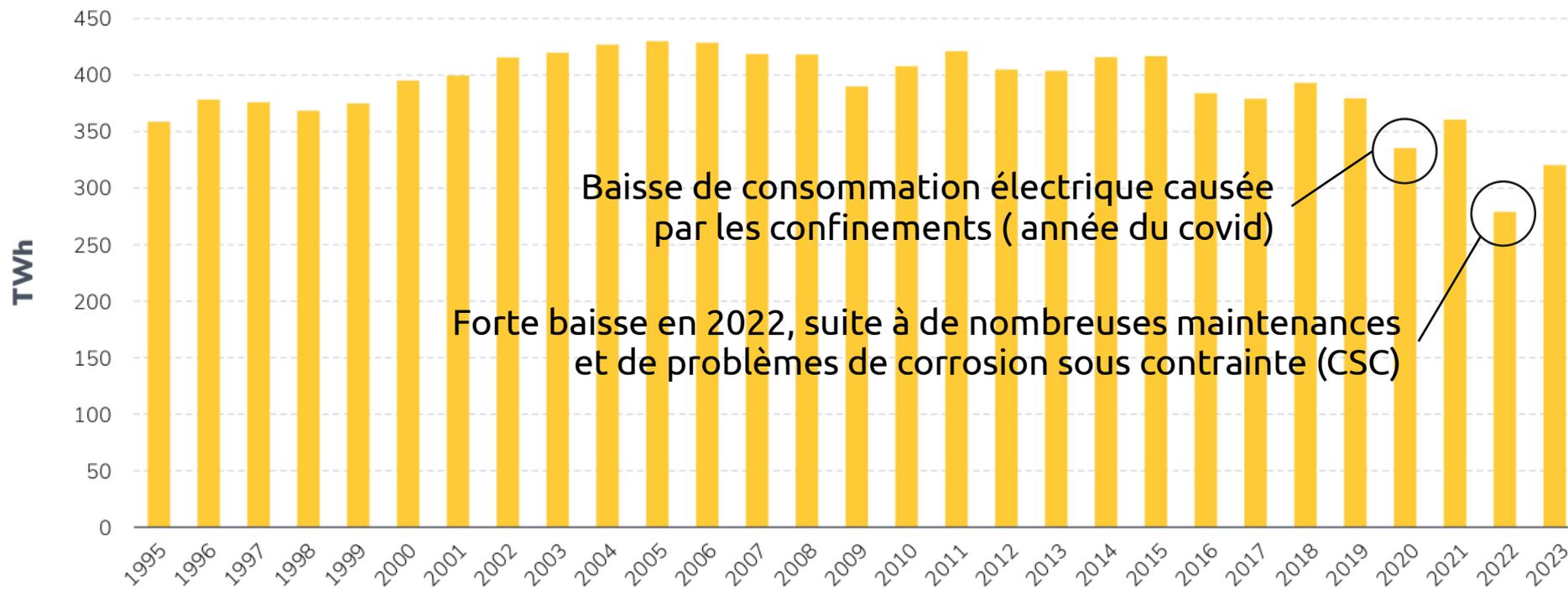
Orano (depuis 2018, anciennement AREVA) est l'un des leaders mondiaux du nucléaire, notamment au niveau de l'extraction minière.

L'entreprise est détenue à 90 % par l'État français.

Le groupe propose aux électriciens une offre qui couvre toutes les étapes du cycle du combustible, de la conception à la construction de réacteurs nucléaires en passant par des services durant l'exploitation.



Figure 2.6 : Évolution de la production nucléaire en France entre 1995 et 2023



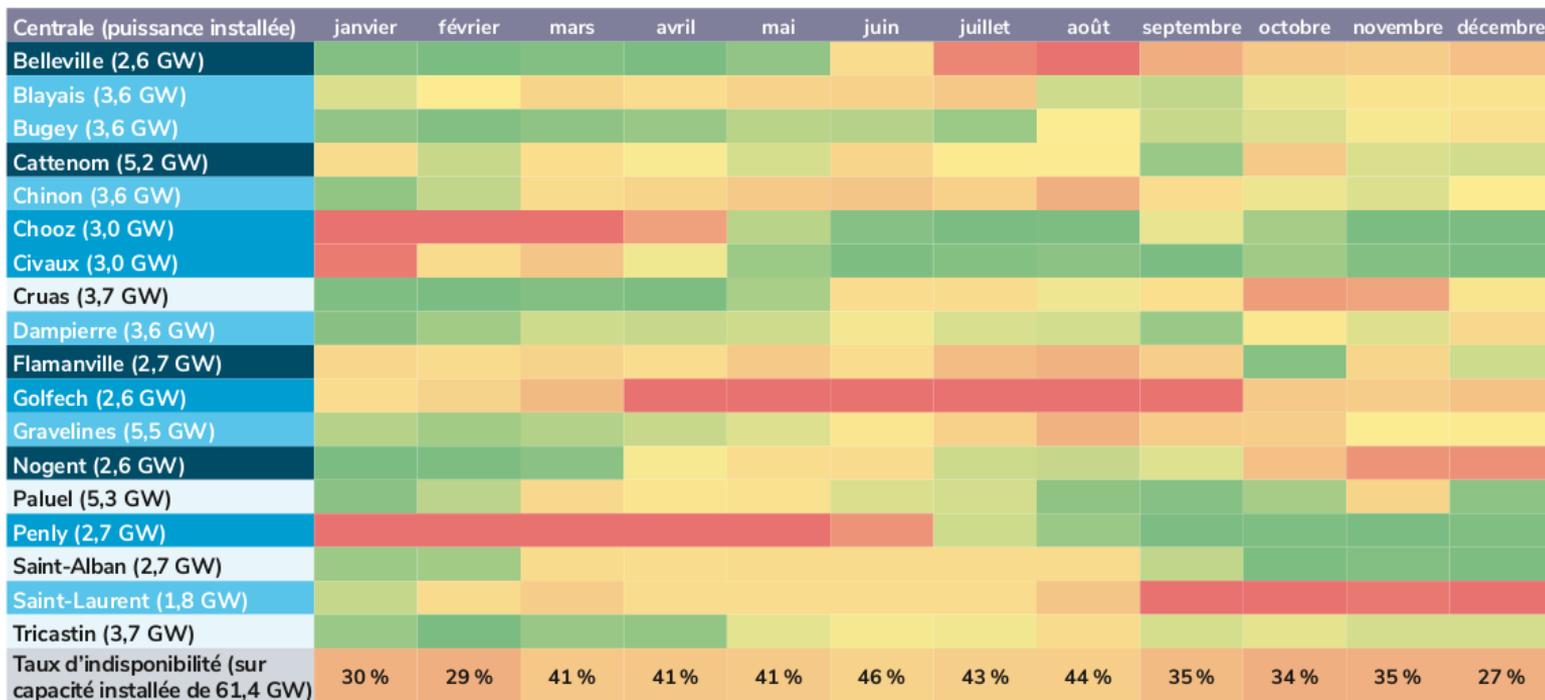
Baisse de consommation électrique causée par les confinements (année du covid)

Forte baisse en 2022, suite à de nombreuses maintenances et de problèmes de corrosion sous contrainte (CSC)

PRODUCTION NUCLÉAIRE

Production française

Figure 2.9 : Distribution de l'indisponibilité totale par centrale nucléaire et par mois de l'année 2023



- Centrales pour lesquelles des travaux en lien avec le phénomène de CSC* ont été réalisés sur l'un au moins des réacteurs en 2023 (comportant des réparations ou remplacements de tuyauteries)
- Centrales pour lesquelles une visite décennale a été menée sur l'un au moins des réacteurs en 2023 (comportant des éventuels contrôles en lien avec la CSC*, hors réparations et remplacements de tuyauteries)
- Centrales pour lesquelles l'un au moins des réacteurs a cumulé une visite décennale et des travaux en lien avec le phénomène de CSC* en 2023 (comportant des réparations ou remplacements de tuyauteries)

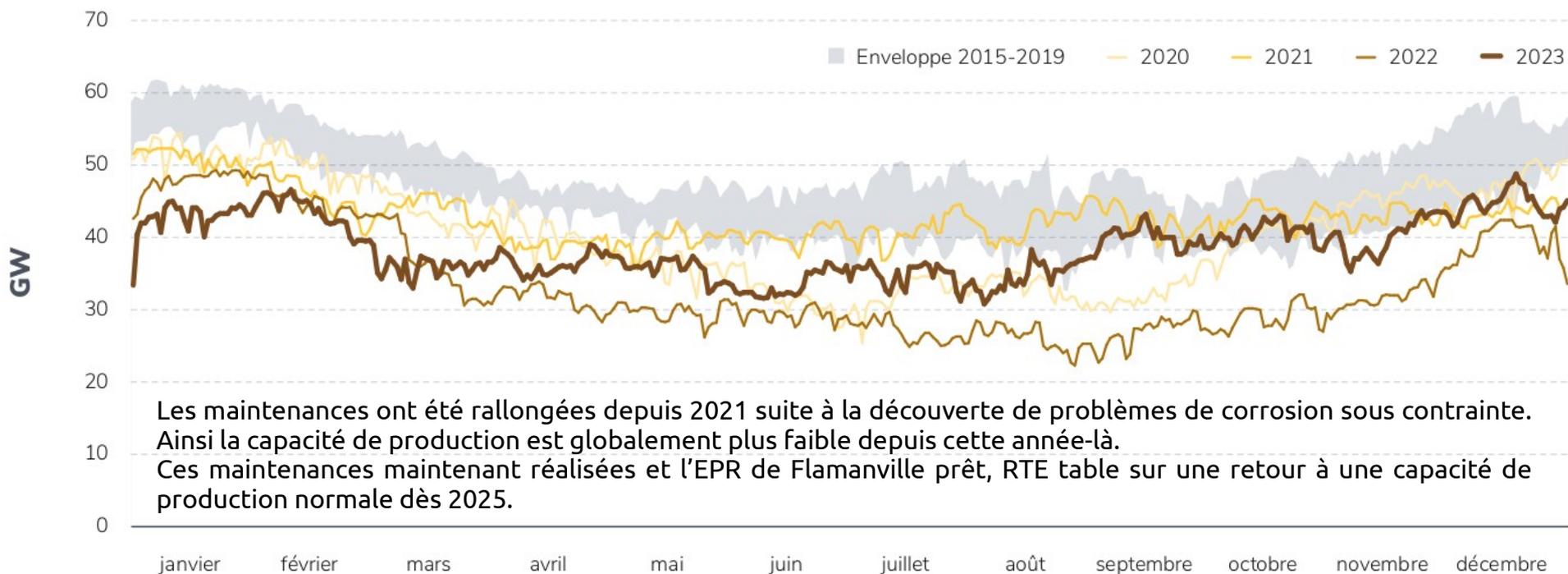
* CSC: Corrosion sous contrainte

Les centrales sont régulièrement mises à l'arrêt pour le rechargement du combustible (tous les 12 à 18 mois), pour les visites partielles de sûreté (3 mois tous les 4 ans) ou visites de sûreté décennales (6 mois tous les 10 ans).

PRODUCTION NUCLÉAIRE

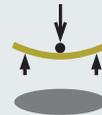
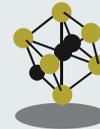
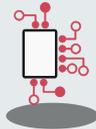
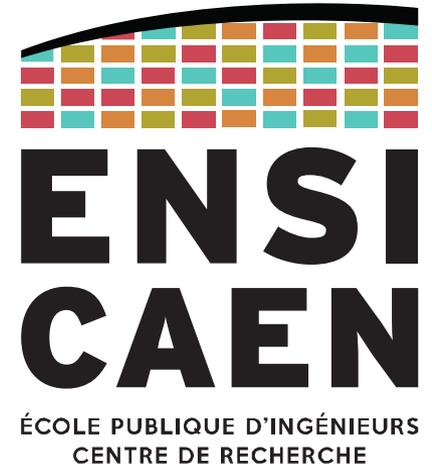
Production française

Figure 2.8 : Évolution de la disponibilité nucléaire quotidienne moyenne au cours de l'année 2023 et comparaison avec les années précédentes



Les maintenances ont été rallongées depuis 2021 suite à la découverte de problèmes de corrosion sous contrainte. Ainsi la capacité de production est globalement plus faible depuis cette année-là. Ces maintenances maintenant réalisées et l'EPR de Flamanville prêt, RTE table sur un retour à une capacité de production normale dès 2025.

PRODUCTION HYDRAULIQUE



On distingue deux catégories de centrales hydroélectriques.

Les **centrales gravitaires** utilisent l'énergie potentielle liée au dénivelé entre le réservoir et la centrale. Il existe différentes configurations selon la hauteur de chute.

$$P = Q \cdot H \cdot g \cdot \rho \cdot \eta$$

Q : Débit (m^3/s)

H : Hauteur (m)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

ρ : masse volumique (kg/m^3)

η : rendement (entre 0.6 et 0.9)

Les **Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)** ont deux bassins.

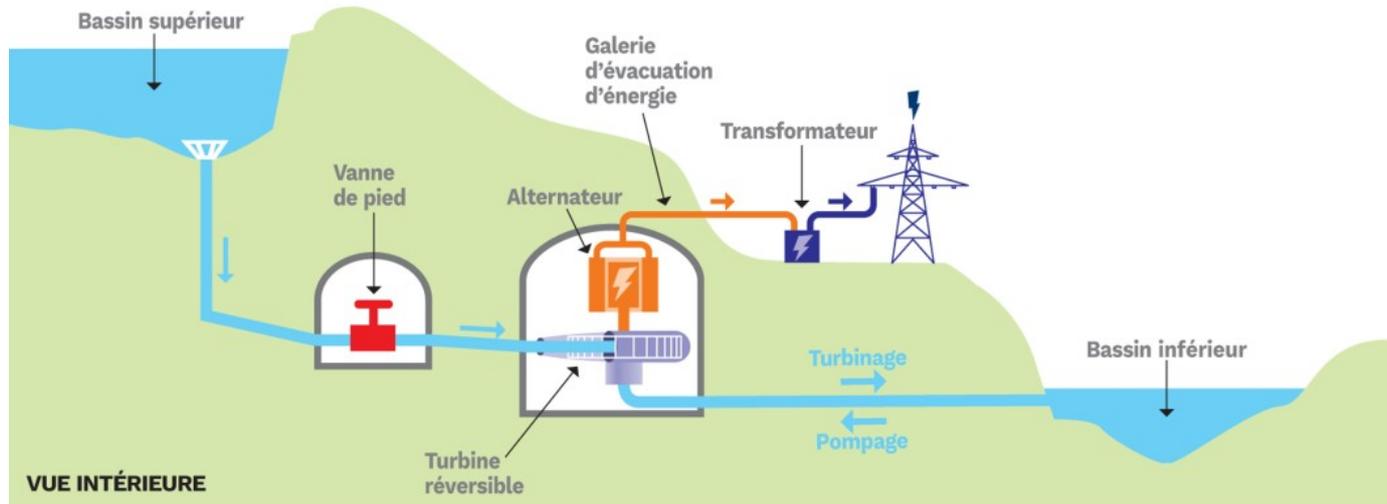
En mode **turbinage**, le fonctionnement est le même qu'une centrale gravitaire. En mode **pompage**, l'eau est pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur afin de consommer de l'électricité.

De fait la machine hydroélectrique est réversible, on parle alors de pompage-turbinage.

Note : ce document n'évoque pas les centrales maritimes, assez peu visibles dans le monde de l'hydroélectricité.

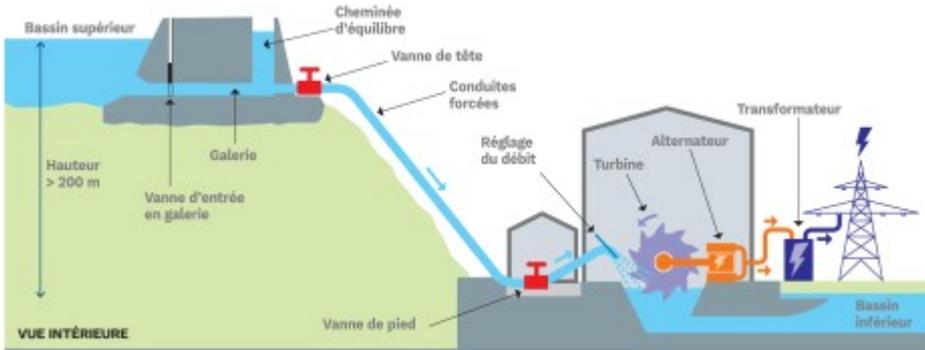
Principe de production

Les centrales hydroélectriques de type STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) peuvent assurer un stockage indirect d'énergie pouvant servir d'appoint durant les pics de consommation (phase de stockage et phase de production). Le rendement est important, entre 70% et 85%.



Les centrales de *haute chute* utilisent des turbines Pelton (avec une roue à augets), adaptées à des chutes d'eau supérieures à 400 m mais à faible débit d'eau ($< 15 \text{ m}^3/\text{s}$).

La centrale de La Coche est équipée de 4 groupes à turbine Francis (diapo suivante) et depuis 2019 une turbine Pelton 240 MW (la plus puissante de France). Elle pèse 16 t pour 3.6 m de diamètre. L'eau projetée à 500 km/h fait tourner la turbine à 430 tr/min.

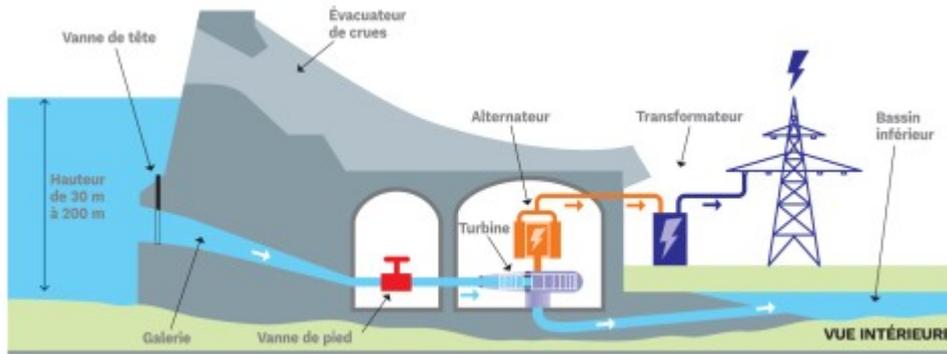


Centrale de haute chute ($> 200 \text{ m}$)



Installation de la Pelton à la centrale de La Coche.

Les centrales de *moyenne chute* utilisent des turbines Francis (avec roue à aube), pour des débits moyens à forts (10 à 700 m³/s) et donc des puissances de quelques kW à quelques 100 MW.



Centrale de moyenne chute (30 à 200 m)



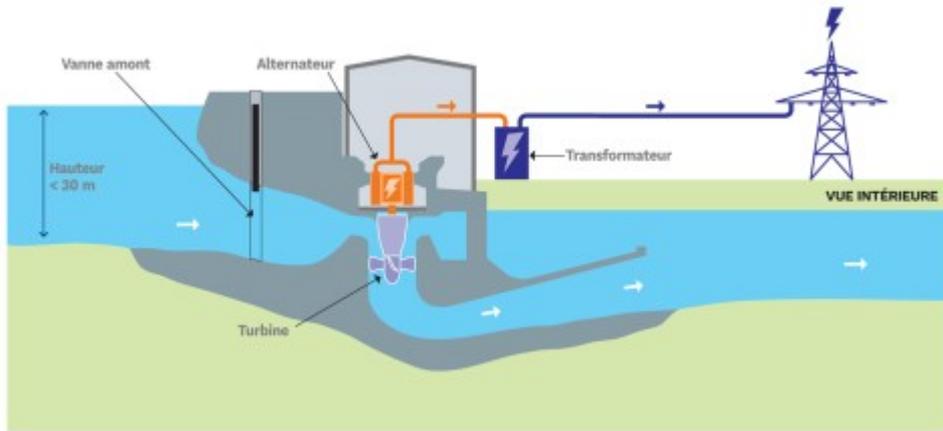
Turbine Neyrpic 700 MW, Ø 9.8 m, 425 t, 75 tr/min
Alternateur : 778 MVA, 80 pôles, 3400 t

Les centrales de basse chute (ou au fil de l'eau) utilisent des turbines Kaplan, efficaces à faible vitesse mais avec un gros débit (70 à 800 m³/s).

Ses pales sont orientables, ce qui permet d'atteindre un rendement entre 90 et 95 %.

Turbine Kaplan (axe vertical)

2.5 MW, 97.5 rpm, Ø 3.6 m, η 90 %



Centrale de basse chute (< 30m) ou « fil de l'eau »



Certaines solutions au fil de l'eau sans stockage existent. Elles ont l'avantage d'être faiblement impactantes pour l'environnement, là où une retenue d'eau viendrait modifier localement l'écosystème.

Aujourd'hui il ne s'agit que d'une part très négligeable (3 %) devant l'hydroélectricité traditionnelle. Cependant cela permettrait de converger vers des lieux de productions décentralisés, et chacun avec un très faible impact écologique en comparaison à des grosses centrales hydroélectriques (et gros chantiers qui les accompagnent).

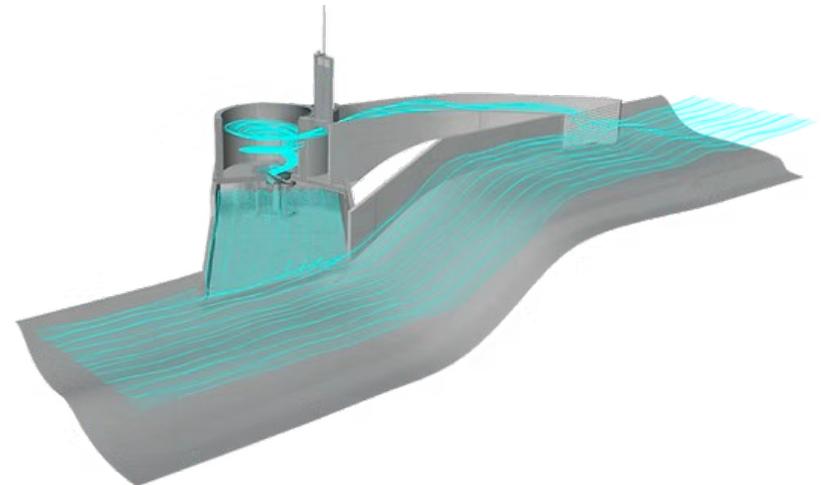
Exemple de solution au fil de l'eau :

Turbulent (<https://www.turbulent.be/>)

https://www.youtube.com/watch?v=siwE_4t6QDw

<https://www.youtube.com/watch?v=2shxVXqtFZU>

Faible puissances (15-70 kW), mais utilisable sur faible hauteur de chute et faible débit, chantier réalisé en une semaine !



Les alternateurs des centrales hydroélectriques sont des **machines synchrones**.

Le rotor est constitué d'aimants permanents et le rotor d'un circuit bobiné.

Comparons la **machine synchrone** aux autres machines électriques :

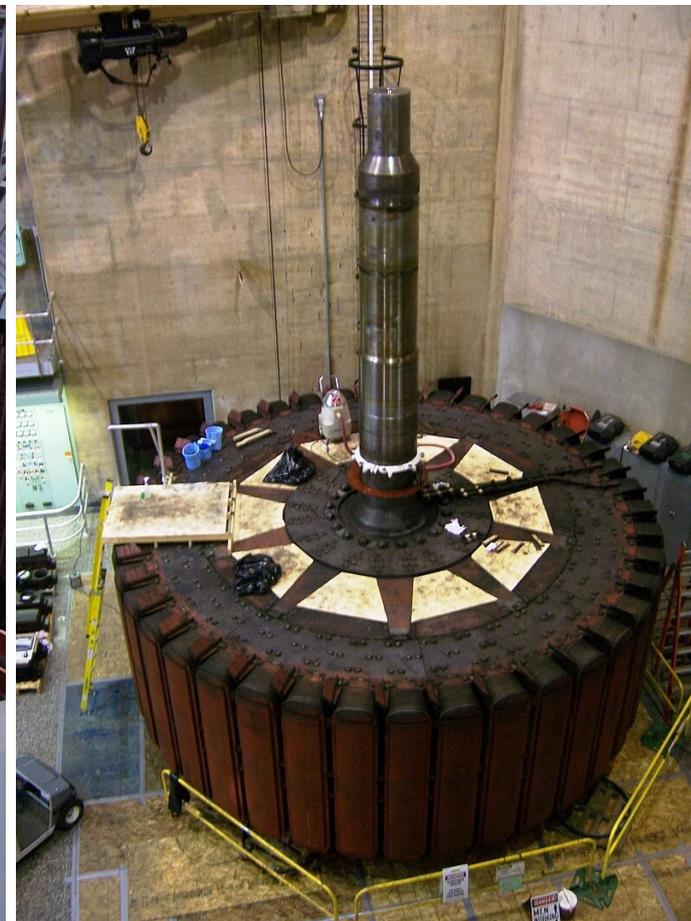
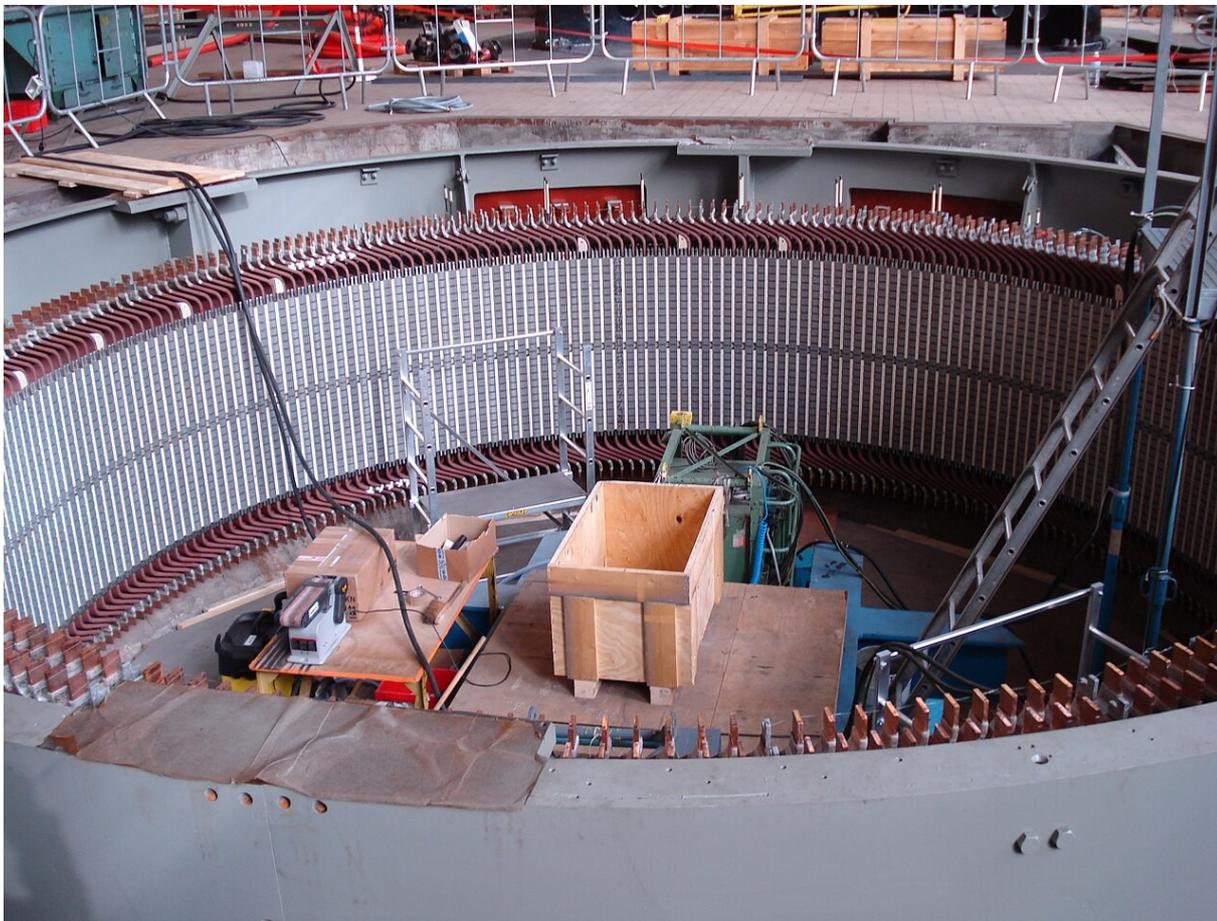
Avantages :

- Le meilleur rendement (> 80%)
- Vitesse de rotation constante
- Forte charge (couple ou courant)

Inconvénients :

- Pilotage complexe
- Masse
- Maintenance plus fréquente
- Prix (de départ et de maintenance)

Stator d'une machine synchrone du barrage de Marèges (Dordogne)



Rotor d'une machine synchrone du barrage Hoover (USA)

Turbines Kaplan



Groupe turbo-alternateur 500 kW
(turbine Francis et alternateur synchrone)



Alternateurs synchrones

PRODUCTION HYDRAULIQUE

Centrale de Grand'Maison (France)

La centrale de Grand'Maison en Isère est la plus grande installation Française (7^e mondiale). Elle peut fournir 1,8 GW en deux minutes (9 % de la capacité de production hydraulique d'EDF).

C'est une centrale de type STEP composée de deux barrages et 12 groupes hydroélectriques de 150 MW.

Deux conduites forcées : une de 75.9 m³/s sur une hauteur de chute de 922 m, et une de 140 m³/s pour 955 m.



Barrage de Grand'Maison
1700 m d'altitude, 140 m de haut, retenue de 140 millions m³ d'eau



Barrage du Verney
770 m d'altitude, 42 m de haut, retenue de 15 millions m³ d'eau

Comparons avec la centrale de Marckolsheim, de type basse chute (ou au fil de l'eau).

Équipée de 4 turbines développant une puissance de 150 MW pour une hauteur de chute de 13.2 m.

Le barrage est accompagné d'une écluse sur le côté.



Energie renouvelable ne veut pas forcément signifier énergie propre ou énergie verte.

Exemple de la centrale de St Chamas : l'apport considérable d'eau douce et de limons (sédiments) a eu de graves conséquences hydrologiques et écologiques pour l'étang salé de Berre, la Durance, la Camargue et les nappes phréatiques associées. La France a été condamnée par la Cour de Justice de l'Union Européenne en 2004.



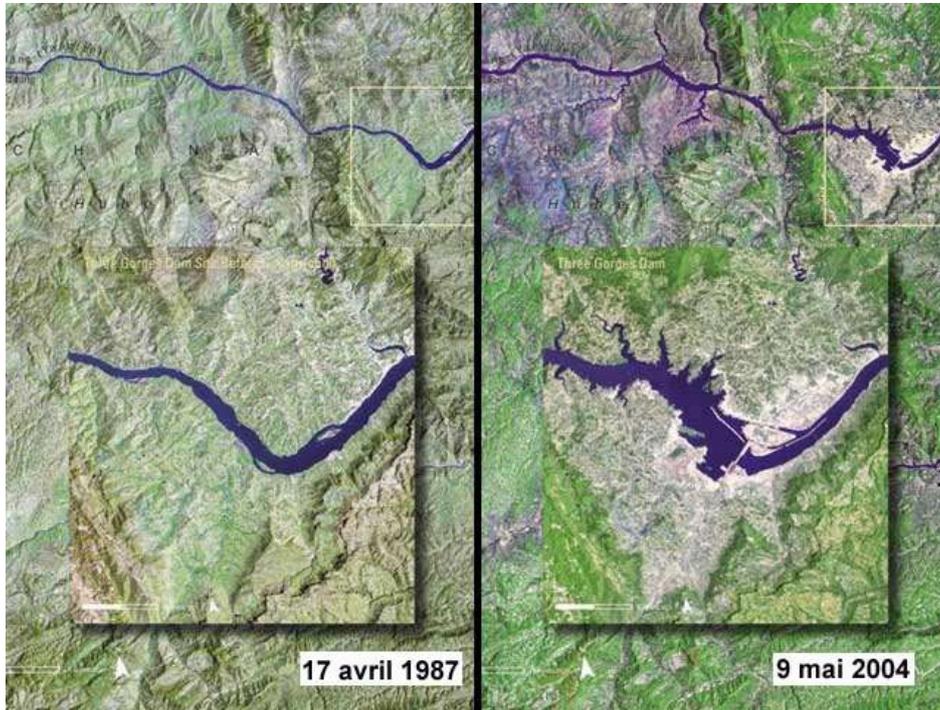
Étang d'eau salée de Berre (une des plus grand lagunes d'Europe)

Rejet d'eau douce et de limons

Canal d'eau douce (détournement de la Durance)

Barrage des Trois Gorges (Chine)

Le plus grand générateur d'électricité au monde est la centrale hydroélectrique des Trois Gorges, en Chine. Mis en production étape par étape de 2006 à 2009, il est équipé de 34 générateurs pour une capacité de 22.5 GW (soit prêt de 20 réacteurs nucléaires !).



Réservoir de 45.3 km³ d'eau réparti sur 600 km.
Le barrage (185 m de haut) s'étend sur 2 335 m.
Production annuelle de 98 TWh, record à 111.8 TWh en 2020. 1-83

Dans le monde en 2023, l'énergie hydraulique est la troisième source de production d'électricité (14.28%) derrière le charbon et le gaz. Ceci la place en première place des sources renouvelables de production d'électricité.

En France en 2023 l'hydraulique représente 11.9 % de la production d'électricité, après le nucléaire (64.8 %).

EDF exploite 425 centrales hydrauliques et plus de 600 barrages sur notre territoire, ce qui représente 80 % du parc hydraulique français (EDF n'est pas le seul exploitant, le deuxième est par exemple la Compagnie Nationale du Rhône, ainsi qu'Engie).

Cependant EDF est le premier producteur hydraulicien de l'Union Européenne.



Attention

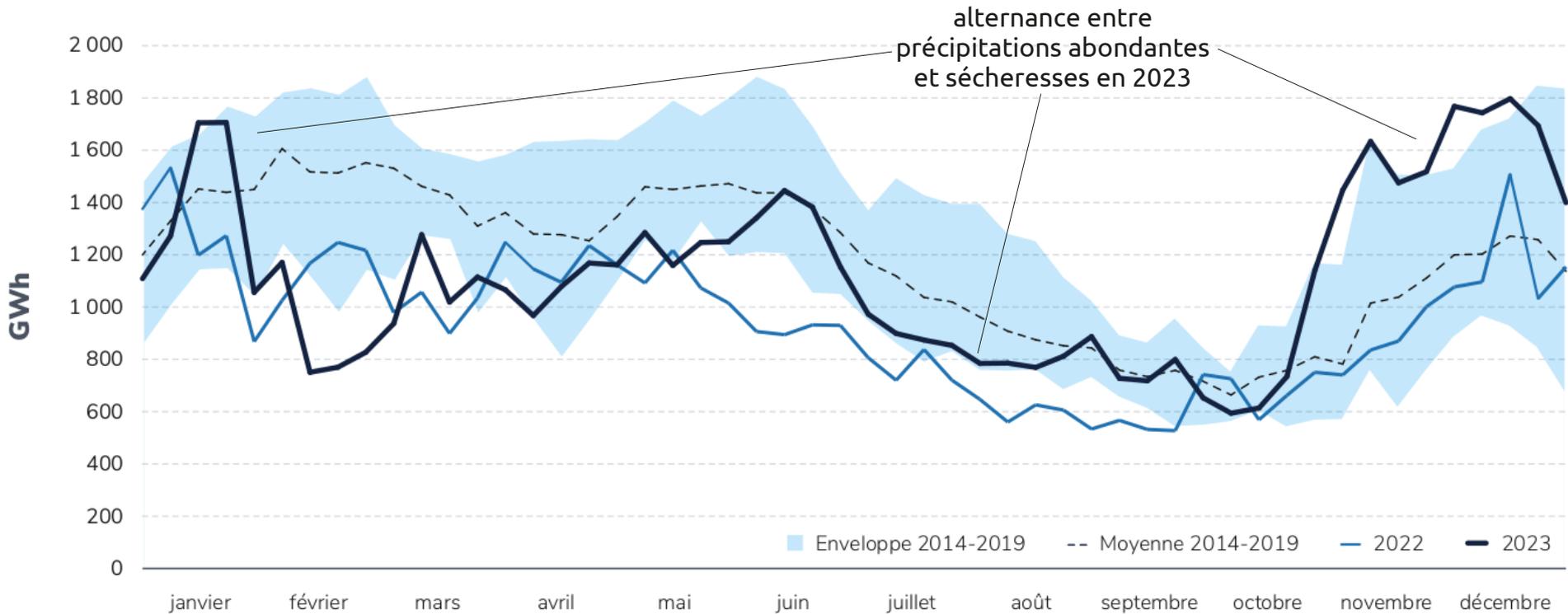
Cette carte liste les centrales hydrauliques d'EDF (et non l'intégralité des centrales).

Il manque donc les centrales exploitées par Engie, la CNR, ... notamment dans le Rhône et le Pays Basque.

PRODUCTION HYDRAULIQUE

En France

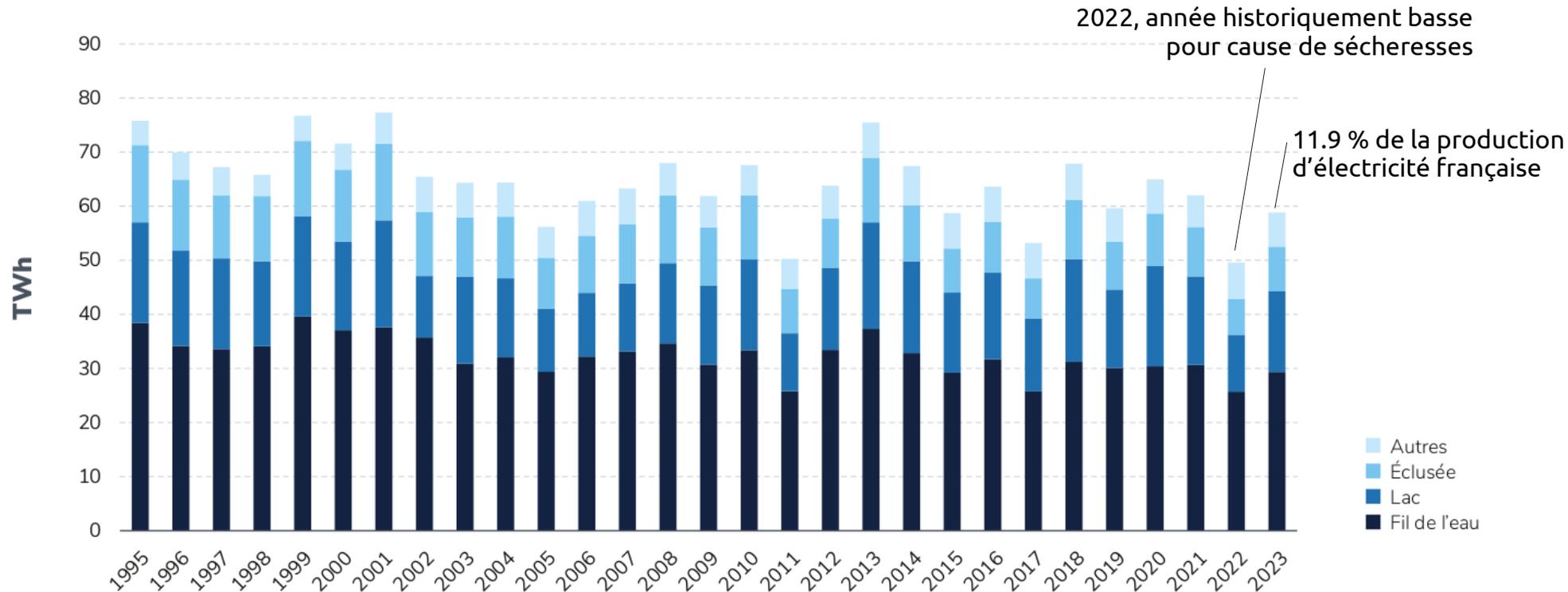
Figure 2.11 : Évolution de la production hebdomadaire des centrales hydrauliques au cours de l'année 2023 et comparaison avec les années précédentes



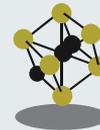
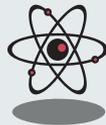
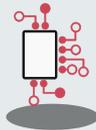
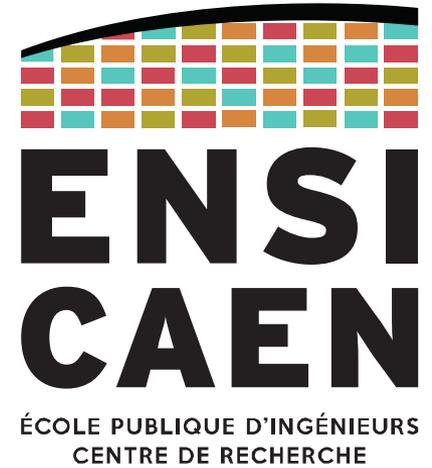
PRODUCTION HYDRAULIQUE

En France

Figure 2.12 : Évolution de la production hydraulique en France entre 1995 et 2023



PRODUCTION ÉOLIENNE



Principe de fonctionnement

Les éoliennes utilisent la force motrice du vent afin de générer de l'électricité.

La puissance cinétique incidente sur une éolienne est la suivante :

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot a \cdot S \cdot V^3$$

ρ : masse volumique de l'air (~ 1,23 kg/m³ à 15 °C)

S : section du cylindre de vent passant dans l'éolienne

V : vitesse du vent (m/s)

a : $0.5 < a < 1$, sachant que $V_{\text{turbine}} = a \cdot V$

V_{turbine} : vitesse du fluide au niveau de la turbine

Toutefois, il doit subsister un écoulement d'air au niveau de l'éolienne pour conserver la rotation, la puissance théorique maximale récupérable, appelée « limite de Betz », est la suivante :

$$P_{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} \quad \text{quand } a = 1/3$$

$$P_{\text{max}} = 0.37 \cdot S \cdot V^3$$

La puissance récupérable par une éolienne est donc liée **au carré de son rayon** et au **cube de la vitesse du vent**.

PRODUCTION ÉOLIENNE

Principe de fonctionnement

La puissance d'une éolienne est liée au carré de son rayon.

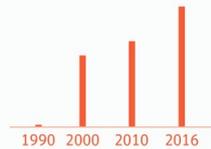
Les plus puissantes mesurent jusqu'à 200 m et coûtent 12 millions \$. Elles sont toujours *offshore*.

Wind turbines 50 times more powerful today than 20 years ago

Development in size and power of wind turbines, 1990-2016

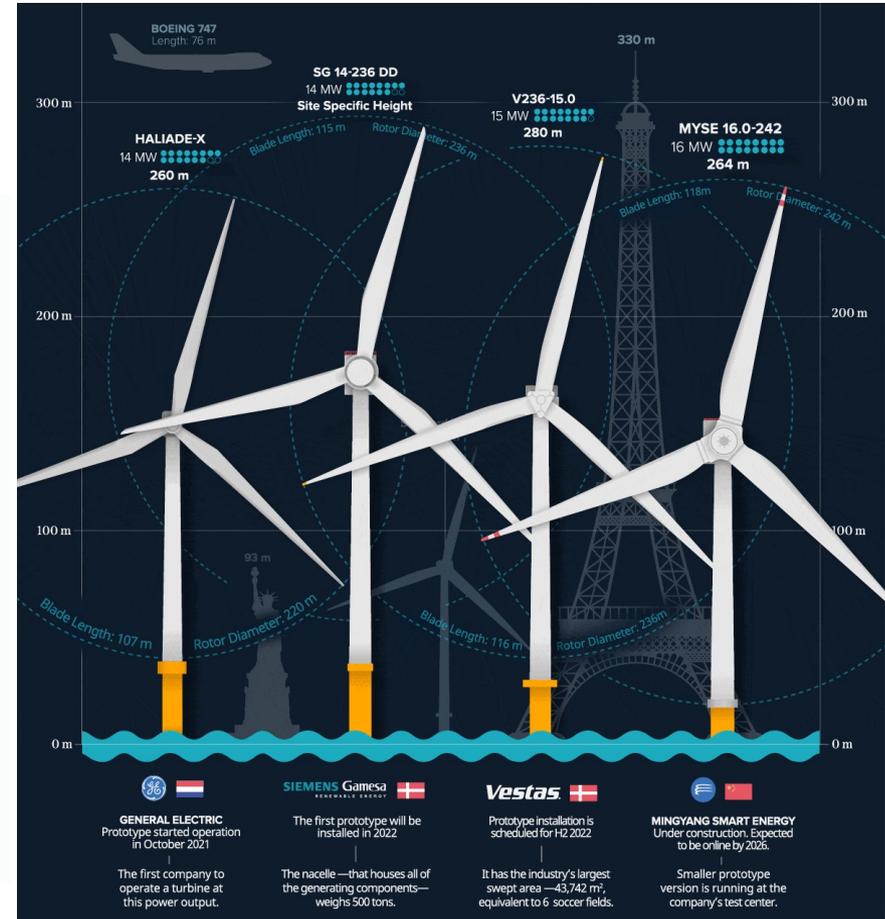
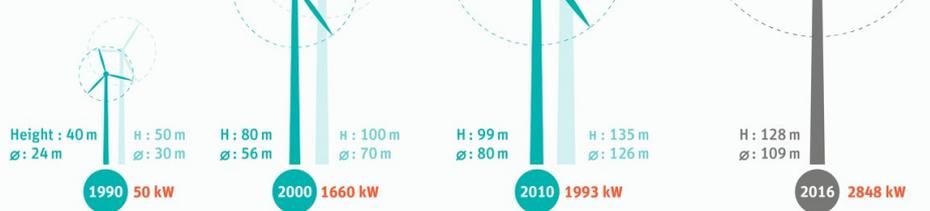
Source: DEWI

Average rated output



Average size

Max size



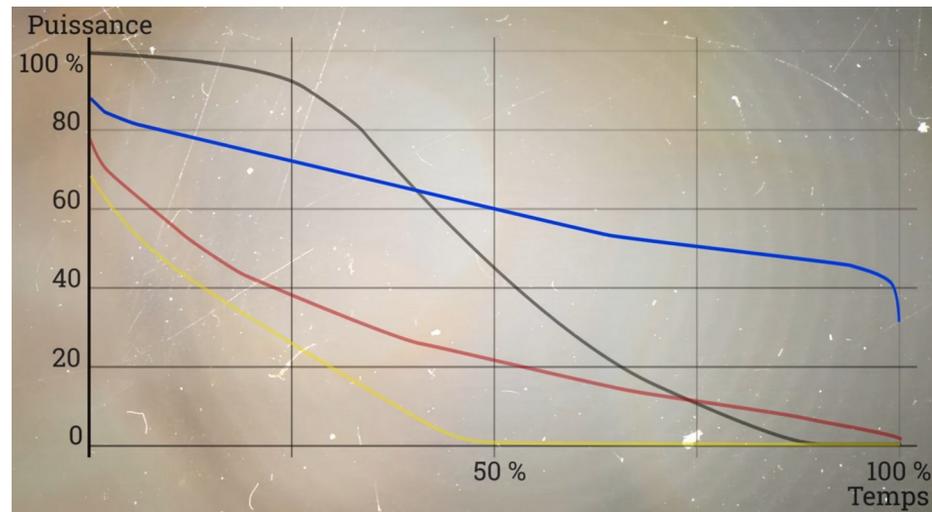
L'éolien est une énergie **intermittente**, fortement dépendante du climat et de la météo.

Une éolienne idéalement positionnée *onshore* fonctionnera en moyenne 2000 h/an, une année comptant 8760 h.

Ainsi une éolienne de 2 MW ne produira que 600 kW de puissance moyenne lissée sur une année. Il faudrait alors 1500 éoliennes pour équivaloir à un réacteur nucléaire.

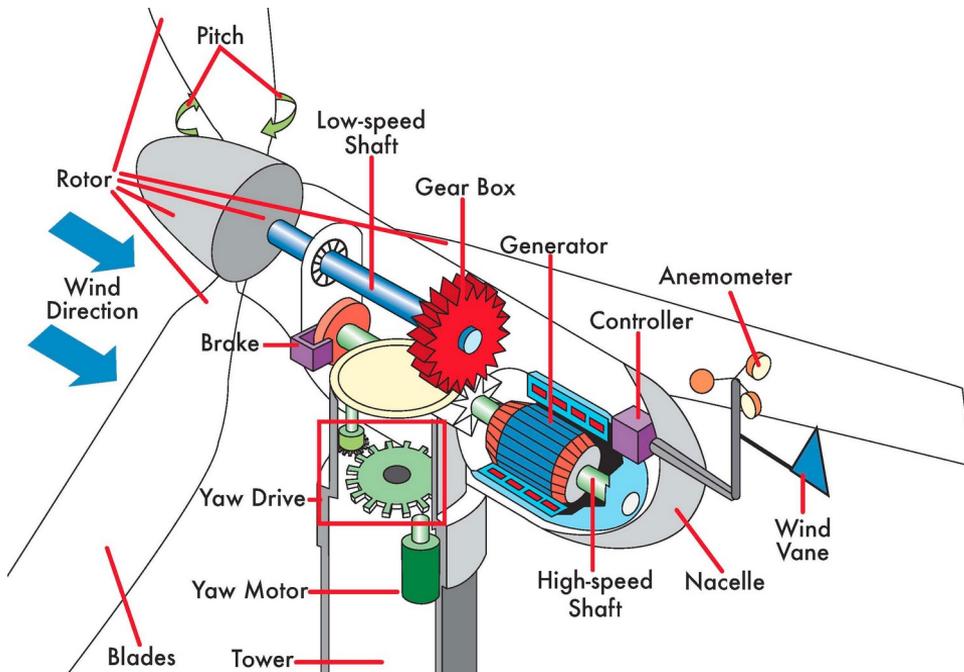
L'éolien *offshore* offre de plus grandes puissances que le terrestre car la force des vents y est plus grande. Le facteur de charge* est également plus intéressant. Cependant les impacts sur les écosystèmes sont à prendre en compte, et le coût d'installation est également plus élevé.

*Facteur de charge :
énergie réellement produite / théoriquement produite



Principe de fonctionnement

La vitesse de rotation des pales d'une éolienne est bien plus faible que ce qui est nécessaire pour un alternateur connecté au réseau. Ainsi les éoliennes terrestres utilisent un mécanisme à entraînement indirect, qui consiste à insérer une boîte de vitesse entre les pales et l'alternateur.



En mer (éolien *offshore*), on utilise plutôt des éoliennes à entraînement direct pour des raisons de légèreté et de simplification de maintenance.

Pour que l'alternateur puisse fonctionner dans ces conditions, il doit posséder de nombreux enroulements dans son stator. C'est techniquement réalisable, mais ça augmente drastiquement le diamètre de l'alternateur asynchrone.

Éolienne utilisée pour le parc de Saint-Nazaire →



Haliade* 150-6MW Offshore Wind Turbine

Generator

In charge of generating the electricity, the direct-drive permanent magnet generator has fewer rotating parts, which increases reliability, maximizes availability and reduces maintenance costs.

Hub

Supports the rotor blades and houses their pitch assembly. It is designed to provide easy access.

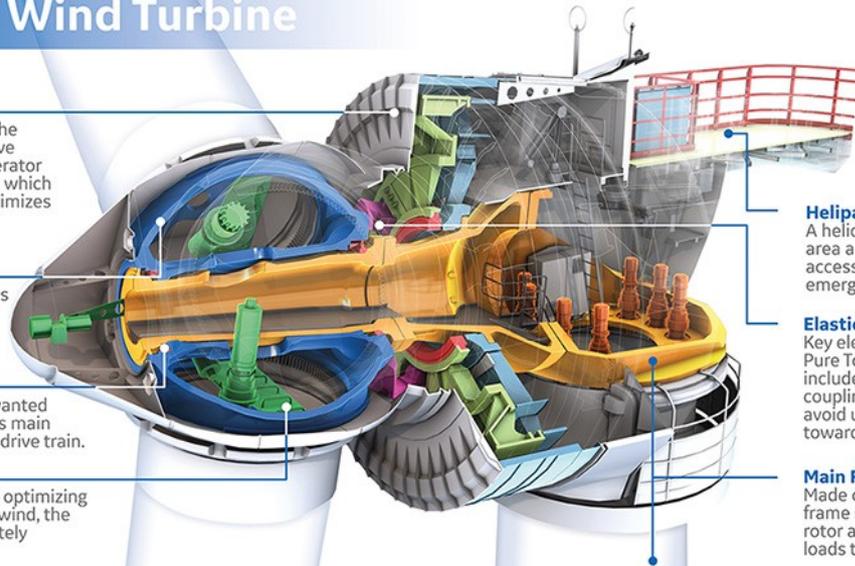
Rotor Bearings

Directly transfer the unwanted load on the rotor towards main structure, bypassing the drive train.

Pitch

Controls the blade angle optimizing the area exposed to the wind, the rotation speed to ultimately increase the yield.

GE Renewable Energy



Helipad

A helicopter winching area allows for quick access in case of emergency at sea.

Elastic Coupling

Key element of the Pure Torque* system, includes a patented coupling system that avoid undesired load towards the generator.

Main Frame & Tower

Made of cast steel, the frame supports the rotor and transfers the loads to the tower.

Innovative, reliable, efficient

- The new generation 6 MW direct drive offshore wind turbine
- Suitable for all offshore conditions, delivering renewable energy at competitive cost to 5,000 households

*Trademark of General Electric Company

Les alternateurs des éoliennes sont souvent des **machines asynchrones**.

Comparons la **machine asynchrone** aux autres machines électriques :

Avantages :

- Démarrage simple
- Pilotage simple
- Peu de maintenance (utile en endroit isolé)
- Plus léger que la MS (moins de matériaux)
- Moins cher que la MS (moins de matériaux)

Inconvénients :

- Rendement plus faible que la MS
- Consommation de puissance réactive
 - À compenser avec des condensateurs
- Moins adapté à la gestion de variabilité du vent

Toutefois on recontre de plus en plus d'alternateurs synchrones à aimants permanents, qui s'adapte plus aux variations de vent et augmente encore plus l'énergie capturée.

Les éoliennes terrestres sont raccordées (via transformateur) au réseau de transport ou de distribution.

Pour le offshore, les distances aux côtes (toujours grandissantes) impliquent un transport d'électricité en DC. Et ce transport en DC implique une conversion AC/DC dans un sous-station au centre du parc éolien, des lignes électriques entre la sous-station et la côte, puis un nouveau poste de conversion DC/AC sur la terre ferme.



Fabrication

En 2017, le marché français est dominé par les Allemands (Enercon, Senvion, Siemens Gamesa,) à hauteur de 62 % et le Danois Vestas (34,3%).

Les fabricants français sont Vergnet, Alstom Wind, Areva Wind et Francéole.

Exploitation

Les acteurs majeurs en France sont :

Engie (1900 MW),
EDF (853 MW),
Boralex (445 MW, Canadien),
EOLE-RES (500 MW, Britannique),
Ostwind (234 MW, Allemand).



PRODUCTION ÉOLIENNE

Énergie disponible

30·10⁶ TWh dans l'atmosphère terrestre !

Potentiel mondial

50 000 TWh exploitables à terre

Rappels : 180 000 TWh primaires et 30 000 TWh électriques produits dans le monde en 2023!

Potentiel en France

70 TWh terrestres

500 TWh offshore (dont 100 TWh peu profond)

Potentiel en Europe

Plus de 5 000 TWh offshore

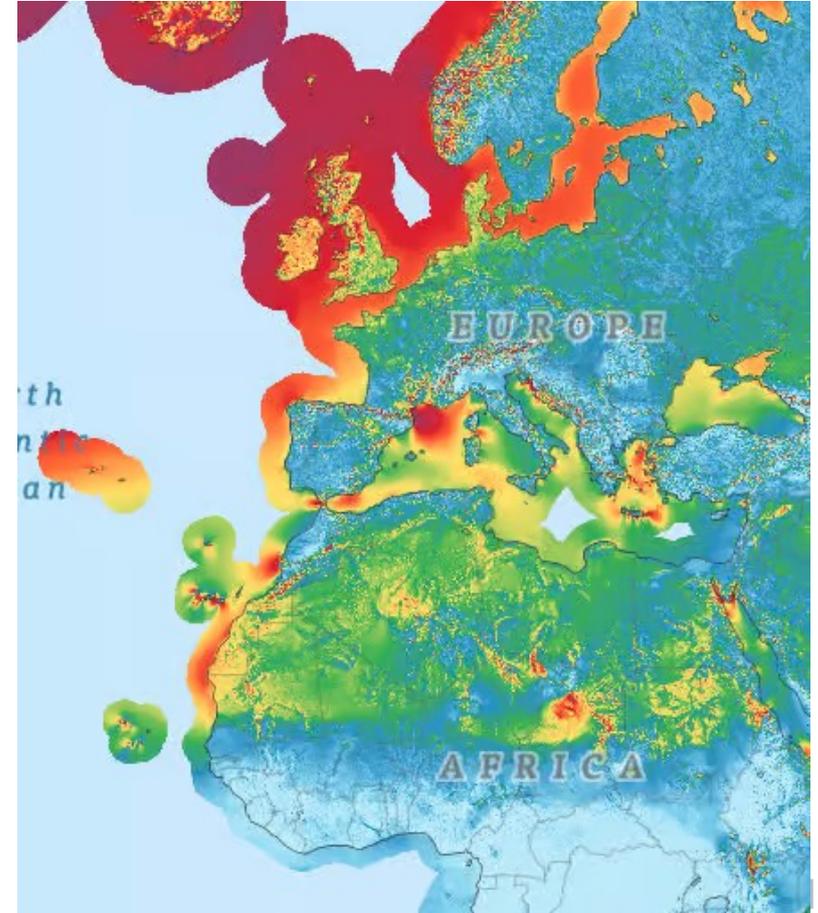
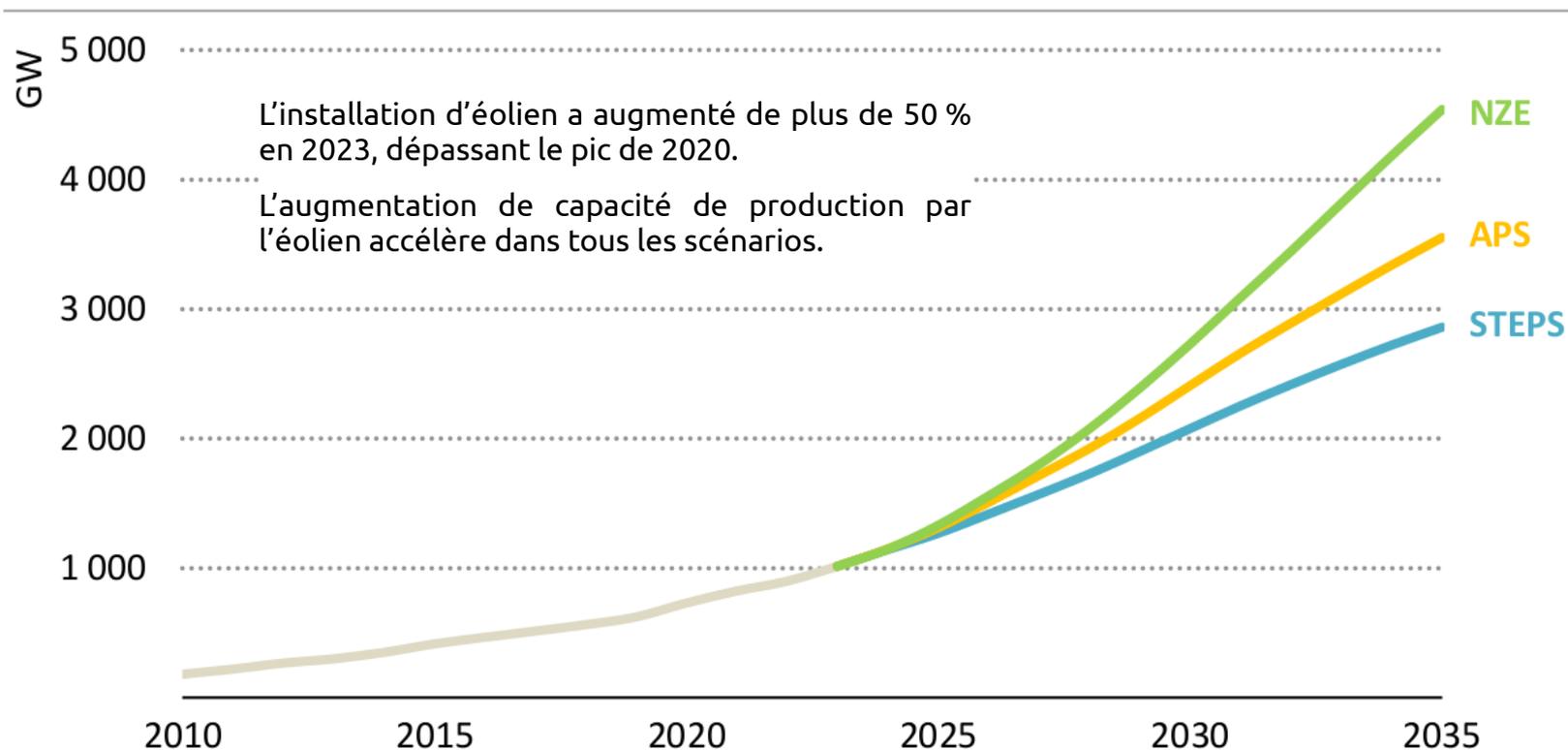
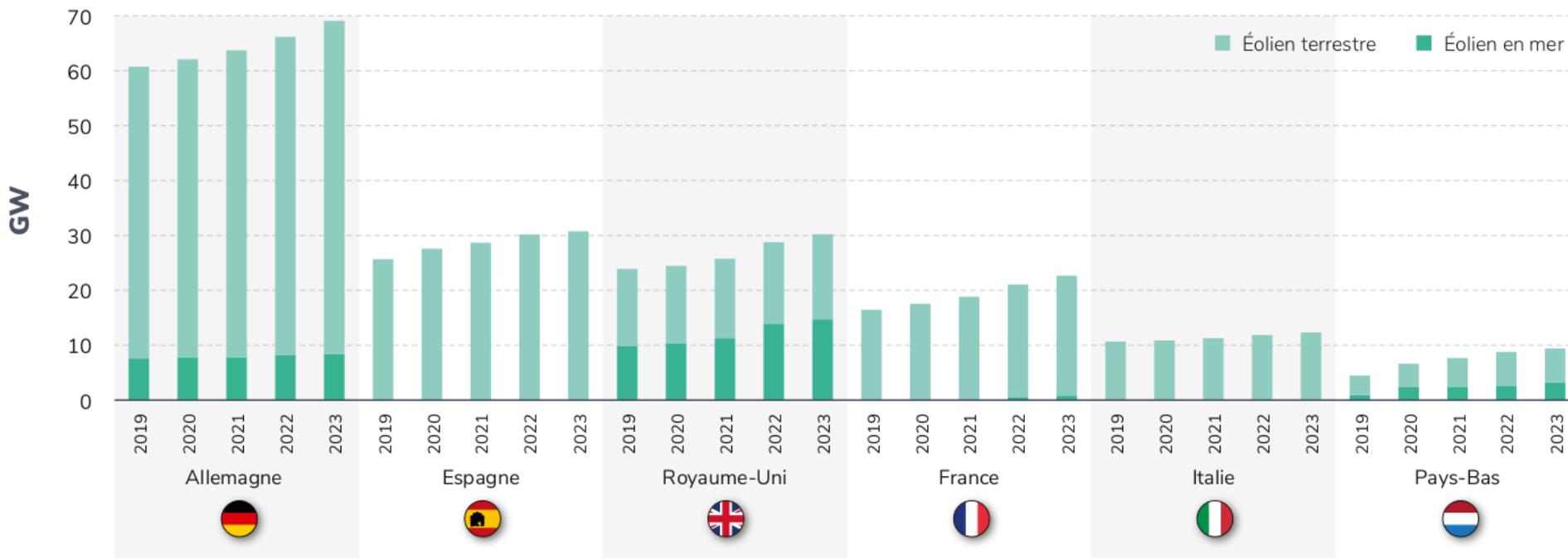


Figure 3.44 ▶ Wind power capacity by scenario, 2010-2035



Capacité européenne de production (terrestre et maritime)

Figure 2.18 : Évolution des capacités éoliennes dans une sélection de pays européens (données à fin 2023 sauf Royaume-Uni T3 2023)

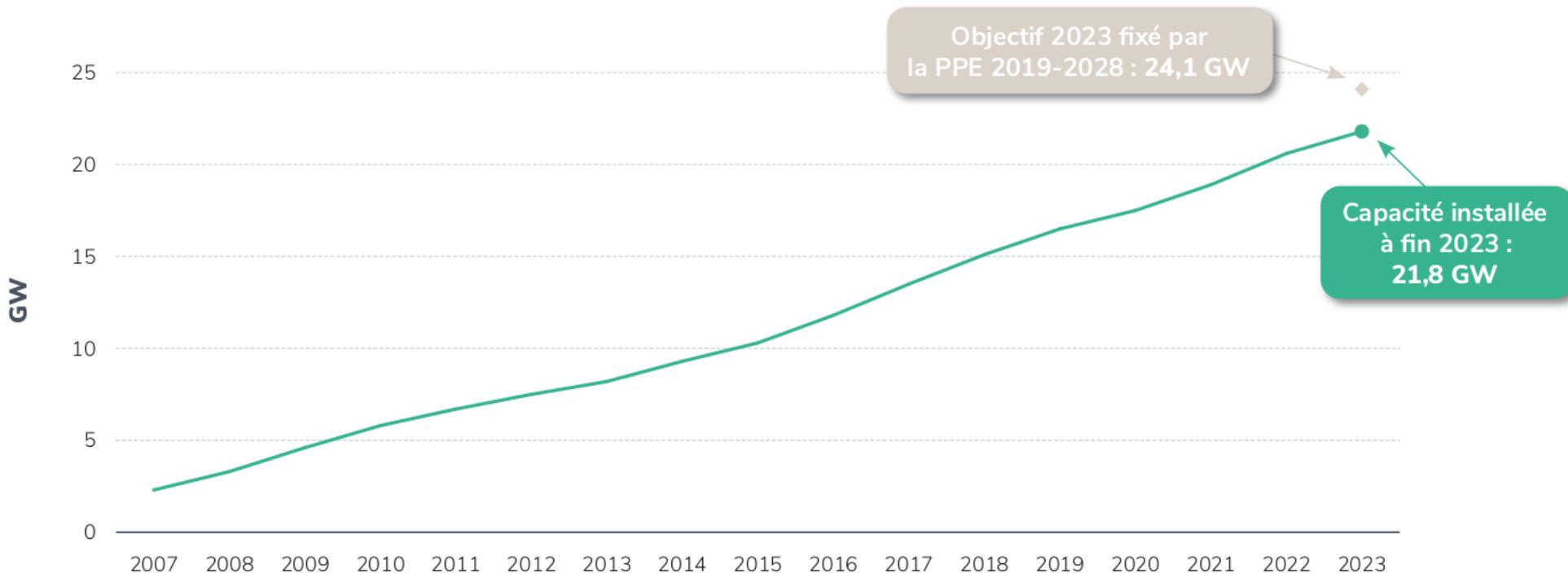


Sources: Fraunhofer Institute, REE, RTE, BEIS UK, TERNA, CBS et ENTSO-E

PRODUCTION ÉOLIENNE

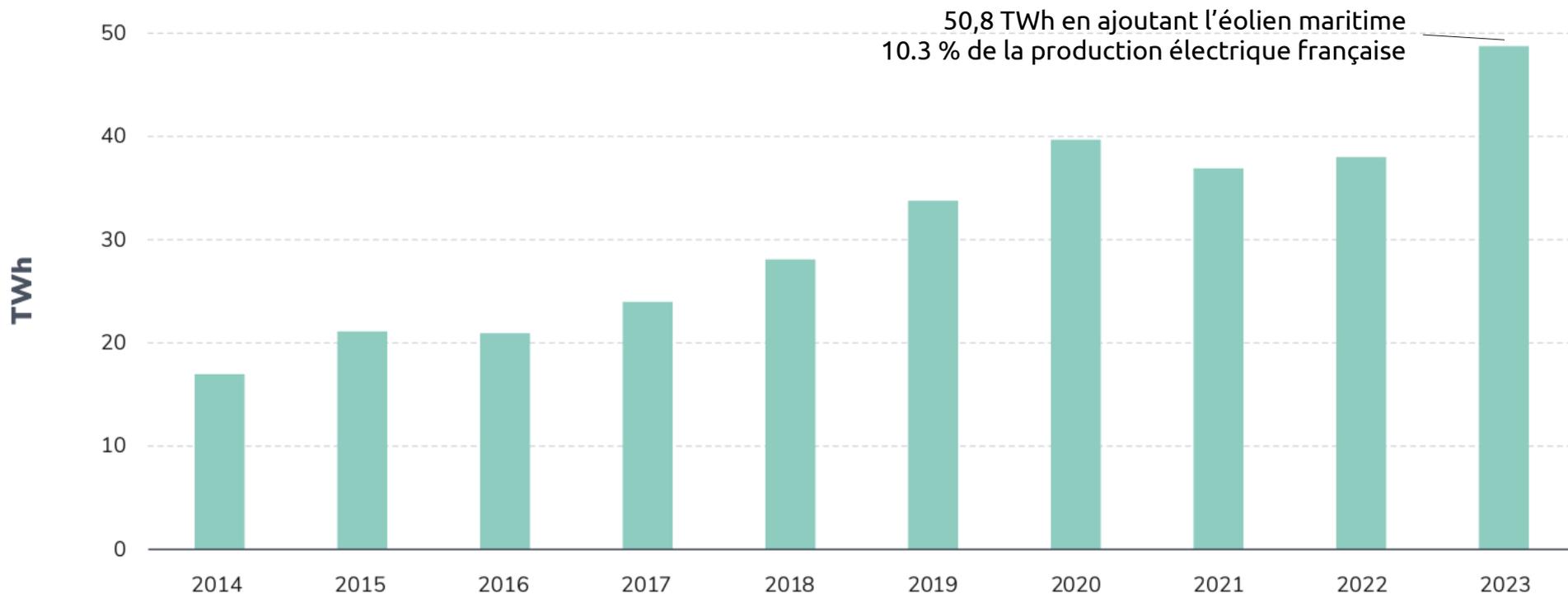
Capacité française de production (terrestre uniquement)

Figure 2.16 : Évolution du parc éolien terrestre et comparaison avec les objectifs publics à l'horizon 2023



Évolution de la production d'éolien (terrestre uniquement)

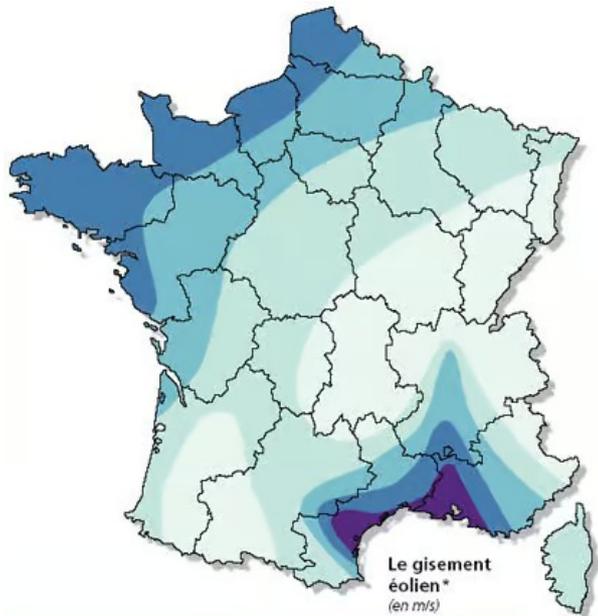
Figure 2.15 : Évolution du volume de production annuel de l'éolien terrestre entre 2014 et 2023



PRODUCTION ÉOLIENNE

Capacité terrestre

Potentiel éolien en France métropolitaine

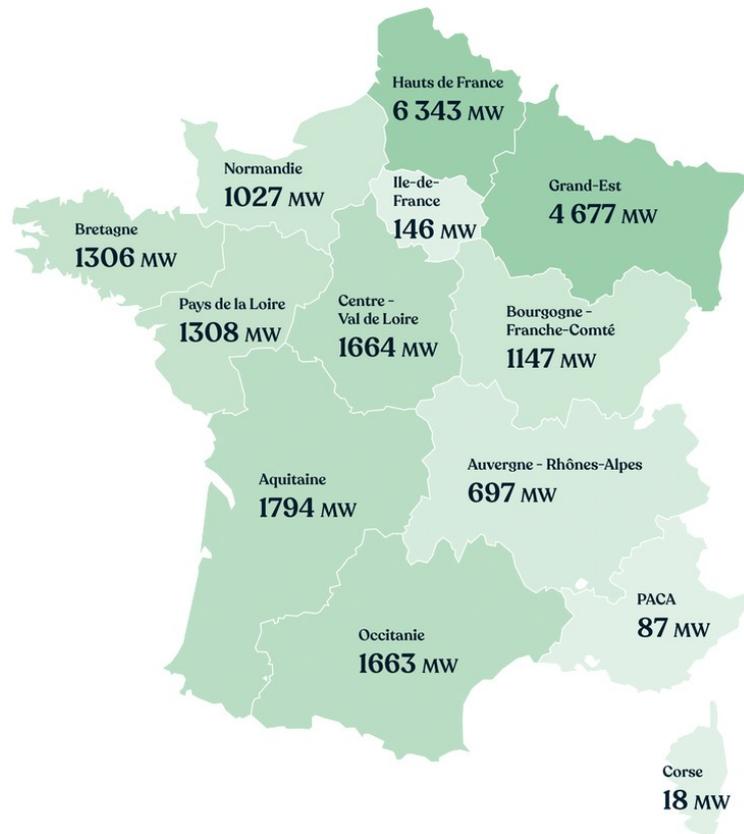


Bocage dense, bois, banlieue	Rase campagne, obstacles épars	Prairies plates, quelques buissons	Lacs, mer	Crêtes**, collines	
<3,5	<4,5	<5,0	<5,5	<7,0	Zone 1
3,5 - 4,5	4,5 - 5,5	5,0 - 6,0	5,5 - 7,0	7,0 - 8,5	Zone 2
4,5 - 5,0	5,5 - 6,5	6,0 - 7,0	7,0 - 8,0	8,5 - 10,0	Zone 3
5,0 - 6,0	6,5 - 7,5	7,0 - 8,5	8,0 - 9,0	10,0 - 11,5	Zone 4
>6,0	>7,5	>8,5	>9,0	>11,5	Zone 5

* Vitesse du vent à 50 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie.

** Les zones montagneuses nécessitent une étude de gisement spécifique.

Installations raccordées par région au 30/09/2023



PRODUCTION ÉOLIENNE

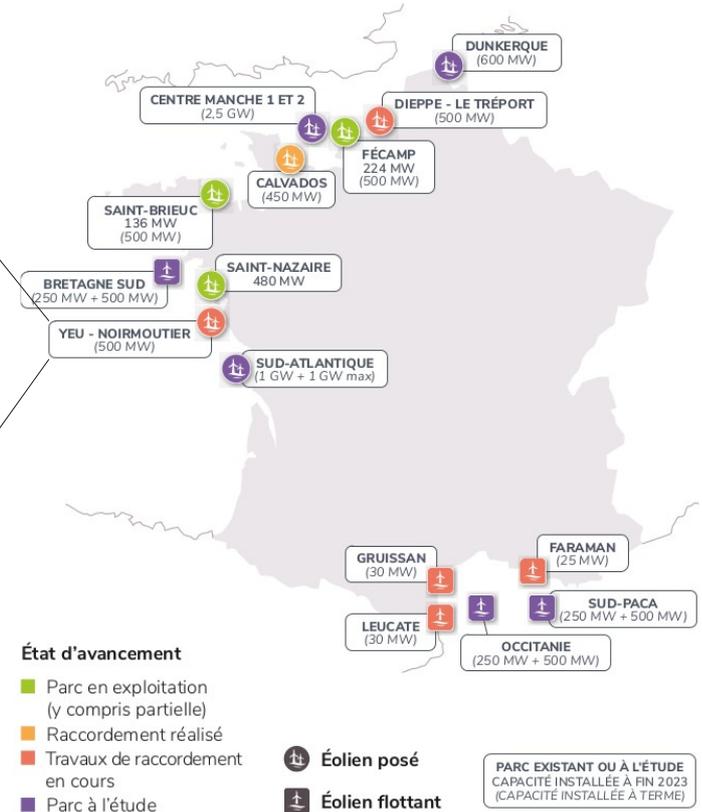
Capacité maritime

Exemple du parc d'Yeu-Noirmoutier

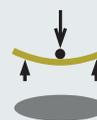
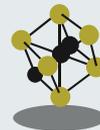
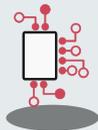
61 éoliennes de 8 MW, sur 83 km², mise en service prévue en 2025.



Figure 2.19 : Carte des projets de parcs éolien en mer existants et en projet à fin 2023



PRODUCTION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



Principe de production

Le solaire photovoltaïque génère de l'électricité à partir du rayonnement solaire, grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques.



Centrale du lac des Toules (Suisse), 448 kW.

Station Spatiale Internationale



Apple Park, Californie, 17 MW.

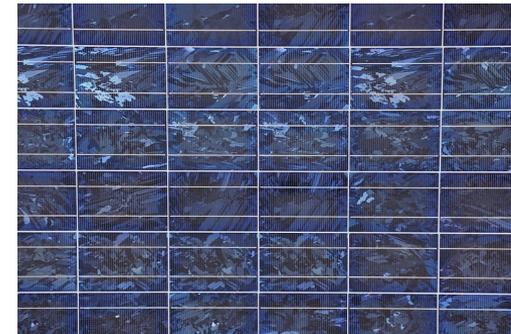
Note : Il ne faut pas confondre solaire photovoltaïque et solaire thermique, où la chaleur solaire est focalisée en un point pour chauffer un circuit d'eau et alimenter un turbo-alternateur.

Il existe trois technologies de cellules photovoltaïques

Silicium monocristallin : un lingot de silicium refroidi pour former un cristal. Il est découpé en fines tranches pour former les cellules. Bon rendement (entre 16 et 25%, jusqu'à 150 Wc/m^2) à éclairage direct, moins bon à éclairage diffus. Solution la plus chère. (photo →)

Silicium polycristallin : un lingot de silicium refroidi pour former un cristal, mais des cristallites se forment pendant le processus. Il est découpé en fines tranches pour former les cellules. Rendement intermédiaire (entre 14 et 18%, jusqu'à 100 Wc/m^2) à éclairage direct, moins bon à éclairage diffus. Coût intermédiaire. (photo ↘)

Silicium amorphe : le silicium est déposé sur une surface par PECVD, support ayant l'avantage de pouvoir être souple. Rendement très faible (entre 5 et 7%, jusqu'à 60 Wc/m^2) à éclairage direct, mais correct à éclairage diffus ou artificiel. Solution la moins chère.



Centrale photovoltaïque

La Chine possède 16 des 30 plus grands parcs photovoltaïques au monde, dont les 9 plus grands parcs (ceux-ci allant de 3000 MW à 15 600 MW).

Le Talatan Solar Park affiche une capacité de 15 600 MW_e et une production annuelle de 10 TWh sur 420 km².

À observer (36°10'54"N 100°34'41"E) :

- Le poste de conversion (cercle bleu)
- La centrale thermique solaire (sur la droite)
- La longueur de la diagonale !

En comparaison, le plus grand parc Européen est l'Escatrón-Chiprana-Samper Solar Farm (2020), en Espagne :

850 MW_e, 31.7 km², 31^e capacité mondiale.



Centrale photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques ont une caractéristique $I(V)$ non-linéaire. Ils sont associés à un module MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) permettant de maximiser la puissance électrique fournie (et non maximiser le courant ou la tension).

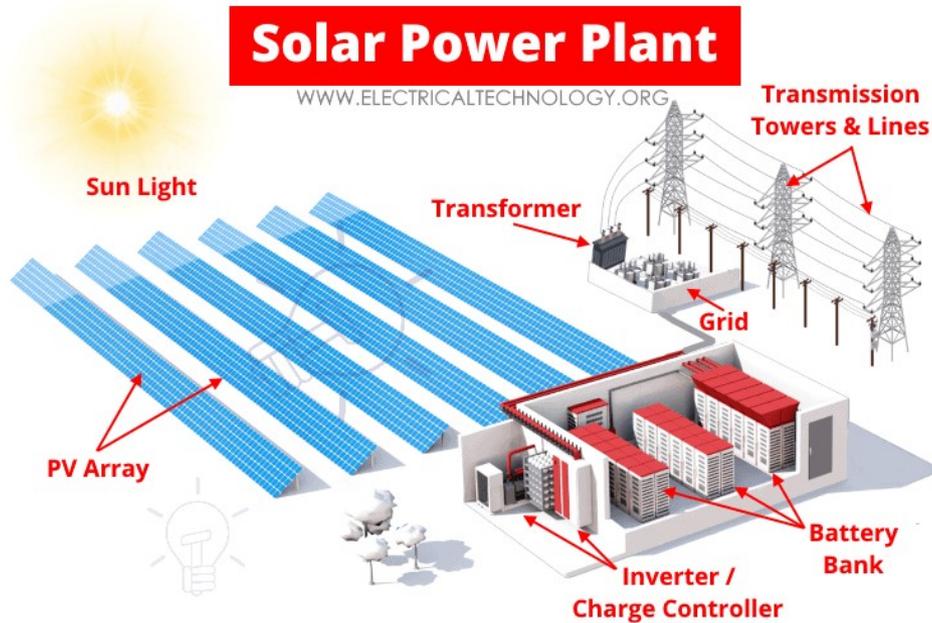
De plus la sortie des panneaux PV (et des modules MPPT) se fait en DC. Soit l'énergie électrique est transportée ainsi, soit il faut ajouter un convertisseur DC/AC avant de raccorder au réseau électrique.



Disponibilité de l'énergie

Tout comme l'éolien, l'énergie solaire est **intermittente**.

De plus, l'électricité produite est en courant continu. Il faut donc disposer de moyens de stockages de l'électricité (batteries) en plus des modules MPTT et conversion DC/AC.

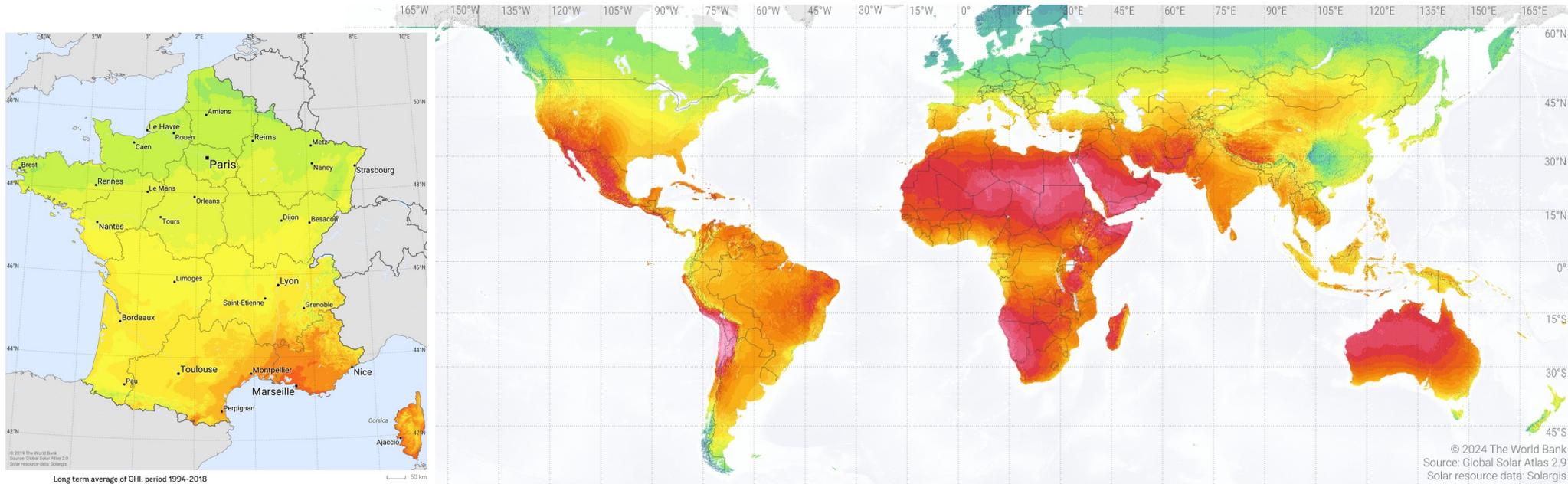


PRODUCTION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

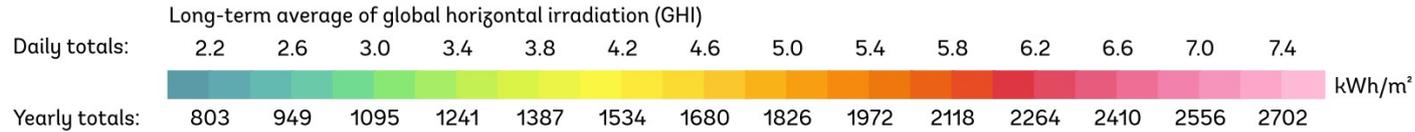
Disponibilité de l'énergie

La Terre reçoit **1.6·10⁹ TWh** d'énergie solaire par an, soit une puissance incidente moyenne de 340 W/m².

SOLAR RESOURCE MAP GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION



Long term average of GHI, period 1994-2018
Daily totals: 2.6 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 kWh/m²
Yearly totals: 949 1095 1241 1387 1534 1680



Disponibilité de l'énergie

L'éclairement moyen en France est de 1200 kWh / m² /an.

Avec des panneaux d'un rendement de 10 %, il faudrait 4200 km² de panneaux photovoltaïques pour couvrir la consommation française d'électricité (500 TWh), soit 1.3 fois la surface du Rhône ou 40 fois celle de Paris.

L'éclairement moyen dans le Sahara est de 2500 kWh / m² / an.

Avec des panneaux d'un rendement de 10 %, il faudrait 120 000 km² de panneaux photovoltaïques pour couvrir la consommation mondiale d'électricité (30000 TWh), soit un peu moins de la surface de l'Angleterre ou de la Grèce, ou encore 1.3 % du-dit Sahara.

Couvrir le Sahara de panneaux photovoltaïques ?

Économiquement une mauvaise idée : coût d'installation faramineux (prévision à 514 000 milliards \$), le stockage d'électricité très cher (500 000 milliards \$, coût écologique), beaucoup de pertes pour le transport de l'électricité vers les consommateurs, ...

Écologiquement une idée dévastatrice : parce que cela refroidirait le Sahara, changeant la direction des vents, au détriment de l'Amazonie. Plus de pluie en Amazonie → disparition de la forêt → méga-cyclones réguliers en Amérique du Sud + réchauffement climatique.

En bref, une fausse bonne idée.

Figure 3.43 ▸ Solar PV capacity by scenario, 2010-2035

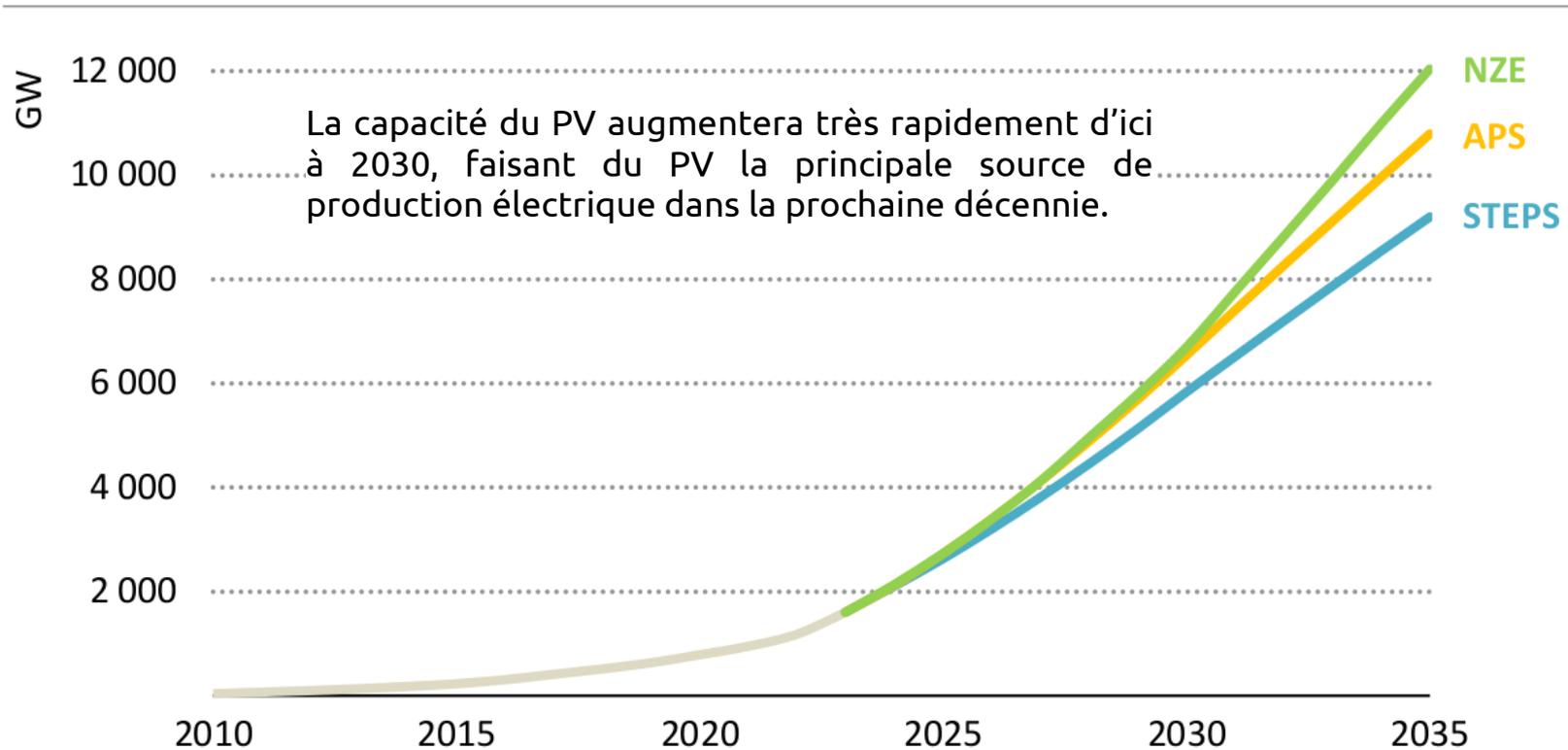
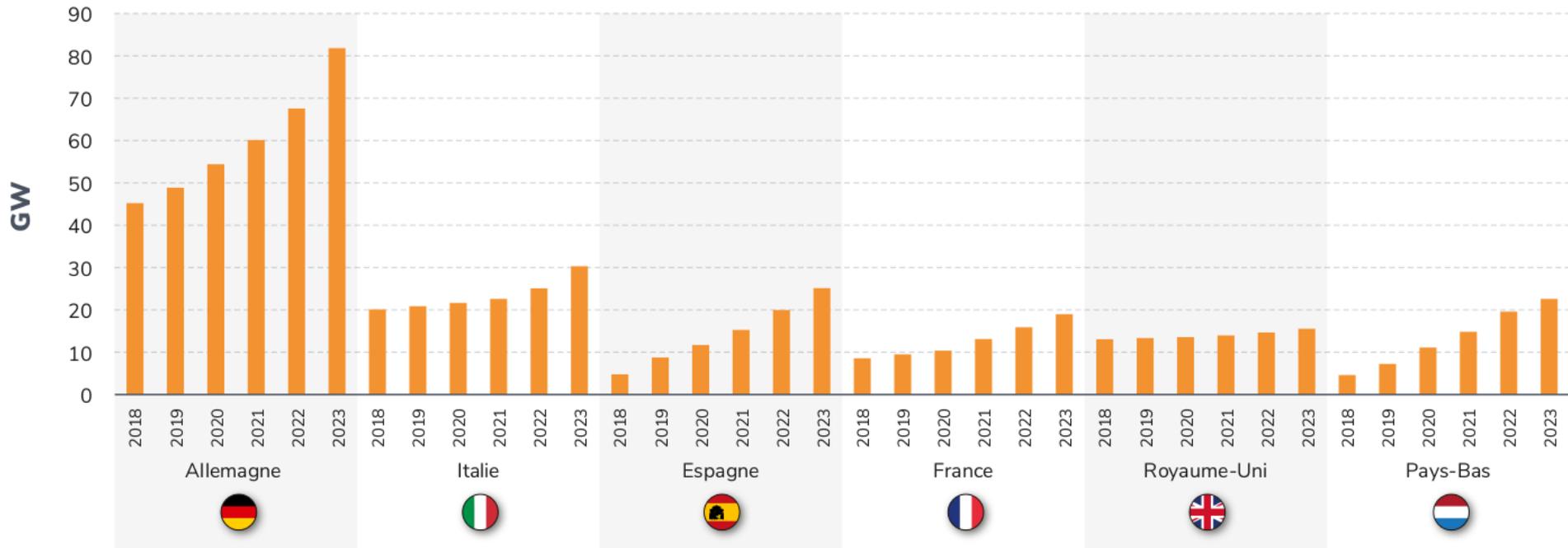
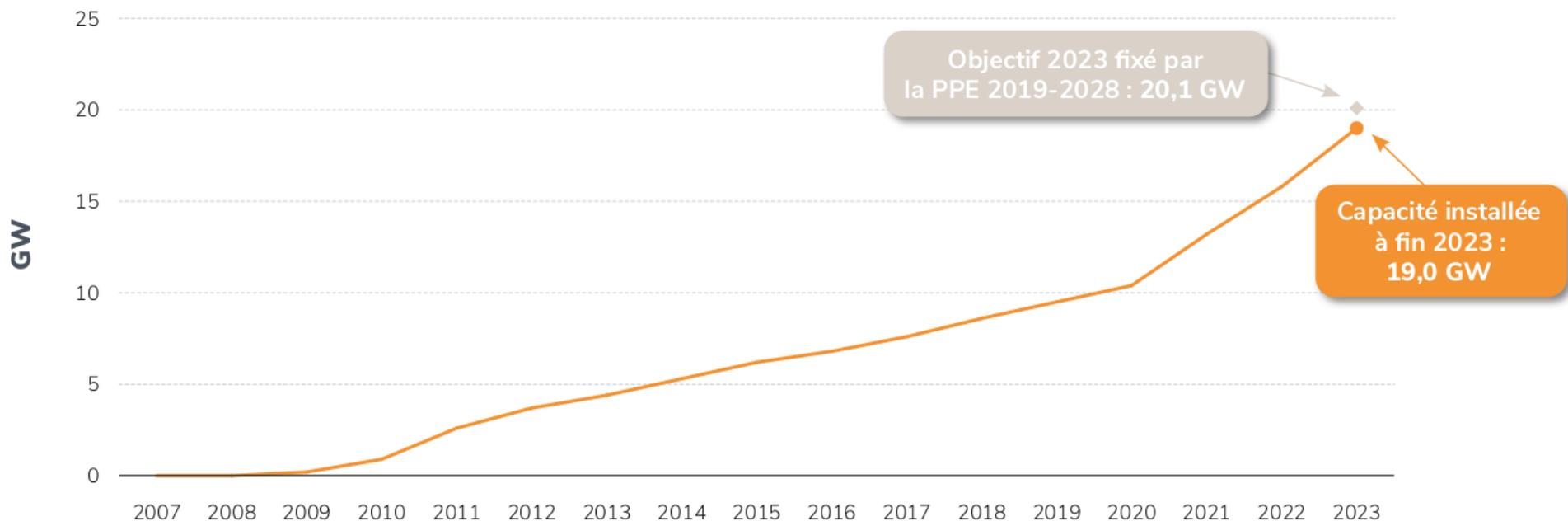


Figure 2.24 : Évolution des capacités solaires photovoltaïques dans une sélection de pays européens (données à fin 2023 sauf Royaume-Uni T3 2023)



Sources : Fraunhofer Institute, REE, RTE, BEIS UK, TERNA, CBS et ENTSO-E

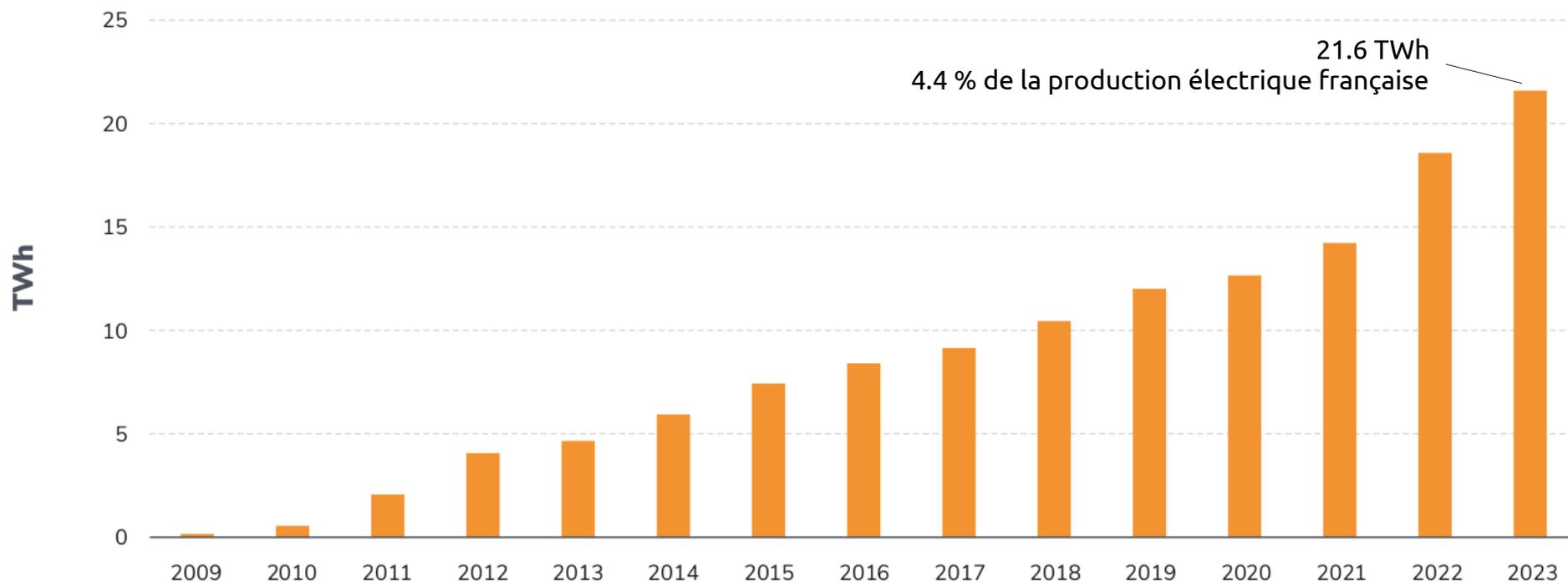
Figure 22 : Évolution du parc solaire photovoltaïque et comparaison avec les objectifs publics à l'horizon 2023



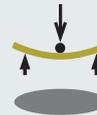
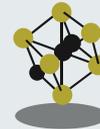
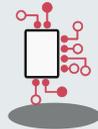
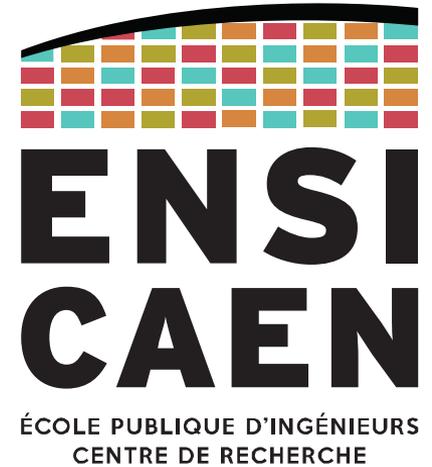
PRODUCTION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Production française d'électricité par le PV

Figure 2.20 : Évolution du volume de production annuel du solaire photovoltaïque entre 2009 et 2023



PRODUCTION THERMIQUE RENOUVELABLE



La production thermique renouvelable d'électricité consiste à brûler des ressources afin de produire de l'électricité.

Le terme renouvelable ne signifie pas « non polluant », puisque la combustion de biomasse peut libérer des gaz à effet de serre.

D'ailleurs la notion « renouvelable » est également sujet à caution, RTE parlant par exemple de « thermique renouvelable et déchets » puisque certaines de ces ressources sont en quantités limitées.

Bien que brûler des déchets pour en faire de l'électricité semble aberrant, il faut se rappeler que les déchets sont d'abord incinérés pour les faire disparaître.

Ici la production d'électricité se fait en **cogénération**, puisqu'on « profite » de la chaleur produite par l'incinération pour la récupérer et produire de l'électricité.

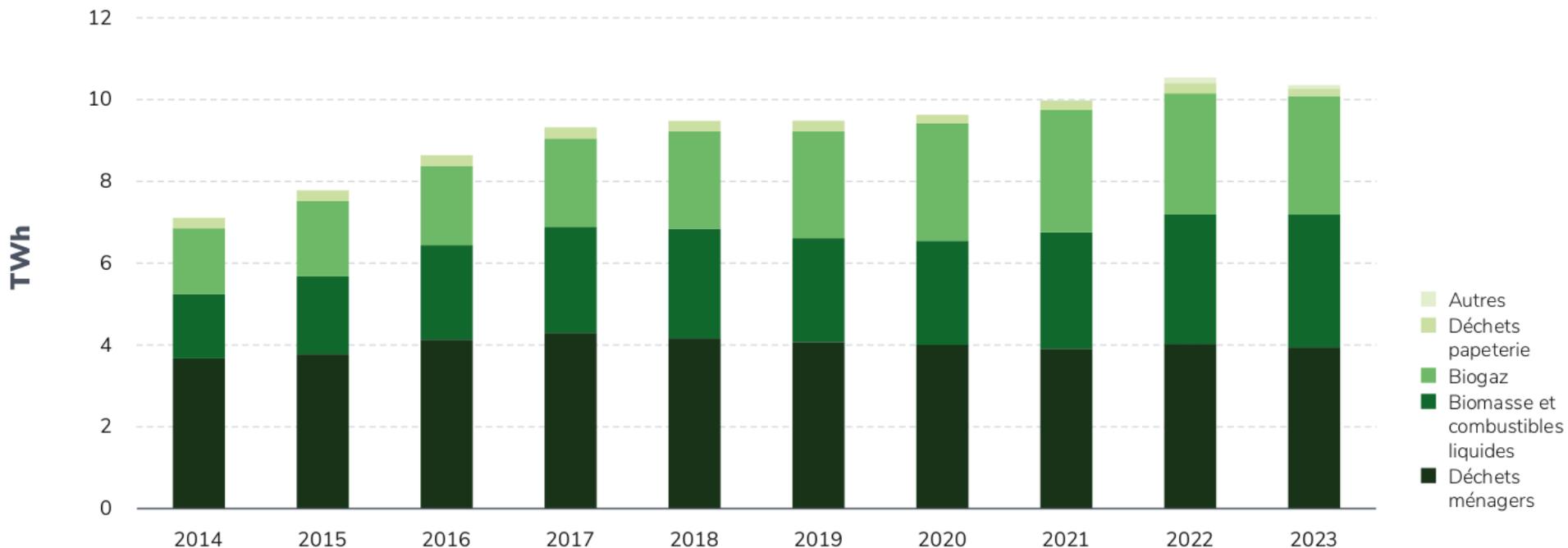
Certaines usines optent plutôt pour intégrer la chaleur produite dans un réseau de chaleur urbain (cas de l'Unité de Valorisation Énergétique de Colombelles, Calvados).

Certaines produisent de l'électricité et de la chaleur à partir de la biomasse (Centrale Dalkia Biomasse de Rennes).

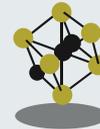
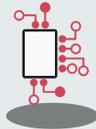
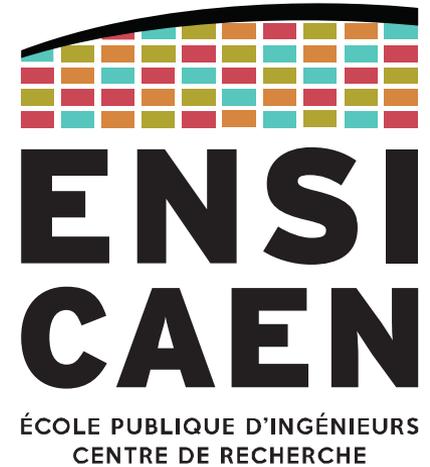
PRODUCTION THERMIQUE RENOUVELABLE

Production française

Figure 2.27 : Évolution de la production du thermique renouvelable et à partir de déchets entre 2014 et 2023



PRODUCTION THERMIQUE FOSSILE



Avec près de 60% de la production mondiale d'électricité, les combustibles fossiles sont actuellement les plus utilisés pour la production d'électricité de par le monde.

Avantages

Démarrage rapide (quelques minutes)

Rendement relativement bon (~60 %) pour les centrales à chaudière récentes (cycle combiné)

Puissance unitaire élevée

Cogénération possible (réseau de chaleur)

Stockage des ressources relativement simples

Coût de fabrication de la centrale peu élevé

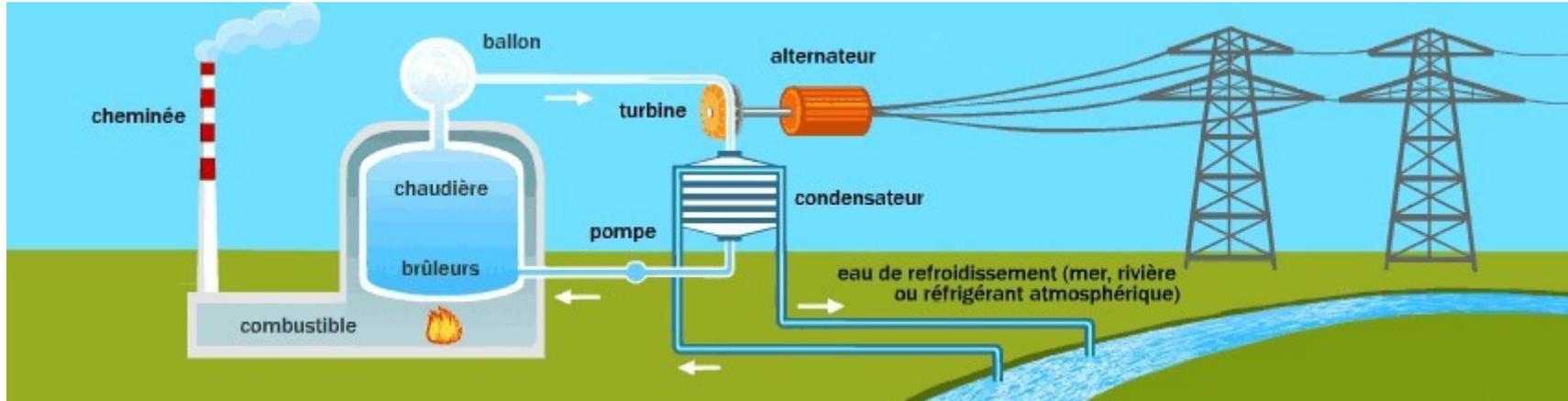
Inconvénients

Pollution à l'exploitation

Dépendance aux ressources

Épuisement des ressources

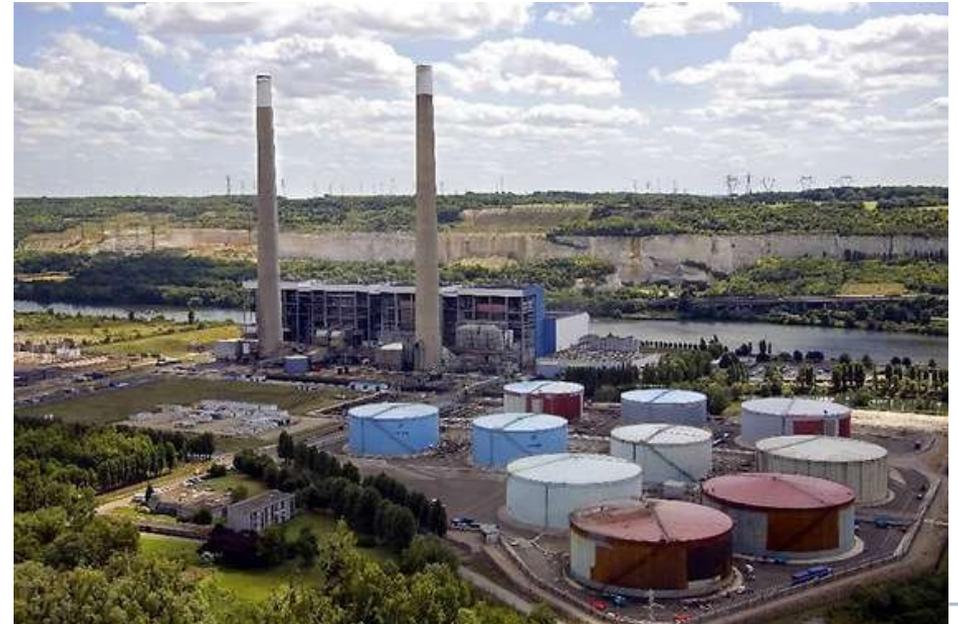
Hors charbon, les centrales les plus répandues sont les centrales thermiques à flammes et à turbine à gaz. Comme pour les centrales nucléaires, ces centrales utilisent des turbo-alternateurs pour la génération d'énergie électrique.



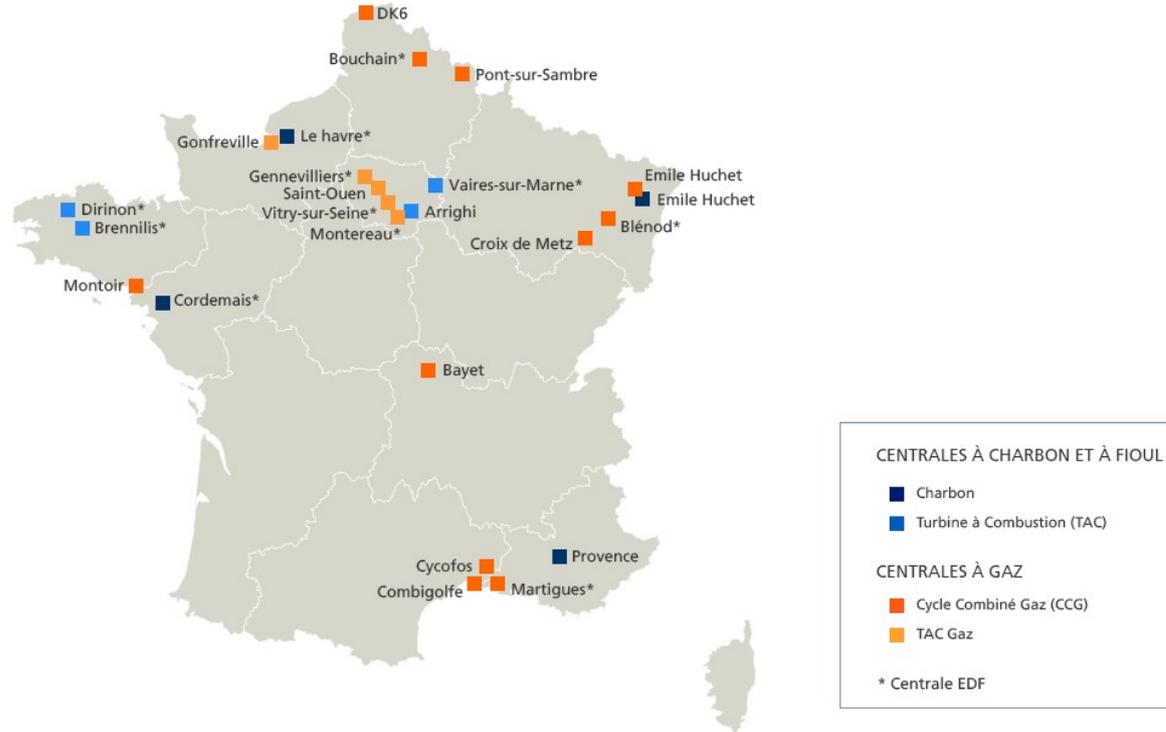
Ces types de centrales ont notamment pour avantage d'être beaucoup plus réactives qu'une centrale nucléaire. Elles servent donc le plus souvent d'appoint au nucléaire et non pour la production continue.

Avec ses 4 générateurs de 600 MW, la centrale à fioul de Porcheville avait pour rôle de faire face aux pointes de consommation du pays afin d'assurer la sécurité du réseau de la région parisienne. Néanmoins, suite au constat de surcapacité de production en France (coût de fonctionnement), la centrale a été mise à l'arrêt en mai 2017.

Photo : unité de production (second plan)
et silos de stockage du fioul (premier plan)



Centrales électrique à flamme en France



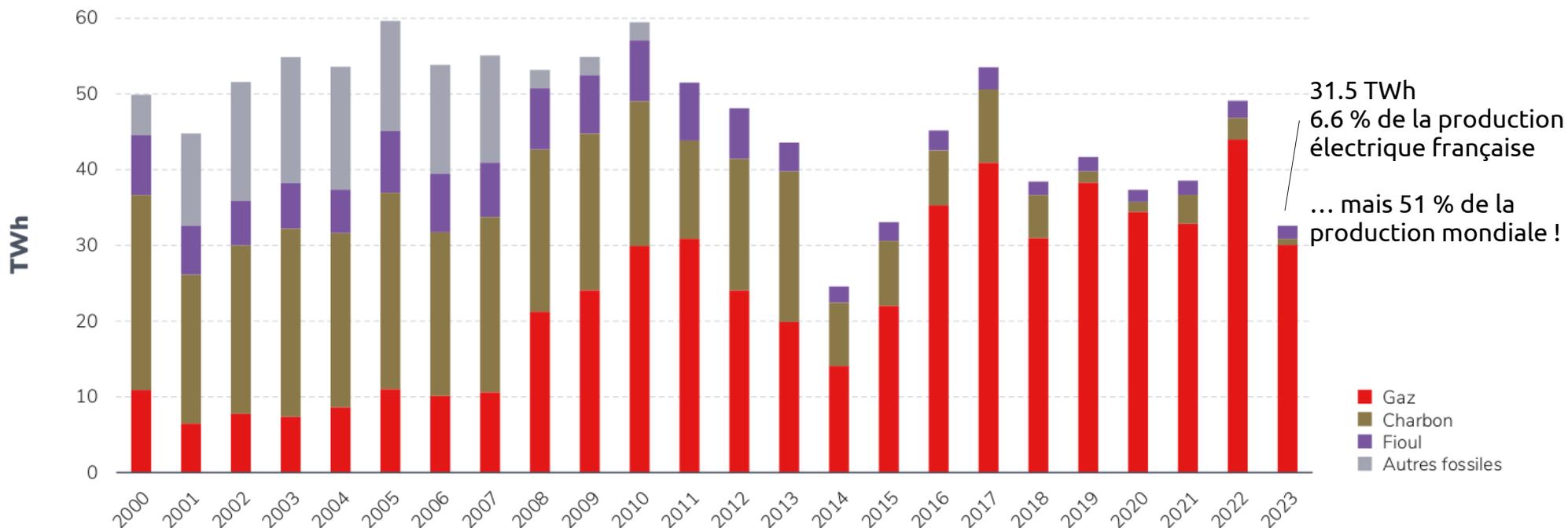
Si on combine cette carte à celle des centrales hydrauliques (plutôt présentes dans la moitié Sud de l'Hexagone),

on s'aperçoit que la répartition géographique des centrales d'appoint permet de participer à la continuité de service et à la stabilité du réseau électrique.

PRODUCTION THERMIQUE FOSSILE

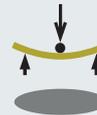
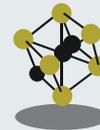
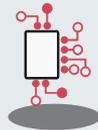
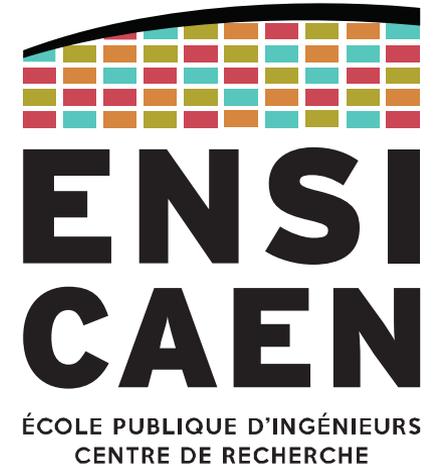
Production électrique à partir du fossile en France

Figure 2.28 : Évolution de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles en France entre 2000 et 2023⁷⁵



Charbon au minimum historique, gaz en forte baisse, fioul toujours très faible ... La baisse significative du fossile en 2023 est due au retour du nucléaire et de l'hydraulique et à l'augmentation du renouvelable.

IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS



Nécessité d'échanger de l'électricité

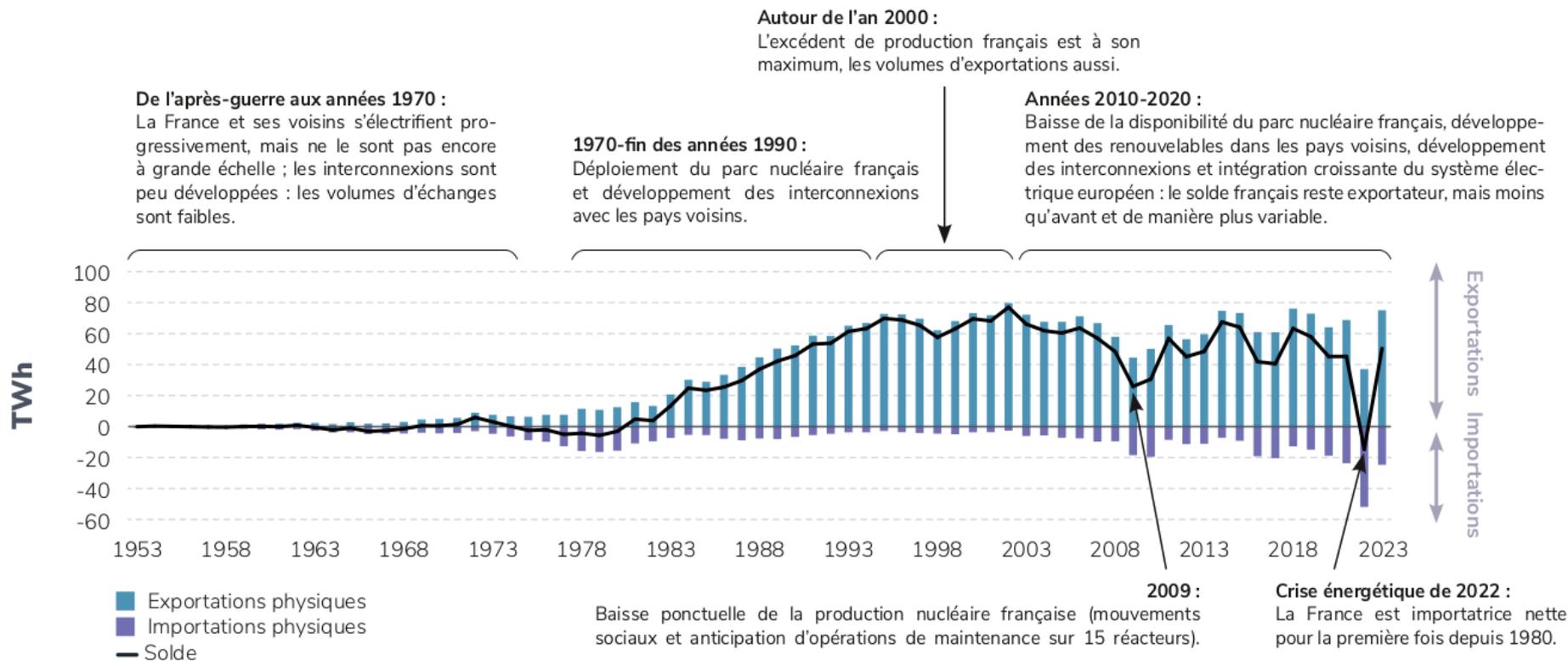
À un instant t , tout pays peut se retrouver en situation de sous-production ou au contraire de sur-production. Les deux étant tout autant dangereux pour la sécurité du réseau électrique national et de ses centrales électriques, il est possible d'échanger de l'électricité avec les pays voisins (en l'achetant ou en la vendant).

Il existe deux situations :

- Les pays effectuant la transaction d'électricité ont les mêmes caractéristiques sur leur réseau de transport (niveau de tension, fréquence), il suffit alors de les synchroniser (même phase) et de les relier
- Les pays effectuant la transaction n'ont pas les mêmes caractéristiques sur leur réseau de transport, il faudra passer par un intermédiaire (généralement un convertisseur AC-DC-AC).
- Note : même si les caractéristiques de deux pays voisins sont identiques, on passe parfois par un convertisseur AC-DC-AC pour d'une part éviter une synchronisation compliquée, ou pour limiter les pertes en effectuant un transport d'électricité en DC.

Échanges d'électricité entre la France et ses voisins

Figure 4.1 : Échanges physiques d'électricité entre la France et les pays voisins entre 1953 et 2023



Réseau synchrone d'Europe continentale (2024)

On retrouve sur cette carte le réseau synchrone d'Europe continentale.

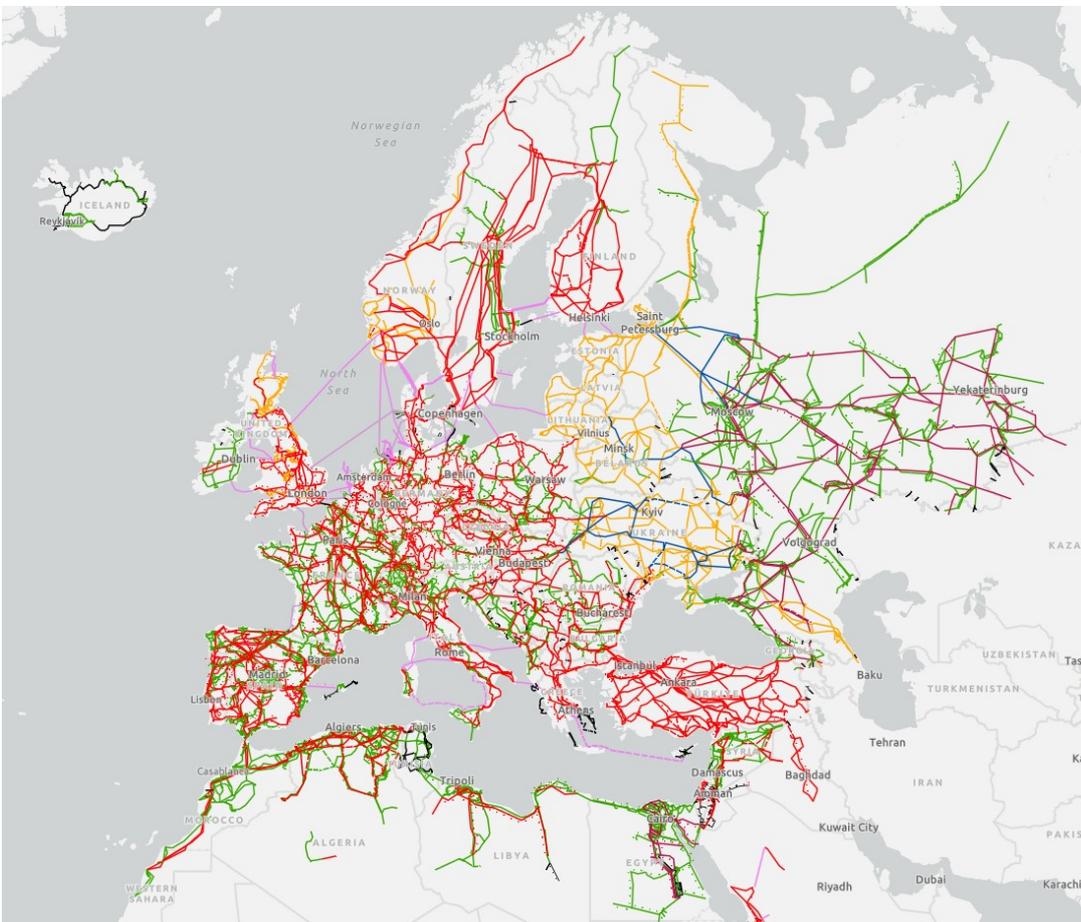
Les lignes vertes et rouges représentent les lignes 220 kV_{AC} et 400 kV_{AC}, surtout en Europe de l'Ouest et Europe Centrale.

En Europe de l'Est, on retrouve plutôt des lignes 300-330 kV_{AC} symbolisées en jaune, voire 750 kV en bleu.

Les lignes roses montrent les connexions en courant continu, principalement pour franchir la mer mais pas seulement (liaisons France-Espagne, France-Italie, ...).

À noter : la partie Nord de l'Afrique et la Turquie sont reliées au réseau électrique Européen.

À noter : l'isolement énergétique de l'Islande



IMPORTATIONS ET EXPORTATIONS

Interconnexions françaises

Figure 4.21 - Carte des interconnexions en service, en développement et à l'étude aux frontières françaises en 2023



Carte des Interconnexions

- ↔ À l'étude
- ↔↔ En développement
- En travaux
- (X) En service (nombre d'interconnexions)
- (A) Courant alternatif
- (C) Courant continu

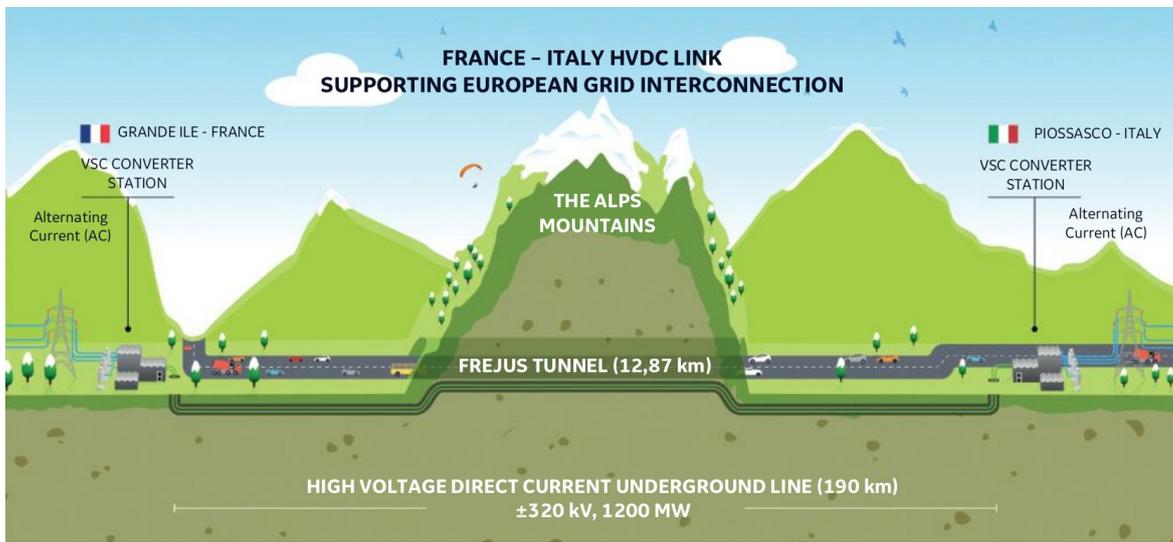
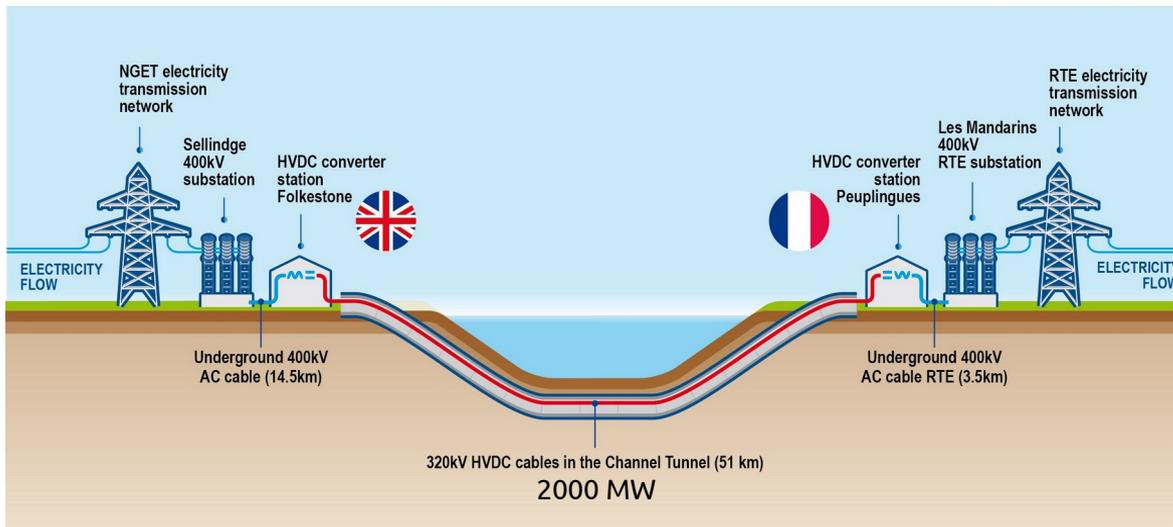
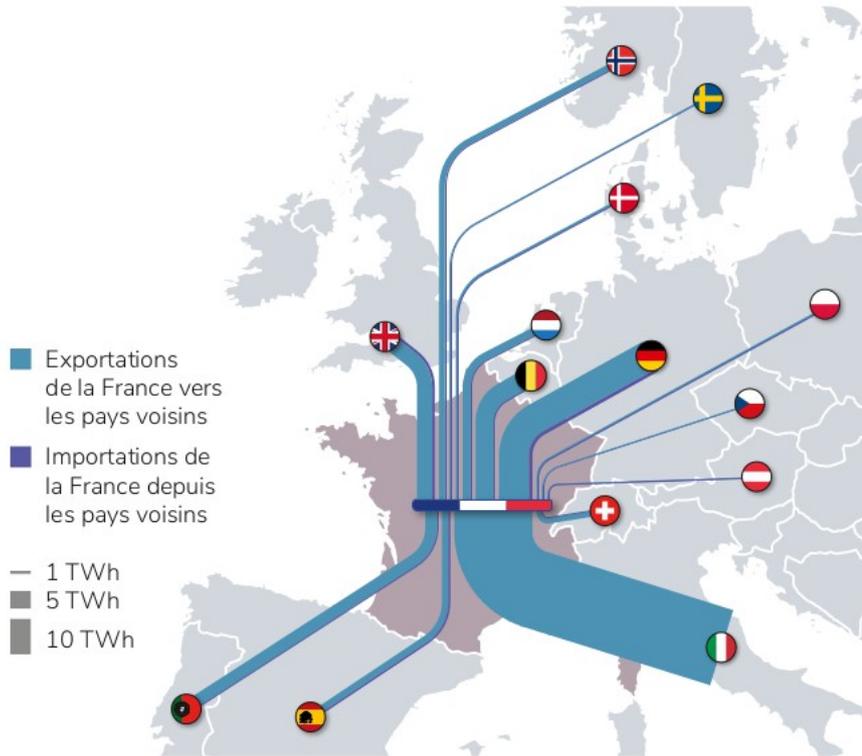


Figure 4.15 - Cartographie des exportations et des importations françaises d'électricité au périmètre élargi en 2023

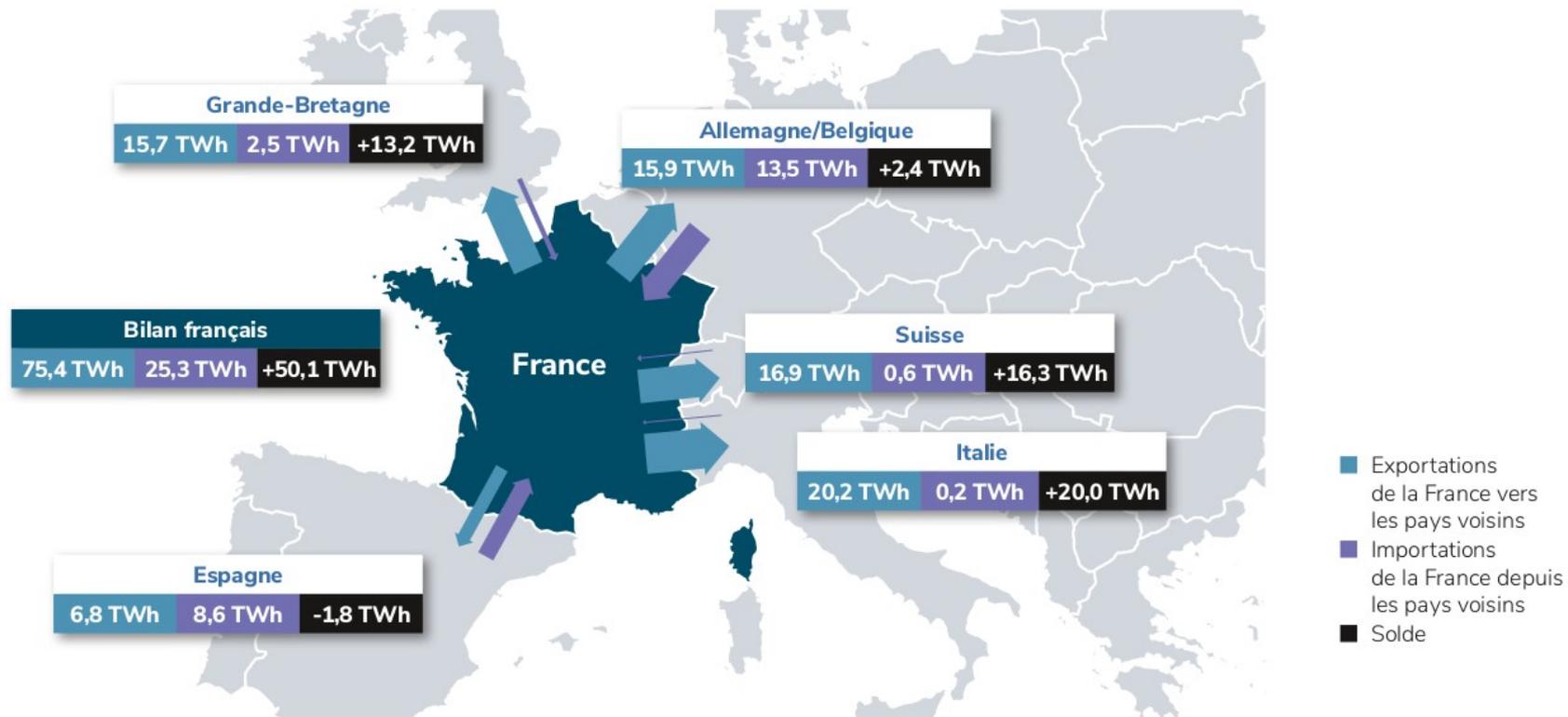


De manière générale la France exporte plus d'électricité qu'elle n'en importe. Ceci est vrai depuis 1980, excepté une fois en 2022.

La France est le pays Européen qui exporte le plus (75 TWh en 2023), mais c'est aussi le pays qui importe le plus (25 TWh). Voici deux raisons :

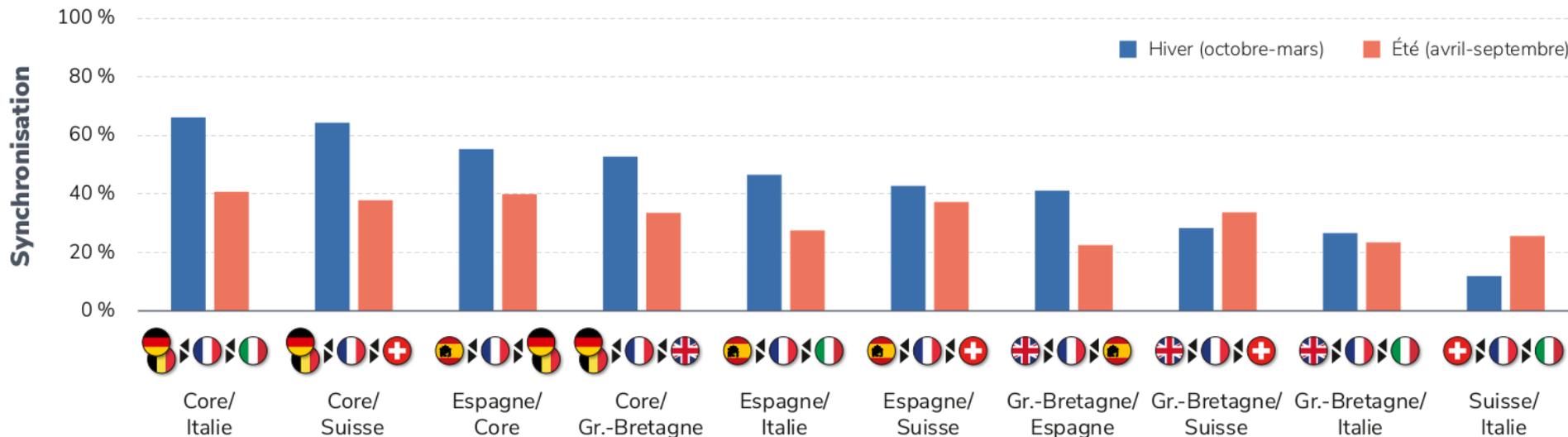
- 1) Le Royaume-Uni et l'Irlande se trouvent en pointe Nord-Est de l'Europe et n'ont que peu de solutions pour exporter leur électricité les quelques fois où ils sont excédentaires. C'est également le cas avec l'Espagne, sauf qu'elle est excédentaire en production d'électricité.
- 2) L'Allemagne, premier producteur ex-æquo d'Europe, produit à >44 % avec des énergies intermittentes. Si les pics de production coïncident avec des creux de consommation, l'Allemagne doit exporter son électricité.

Figure 4.5 - Échanges commerciaux d'électricité entre la France et les pays voisins en 2023



Imports-Exports en France

Figure 4.13 - Synchronisation entre les échanges d'électricité aux différentes frontières françaises sur l'année 2023

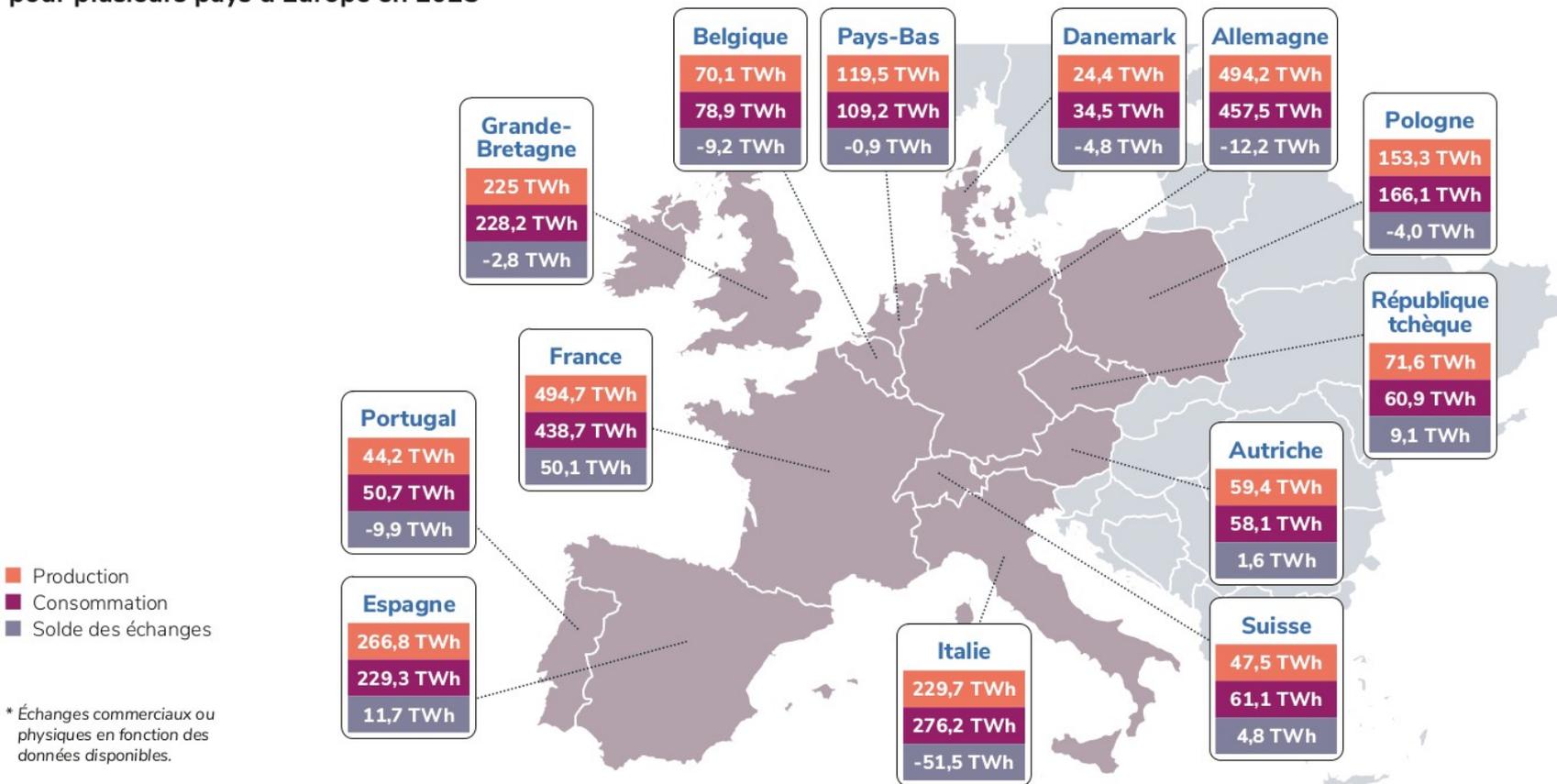


Plus la "synchronisation" entre deux pays est élevée, plus la France a tendance à **importer depuis l'un et à exporter vers l'autre** au même moment

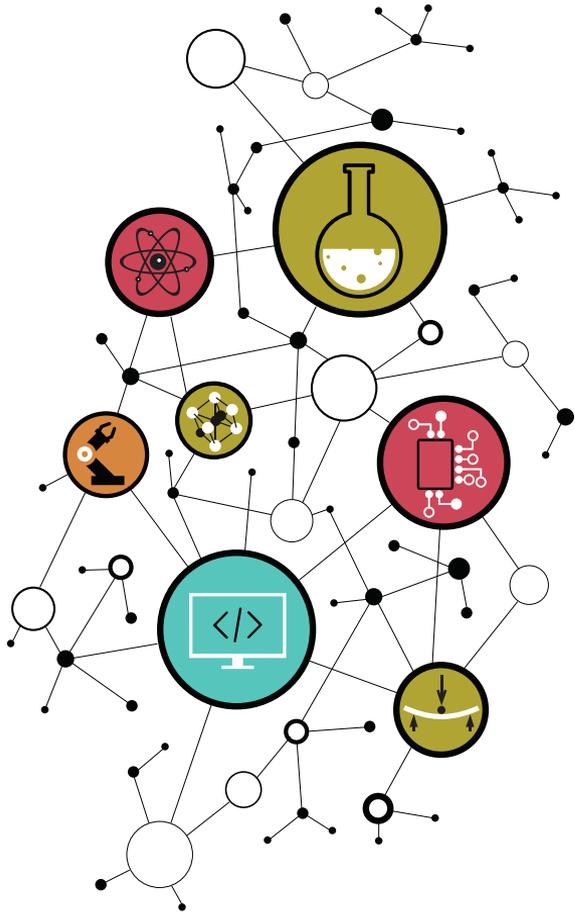
La synchronisation permet d'illustrer que la France est également un pays de transit d'électricité, en récupérant par exemple de l'électricité en provenance d'Allemagne pour la rediriger vers l'Italie ou la Suisse.

Imports-Exports en Europe

Figure 8.1 : Carte de la consommation non corrigée et de la production d'électricité, et du solde des échanges d'électricité* pour plusieurs pays d'Europe en 2023



SOURCES



Bilan électrique 2023, Rapport complet – RTE – 29 février 2024

<https://analysesetdonnees.rte-france.com/bilan-electrique-2023/synthese>

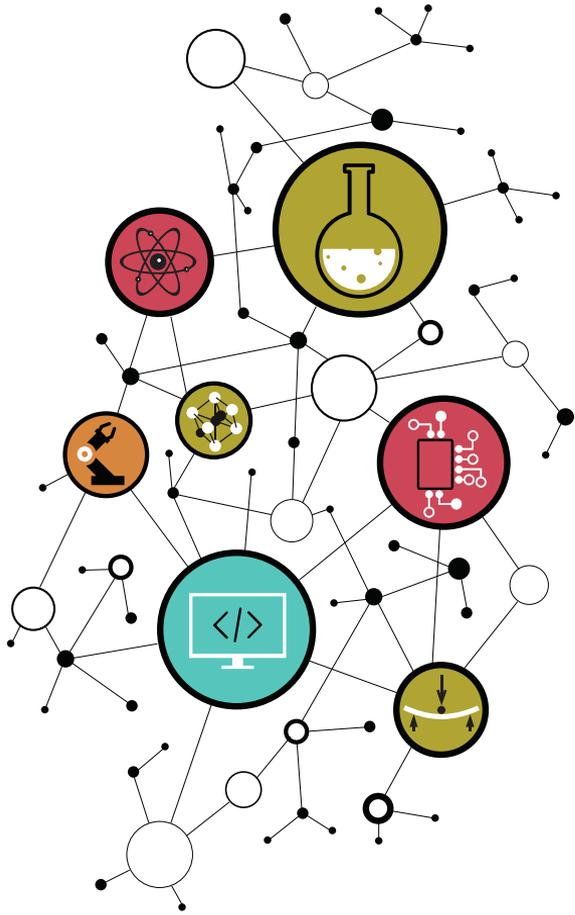
World Energy Outlook 2024 – IEA – Octobre 2024

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

Chiffres clés de l'énergie, édition 2024 – Ministère de l'écologie – 17 Septembre 2024

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2024>

CONTACT



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN

dimitri.boudier@ensicaen.fr

Avec l'aide précieuse de :

- Hugo Descoubes (PRAG ENSICAEN)



Except where otherwise noted, this work is licensed under
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>