

Energies renouvelables (ENR)

Avantages et limites



Santa-Café – 3 mai 2021

Jacques Piacentino

Energies renouvelables (ENR)

Sommaire

- Définitions
- Un peu d'histoire
- Panorama synthétique des ENR
- Situation actuelle dans le Monde
- Avantages escomptés
- Contraintes et limites
- Aspects économiques
- Situation actuelle en France
- Quelles perspectives pour 2050 ?

* Sources en fin de présentation

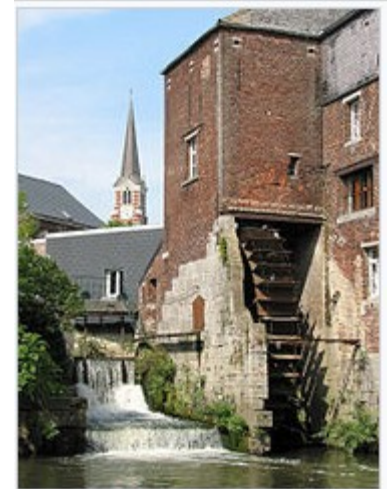
Définitions

- **Sources d'énergie** dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées inépuisables à l'échelle du temps humain
- **Caractère renouvelable** : $f(V_c, V_r)$ avec $V_c \ll V_r$
 - V_c : vitesse de consommation
 - V_r : vitesse de renouvellement
- **Origine** : phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres
 - Système Soleil - Terre : thermique, photovoltaïque, éolien, hydraulique, biomasse
 - Système Lune - Terre : Marée → marémotrice
 - Système Terre : Géothermie
- **Approche systémique et intégrative**
- → **S/système ENR**
 - S/système nucléaire
 - S/système Hydrogène
 - Autres S/systèmes → **Intégration dans Système énergétique global**

Un peu d'histoire

A la fin du 18ème, à la veille de la de la révolution industrielle, la quasi totalité des besoins d'énergie étaient assurés par les ENR :

- Traction animale : 50 %
- Bois : 25 %
- Moulin à eau : 10 – 15 %
- Force humaine : 5 %
- Vent (voile, moulins à vent) : 1 %



Un moulin à eau.



Moulins à vent.

Panorama synthétique des ENR

- **Energie Solaire- 2 grandes familles :**
 - **Thermique** : chaleur par rayonnement
 - **Utilisation directe** : chauffage local, chauffe-eau, (four solaire, 150°)
 - **Utilisation indirecte** : production de vapeur pour turbines (solaire thermodynamique)
 - Ivanpah : 392 MW ; 140 000 foyers
 - **Photovoltaïque** :
 - Energie électrique produite par rayonnement solaire ; (panneaux de toits ou centrales solaires).
 - Puissance : de 6 MW à >1000 MW
 - Noor Abu Dabi ; 1 177 MW

La prod. de solaire thermique est 25 % fois plus coûteuse que celle du photovoltaïque

Produit 20 à 40 fois plus d'énergie pendant la durée de vie que celle utilisée pour la fabrication



Énergie solaire thermique :
Chauffe-eau solaire



Énergie solaire thermodynamique :
Centrale solaire d'Ivanpah



Énergie solaire photovoltaïque :
Panneaux solaires intégrés en toiture

Panorama des ENR (suite 1)

- **Energie éolienne** : utilisation des déplacements d'air dans l'atmosphère ; énergie mécanique → énergie électrique
 - Puissance d'une éolienne terrestre / offshore : 3 MW / 14 MW
 - Puissance d'une ferme éolienne : 300 MW → 600 MW
- **Energie Hydraulique** :
 - **Energie quasi parfaite : bon marché, pas de GES, bonne solution de stockage de l'électricité**
 - Puissance : de 100 MW (Romanche Gavet) à 3 600 MW (Jinping)
- **Autres ENR**
 - Marée-motrice ; puissance : 240 MW
 - Vagues (houlomotrice)
 - Hydrolienne : courants marins ; puissance : 3 MW



Panorama des ENR (suite 2)

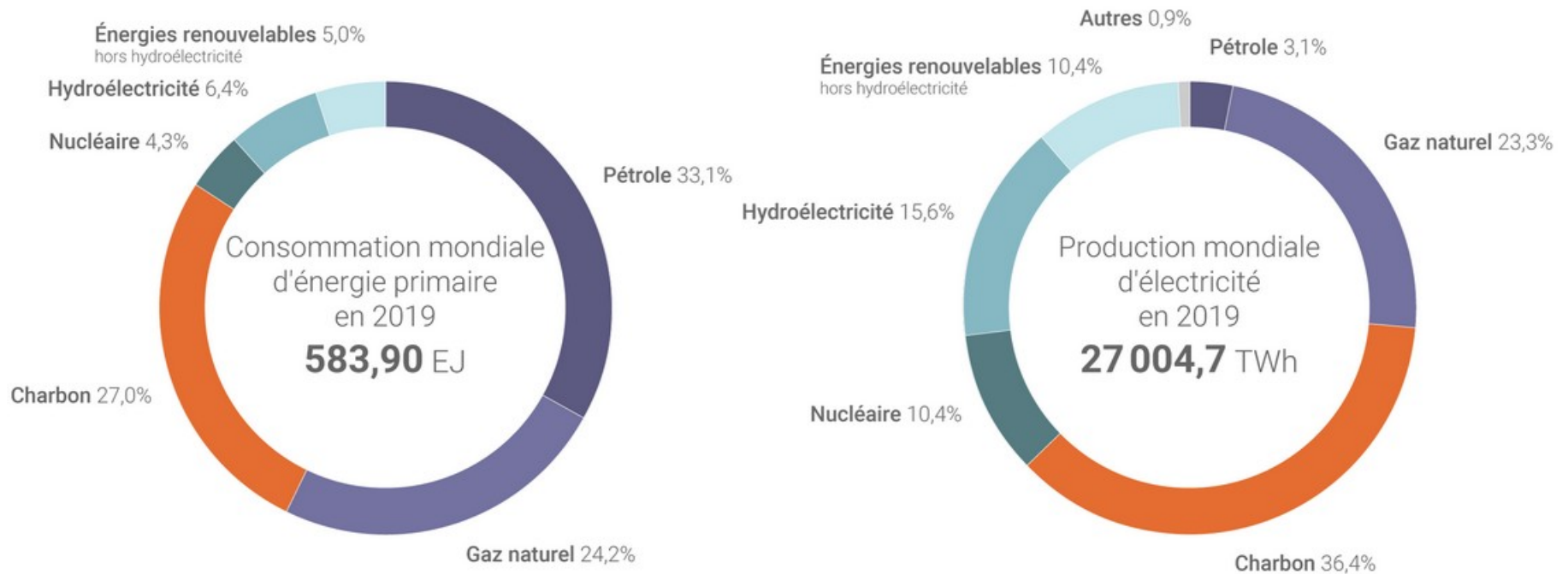
- **Biomasse** : combustion et métabolisation ;
 - **Bois** : encore principale ressource utilisée
 - **Condition** : $Q \text{ brûlées} < Q \text{ produites}$
 - Centrale de Biganos ; puissance : 69 MW + 260 T/h de vapeur
 - **Biocarburants** : concurrence avec production vivrière ; + dépenses énergétiques importantes (transport et transformation)
- **Energie géothermique** ; extraction de la vapeur :
 - Utilisation directe → chauffage
 - Utilisation indirecte → production d'électricité
 - Centrale de Nesjavellir : Puissance 120 MW électricité ; 300 MW d'énergie thermique
- Liste complète des ENR – Annexe 1



Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande.

Situation actuelle dans le monde

Monde La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2019



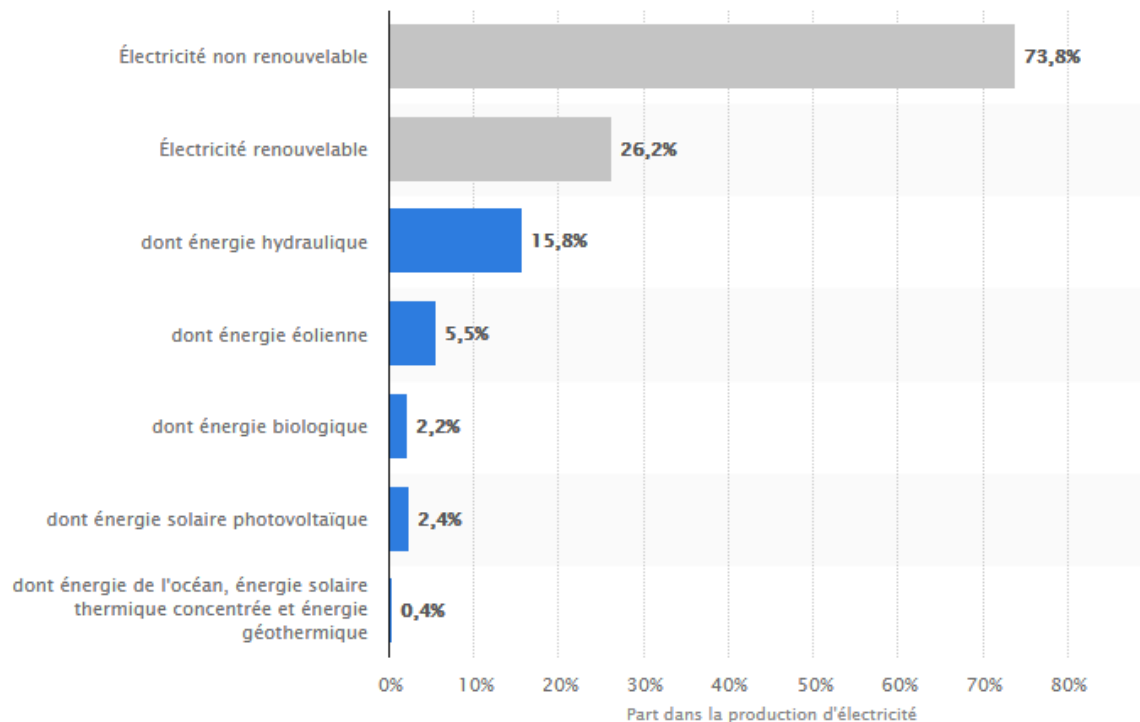
Source : BP Statistical Review of World Energy, juin 2020.

En 2019, 62,8% de la production mondiale d'électricité était carbonée. (©Connaissance des Énergies, d'après BP Statistical Review of World Energy)
En 2019, 62,8% de la production mondiale d'électricité était encore carbonée. (©Connaissance des Énergies, d'après BP)

- Conso. énergie primaire : 84,3 % carbonée - 11,4 % renouvelable – 4,3 % nucléaire
- **Production d'électricité : 62,8 % carbonée – 26 % renouvelable - 10,4 % nucléaire**
- **1/3 de l'énergie est perdue dans le process de transformation (primaire → finale)**
- 1 Exajoule = 10^{18} J ; 1TJ = 278 MWh

Situation actuelle dans le monde (suite 2)

- Part des ENR dans la production mondiale d'électricité



L'électricité représente 19 % de la production totale d'énergie → **26 %** en 2060 (EIA*)

Part des ENR dans la prod. électrique 2060 devrait passer de **26 % à 74 %** (EIA scénario 2°C)*

* <https://www.connaissancedesenergies.org/lelectricite-decarbonee-axe-majeur-de-la-transition-energetique-mondiale-170607>

Situation actuelle dans le monde (suite 3)

- **Electricité renouvelable ;**

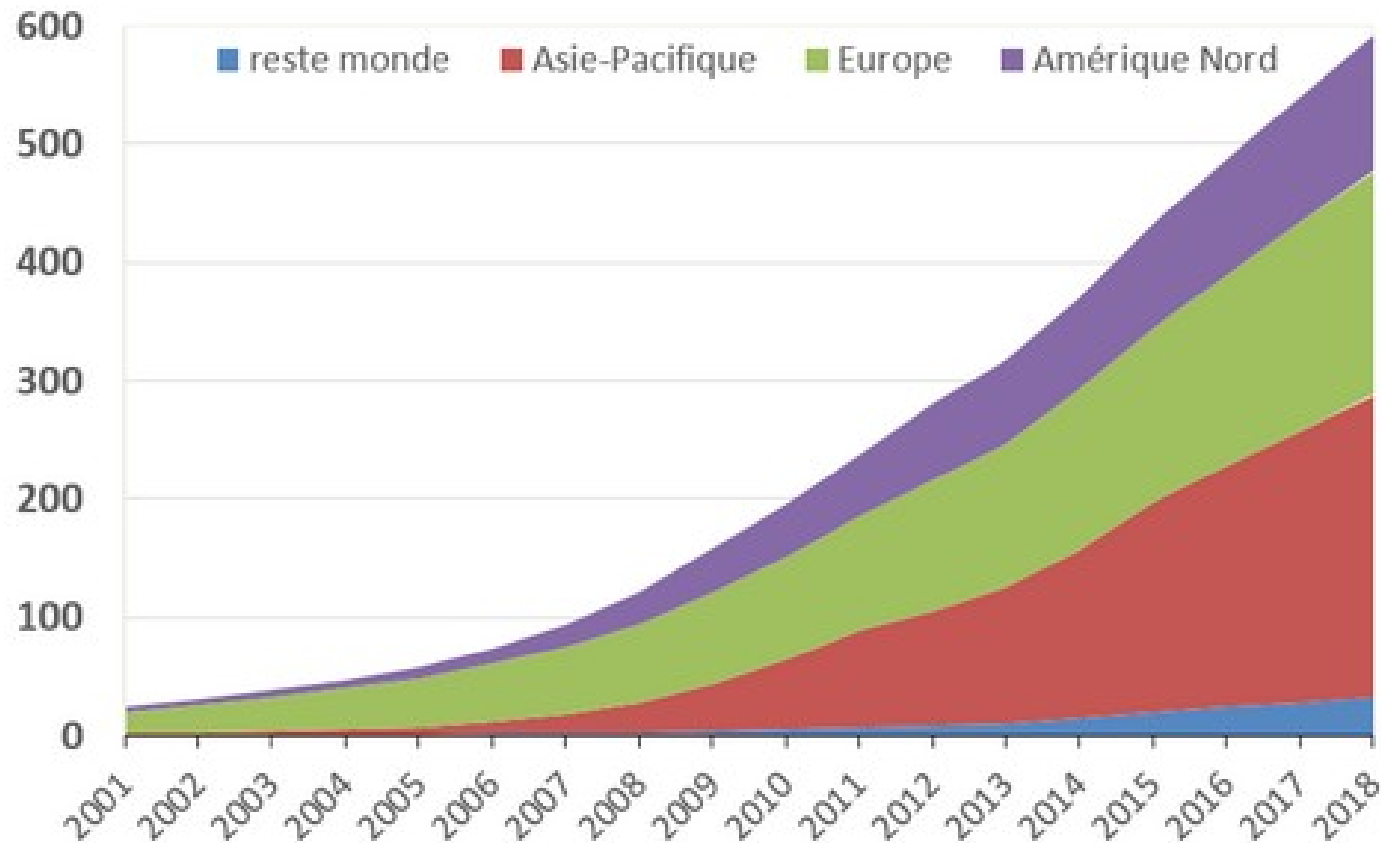
•

Cinq premiers pays producteurs de chaque énergie renouvelable électrique en 2019^{n 4, e 4}

Rang	Hydroélectrique (production)	Géothermie (capacité)	Éolien (capacité)	Biomasse (capacité)	Solaire PV (capacité)	Solaire thermodynamique (capacité)
1.	 Chine	 États-Unis	 Chine	 Chine	 Chine	 Espagne
2.	 Brésil	 Indonésie	 États-Unis	 États-Unis	 États-Unis	 États-Unis
3.	 Canada	 Philippines	 Allemagne	 Brésil	 Japon	 Maroc
4.	 États-Unis	 Turquie	 Inde	 Inde	 Allemagne	 Afrique du Sud
5.	 Russie	 Nouvelle-Zélande	 Espagne	 Allemagne	 Inde	 Chine

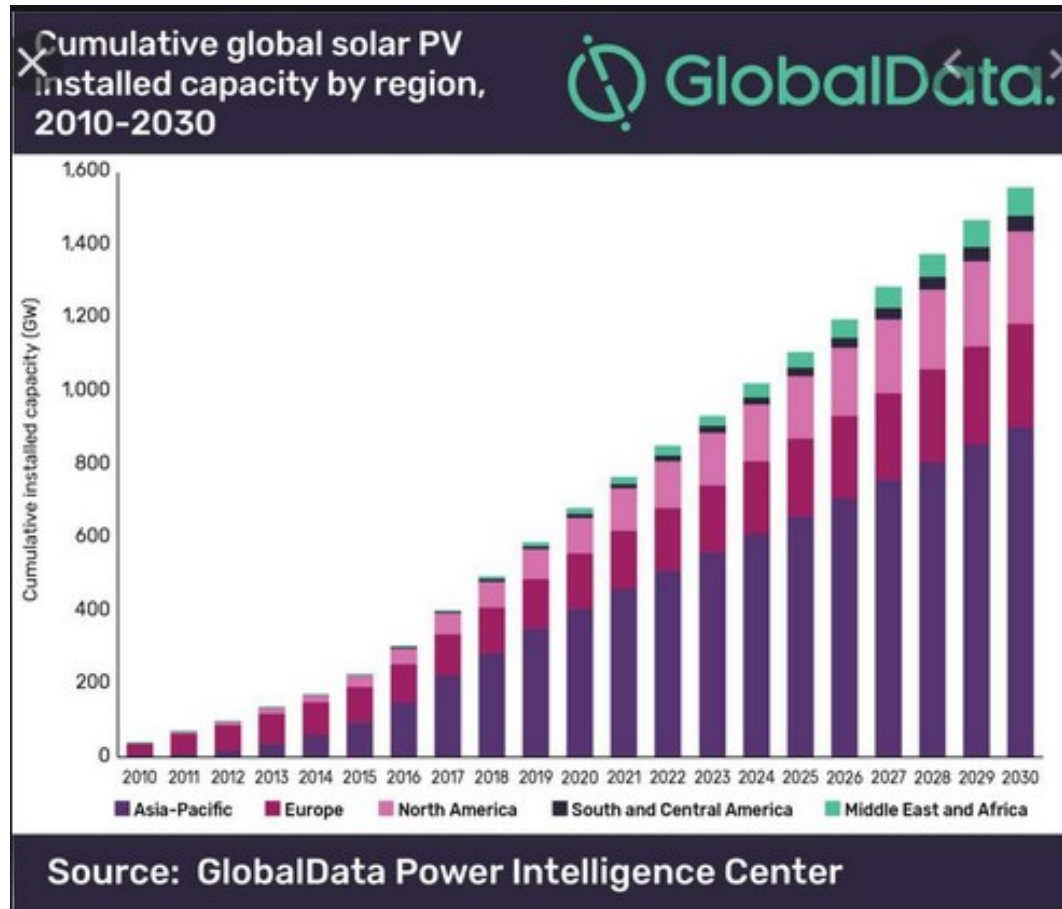
- **Principaux groupes industriels mondiaux (annexe 3)**

Zoom sur l'éolien mondial



- **Capacité mondiale cumulée : 591 GW dont 23 GW off-shore (équivalent à 590 réacteurs nucléaires)**
- **Production d'électricité 2018 : 1200 TWh ; 4,6 % de la prod. mondiale (26 000 TWh)**

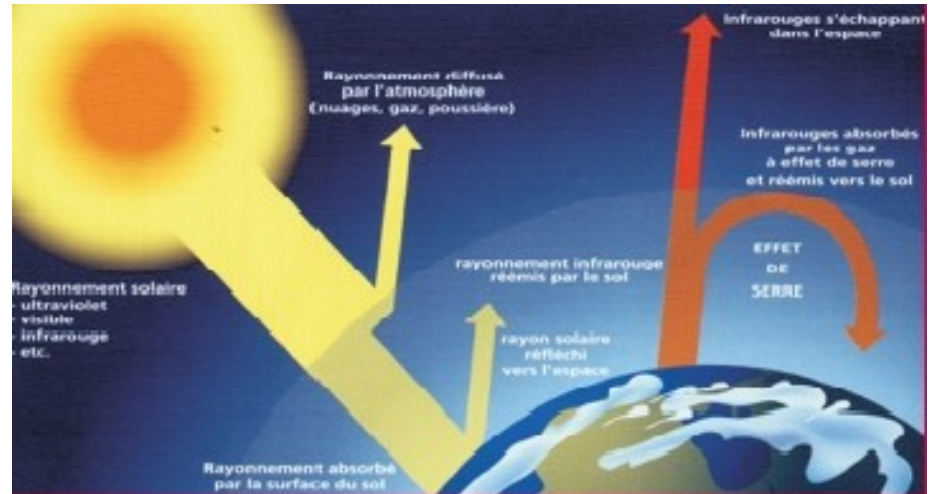
Zoom sur le photovoltaïque mondial



- **Capacité installée 2018 : 500 GW**
- **Production d'électricité 2018 : 554 TWh (2,2%) - moitié de l'éolien.**
- **Mais très forte croissance : 724 TWh en 2019 ; + 30 % vs 2018**
- **Les 2/3 de la production par 4 pays : Chine (35%), USA, Japon, Allemagne (9%)**

Avantages escomptés

- **Réduction des GES**



- **Niveau Europe* :**

Diminution des GES (1990-2015) : 22 %.

Contribution par type d'énergie (base 100 %) :

- | | |
|--|-------------|
| • Passage du charbon au gaz : | 33 % |
| • Production Eolienne : | 19 % |
| • Production Solaire : | 3 % |
| • Réduction conso électricité : | 18 % |
| • Réduction conso fossiles habitats et industrie : | 12 % |
| • Réduction des émissions de CO ² liés aux transports : | 15 % |

- *Les enjeux liés aux transitions énergétiques – J. de Gerlache

Avantages escomptés (suite 1)

- **Avantages des ENR en géopolitique et sécurité :**
 - **Indépendance énergétique** des pays sans ressources fossiles ou fissiles
 - **Réduction des risques économiques mondiaux** (1^{er} et 2^{ème} chocs pétroliers) ;
Mais nouvelles dépendances --> Ex : La Chine produit 60 % des cellules photovoltaïques et 71 % des panneaux solaires
 - **Evitement des conflits** liés aux ressources.
Ex : 1^{ère} guerre d'Irak motivée par le pétrole ;
commandos français au Niger pour sécuriser l'uranium en 2013



Avantages escomptés (suite 2)

- **Amélioration santé publique**

- PB sanitaires & environnementaux atténués ou éliminés par ENR

- Etude European Heart Journal* ; nombre de morts en 2015 :

- **Monde : 8,8 millions** (Covid 3,2 millions)

- **Chine : 2,8 millions**

- **Europe : 800 000**

- **France : 67 000**

Réduction de la pollution → effet local et court terme

Atténuation RC → effet mondial et long terme

- **Autres avantages escomptés :**

- Sûreté : faibles risques d'accidents vs accidents nucléaires

- Pas de déchets radioactifs

- Pas de destruction ou de pollution de l'environnement liés aux extractions fossiles

*https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/03/12/la-pollution-de-l-air-tue-deux-fois-plus-que-prevu_5435029_3244.html

Contraintes et limites

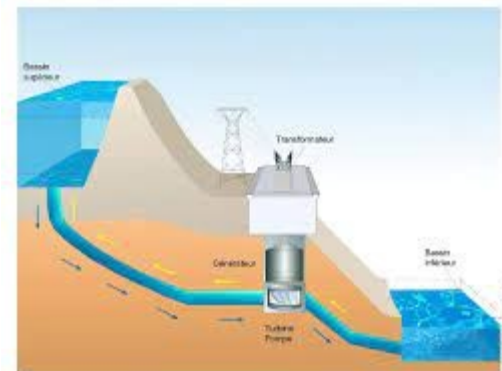
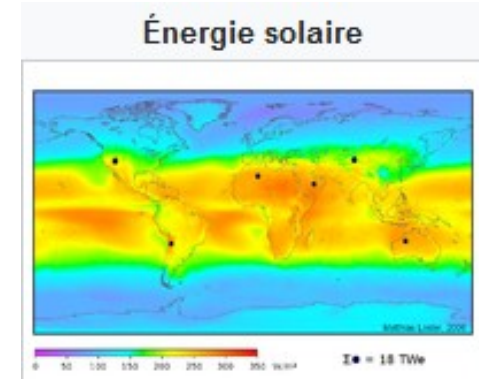
- **Gestion de l'intermittence et stockage**
 - Fortes variations de disponibilité sans possibilité de contrôle
 - **Facteurs de charge (moyenne France) :**
 - **Eolien : terrestre :24 %; off-shore : 38 %**
 - **Solaire : 15 %;**
 - **Nucléaire : 75 %**

Stockage nécessaire pour valoriser efficacité des ENR

- Une douzaine de systèmes de stockage : batteries, **hydraulique :STEP (1)** ; hydrogène... (cf. Annexe 2)
- **Etude EDF** : simulation système électrique Européen avec 60 % ENR dont 40% intermittents ; météo 30 dernières années.(2)
 - **Conclusion : besoin de 500 GW de centrales pilotables (thermiques, hydrauliques ou biomasses) pour assurer l'alimentation !!**

(1) Le Danemark utilise les barrages norvégiens pour stocker son énergie éolienne excédentaire (cf.annexe 4)

- **(2)** <https://www.edf.fr/sites/default/files/Lot%203/CHERCHEURS/Portrait%20de%20chercheurs/summarystudyres.pdf>



Contraintes et limites - Exemple de coupure dues à l'intermittence

– **Coupure d'électricité en Californie été 2020 :**

- Production d'électricité : 33 % par ENR (solaire, éolien)
- Fermeture d'une centrale nucléaire de 2000 MW (théoriquement compensée par ENR)
- Circonstances systémiques au mois d'août :
 - Période de canicule → pas de vent
→ forte conso de clim.
- **Conséquences :**
 - 220 000 foyers privés d'électricité pendant périodes de 60 à 90 minutes
 - Emissions de CO² (centrales à gaz pour compenser)

–

Coûts actualisés par types de stockage – Etude ADEME

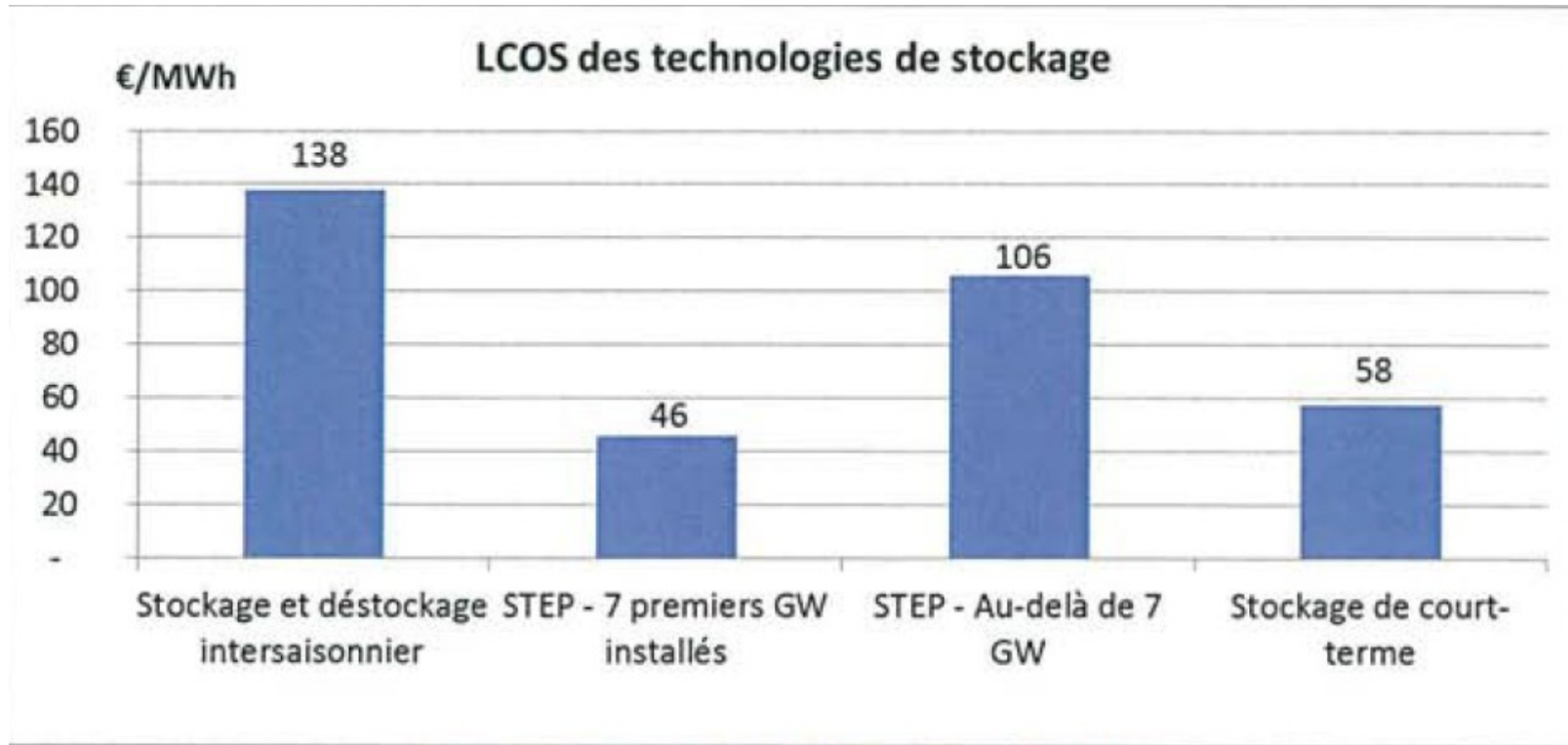


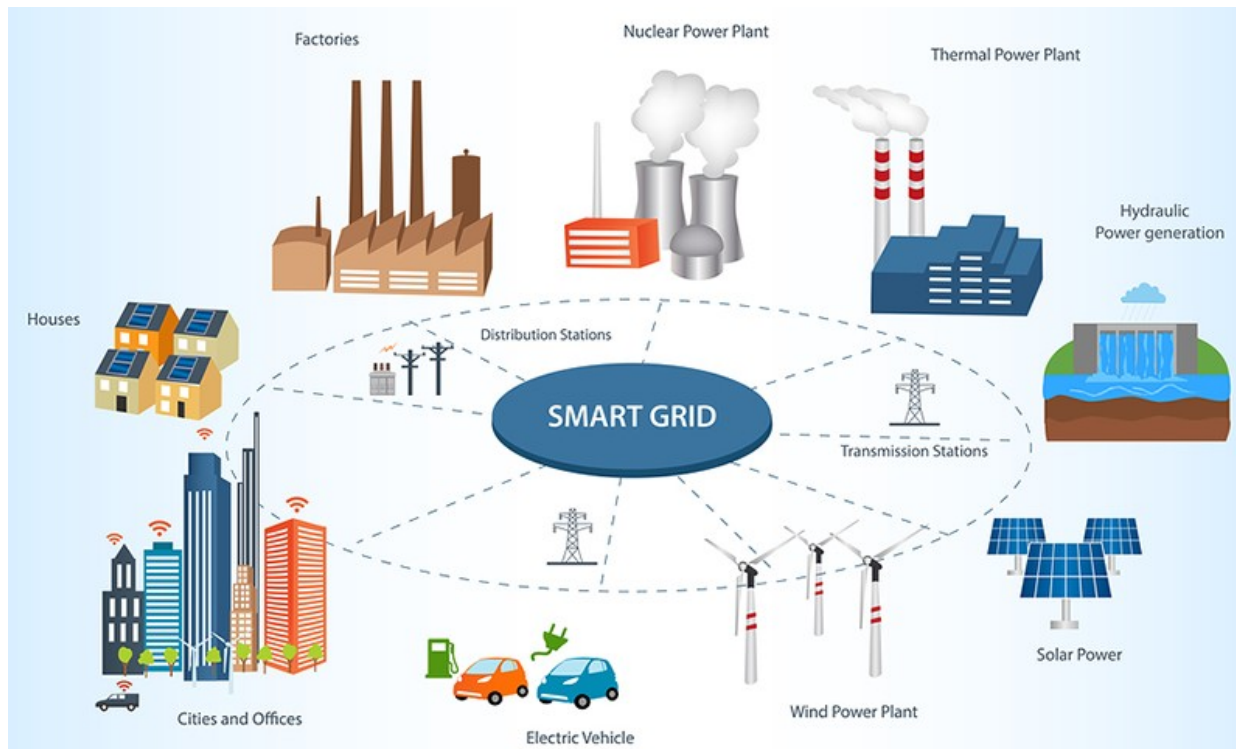
Figure 11 - Comparaison des LCOS des différents stockages

C'est le surcoût de l'énergie destockée, hors prix d'achat de l'électricité stockée

- Stockage intersaisonnier : « Power to Gas » et « Gas to Power »
- STEP : Stations de Transfert d'Energie par Pompage
- Stockage de court terme : batteries ou stockage par air comprimé (CAES)
- Demain Hydrogène

Contraintes et limites (suite 2)

- **Une nécessité : Le réseau électrique intelligent (Smart Grid)**
 - Pour Jérémy Rifkin, « 3ème révolution industrielle » : Convergence énergie et informatique :
 - Développement de systèmes de stockage des énergies intermittentes (via hydrogène ou véhicules électriques utilisés comme accus mobiles)
 - Réseaux électriques intelligents avec mise en commun et partage de millions de sources d'ENR distribuées → optimisation production, distribution, consommation et stockage



Contraintes et limites (suite 3)

- **Réseaux de transport d'énergie.**

- ENR produites loin de la zone de consommation → PB du transport et de l'optimisation du réseau.
- Etude de l'AIE horizon 2035 (1) : 1/4 de l'investissement pour les réseaux de transport devra être affecté aux développements liés aux ENR.
 - **16 millions de kms de lignes supplémentaires soit 460 Milliards \$, pour digitaliser, moderniser, étendre le réseau**
- En France RTE devra investir 1 Milliard sur 10 ans en infrastructure de transports

- **Nuisances et pollution**

- **Biomasse solide :**
 - **Collecte et combustion du bois : déforestation, émissions CO² non comptabilisé (UE, USA), suppression de captage de CO²**
50 %des ENR dans l'UE ; 37 % en France
 - **Le Royaume Uni importe du bois de USA pour ses centrales à bois !**
 - Lettre ouverte à Joe Biden et à Van Der Leyen (2)

- (1) <http://www.senat.fr/compte-rendu-commissions/20111121/office.htm>

- (2) <https://www.documentcloud.org/documents/20482842-scientist-leter-to-biden-van-der-leyden-michel-suga-moon-february-11-2021>

Contraintes et limites (suite 4)

- **Risques sur la biodiversité.**

- Oiseaux tués par les éoliennes ; étude US 230 000 à 570 000 oiseaux tués/ an*
- Chauve-souris : pas par collisions mais par dépression près des pales (barotraumatismes)

*<https://www.20minutes.fr/planete/2162223-20171102-collisions-deforestation-quand-developpement-energies-renouvelables-nuit-animaux>

- Barrages :
 - perturbent migration des poissons
 - Passe à poissons sur le barrage de Mauzac sur la Dordogne

- **Nuisances paysagères**

- Impact sur les paysages et le milieu → PB d'acceptation des riverains ; « **Not in my backyard** »
 - **Grandes éoliennes**
 - **Centrales solaires** (pas de PB pour les toitures solaires)
 - Pylones électriques supplémentaires pour transport ENR



Échelle à poissons du Barrage John-Day sur le fleuve Columbia, aux États-Unis.



Aspects économiques

- **Coûts**

- **Les coûts de l'éolien et du solaire ont beaucoup baissé**

- Devenus rentables pour la construction de centrales électriques.

En 2018 plus des 2/3 des nouvelles centrales électriques étaient d'origine ENR

Coût actualisé de production (LCOE) au niveau mondial en 2019 (en dollars US par MWh)

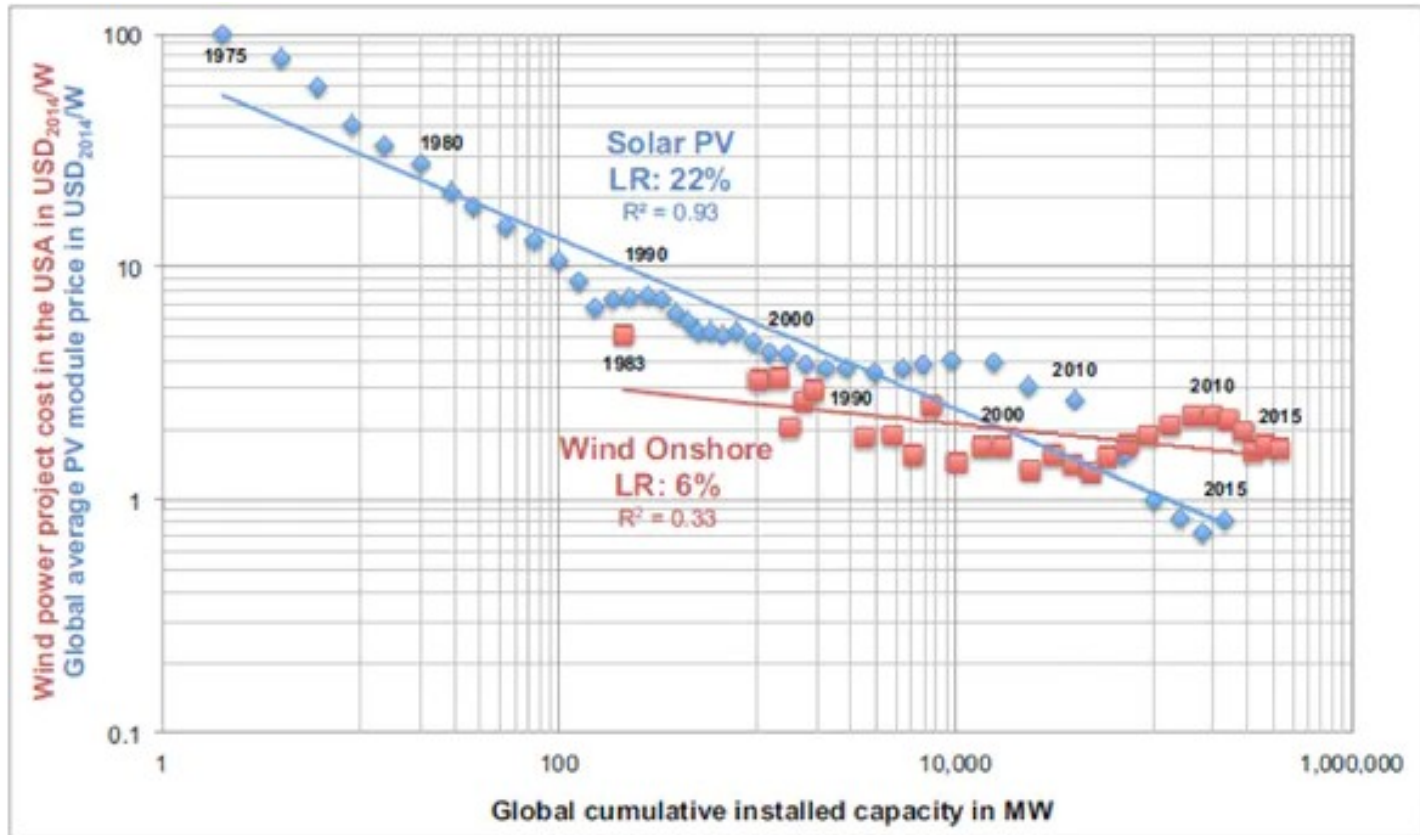
Source	Éolien	Solaire PV	Charbon	Gaz en cycle combiné
	Éolien terrestre bas moyen	Échelle industrielle bas moyen	Existant neuf	Existant neuf
BNEF ⁹⁸	27 47	26 51		
Lazard ⁹⁹	28 41	32 37	33 109	44 56
IRENA ¹⁰⁰	44 56	58 85		

- **Comparaison avec l'électricité d'origine nucléaire :**

- Coût historique en France : entre 35 et 71\$ -30 et 60€ - (le coût de 71\$ intègre le démantèlement et le retraitement du combustible)
 - Coût de revient (2019) de l'EPR de Flamanville : 141\$ (120€) - Prospective EDF : 70€

- BNEF (Bloomberg New Energy Finance) ; IRENA (Agence Internationale pour les Energies Renouvelables)
- Lazard: <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2019/10/29/clean-energy-will-continue-to-hit-dirty-power-as-costs-continue-to-fall/?sh=c46893e19814>.

Aspects économiques Solaire - Eolien (suite 1)

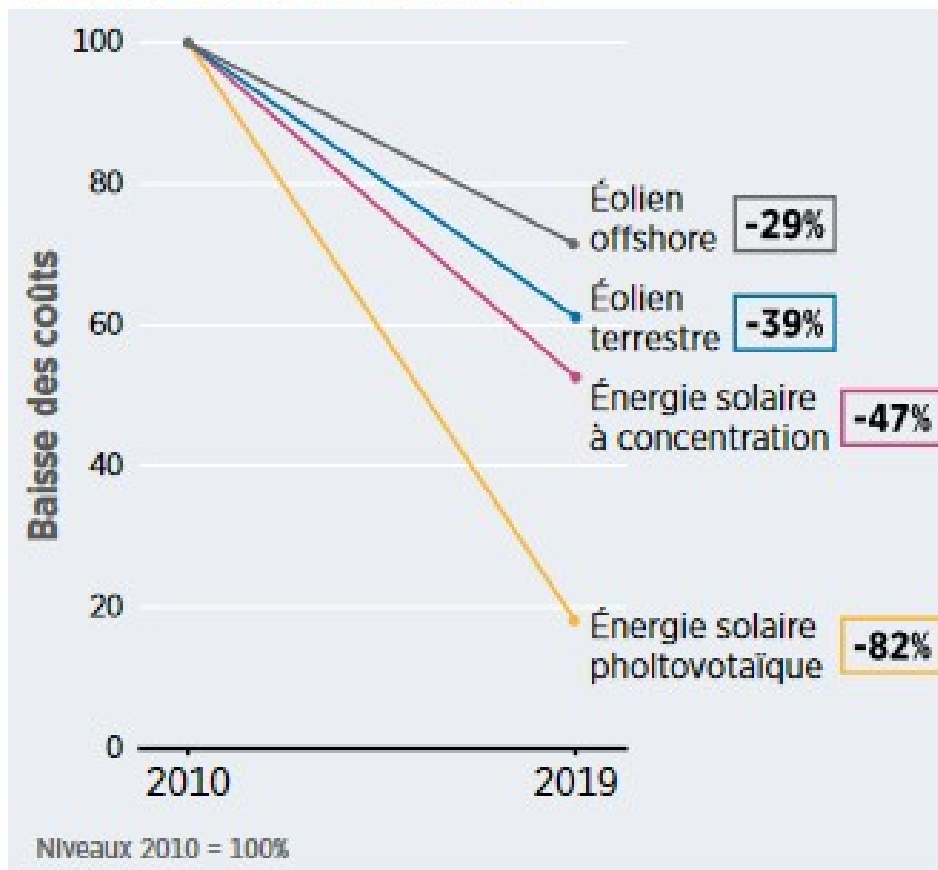


Coût du Watt installé/capacité cumulée installée mondiale en MW. [Sascha Samadi/Wuppertal Institut](#)

- Le coût des panneaux a été divisé par 100 en 45 ans
- A chaque doublement des capacités installées → Baisse de 22 % du coût du watt

Aspects économiques (suite 2) - Baisse des ENR 2010 - 2019*

Technologies de production d'énergies renouvelables :



- **Solaire PV : - 13 % → 2019 vs 2018**
- **Eolien terrestre et off-shore : - 9 %**

*https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Costs_2019_FR.PDF?la=en&hash=0F823456EE17105E31B14EBFFDEE97DFDB33AF11

Aspects économiques (suite 4)

- **Prospective économique**
 - **Prévision de l'AIE 2019 – 2024 (mondial) (1)**
 - **Installation de 1200 GW de nouvelles ENR ; + 50 % (# 20 fois le parc nucléaire français = 60 GW)**
 - **Solaire + 60 %**
 - **Eolien en mer : x 3**
 - **La part des ENR dans la production d'électricité passera de 25 % à 30 %**
 - **Etude Stanford 2019 :(2)**
 - **Analyse du système énergétique de 143 pays représentant 99,7 % des émissions mondiales de CO² ; transition énergétique → 100 % ENR en 2050 (éolien, hydraulique et solaire) → réduction des coûts de 61 %/an pour les 143 pays**

(1) <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/lambition-devorante-des-majors-des-energies-renouvelables-1268375>

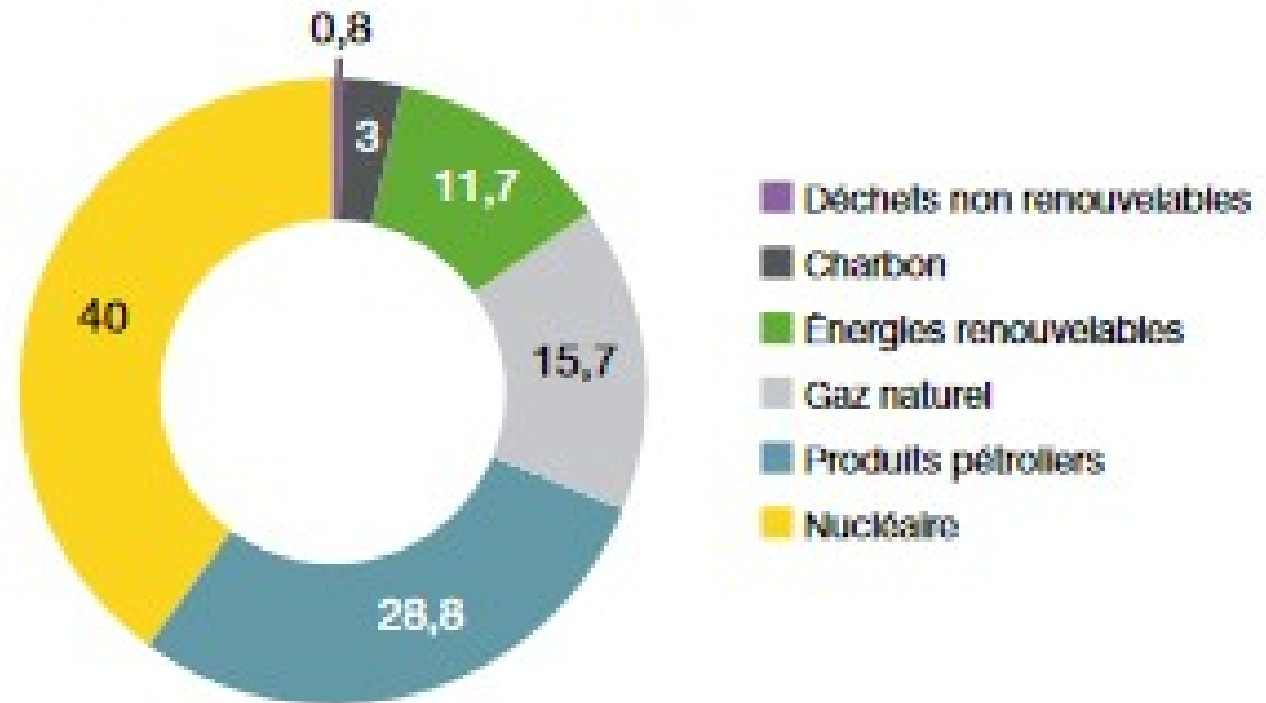
(2) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332219302258>

Les ENR en France

CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE EN 2019

TOTAL : 2893 TWh, dont 339 TWh pour les énergies renouvelables

En % (données corrigées des variations climatiques)



Source : calculs SOES

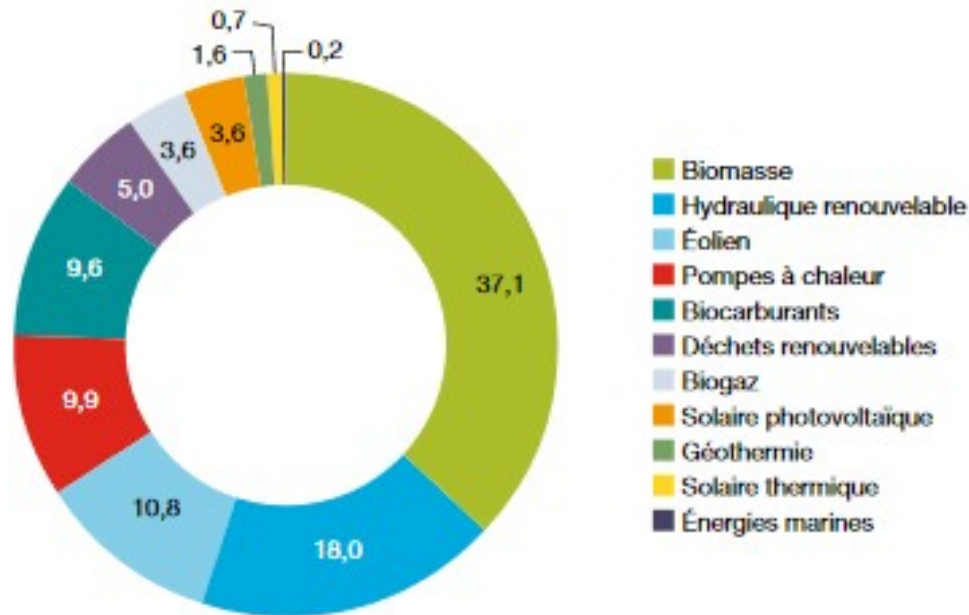
Les ENR = 11,7 % de la consommation d'énergie primaire

Les ENR en France (suite 1)

PRODUCTION PRIMAIRE D'ÉNERGIES RENOUVELABLES PAR FILIÈRE

TOTAL : 320 TWh en 2019

En %

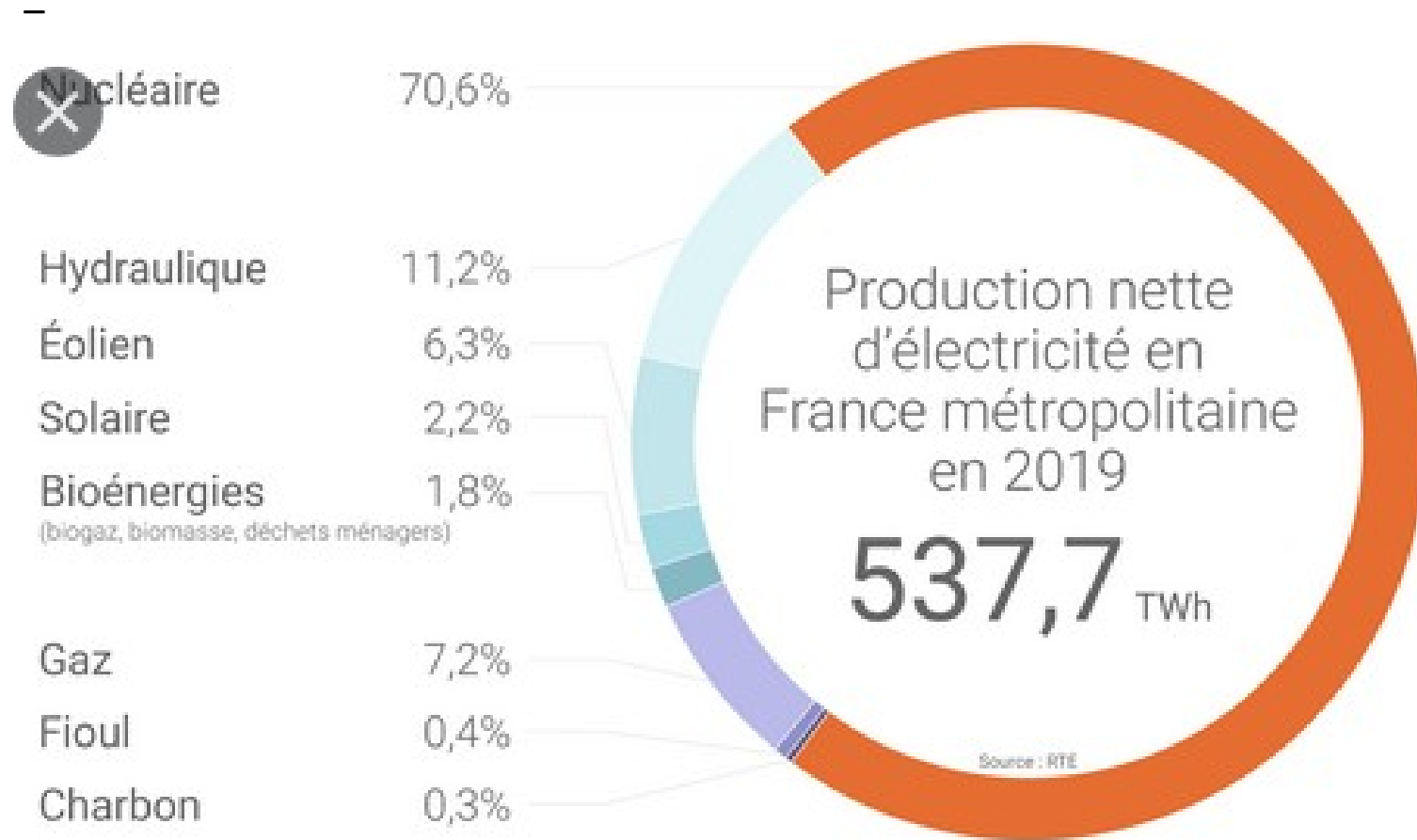


Champ : France entière (y compris DOM).

Source : SDES, Bilan énergétique de la France

En 2019, la production primaire d'énergies renouvelables s'élève à 320 TWh. Les principales filières restent la biomasse solide (37,1 %), l'hydraulique renouvelable (18,0 %), l'éolien (10,8 %), les pompes à chaleur (9,9 %) et les biocarburants (9,6 %).

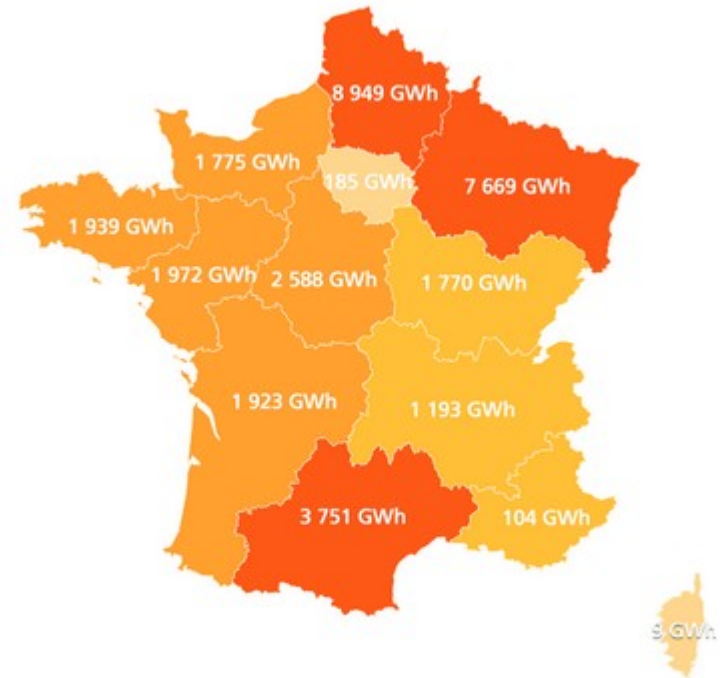
Production d'électricité en France par filière



- **L'électricité représente 25 % de la consommation finale d'énergie**
- **92 % de la prod.électrique est non carbonnée dont 21,5 % d'ENR**

L'éolien en France

- **.16 GW de capacité installée (7000 éoliennes # 16 réacteurs nucléaires)**
- **Production d'électricité 2019 :**
34 TWh , soit 6,3 % de la production nationale (538 TWh)
Forte croissance : +21 % vs 2018
- **60 % de la production nationale par 3 grandes régions**
- **7 parcs off-shore en cours de développement : 3 900 MW # 450 éoliennes**
- **Durée d'un projet en France : 10 ans**
en Chine : 3 ans



Éolien : production par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

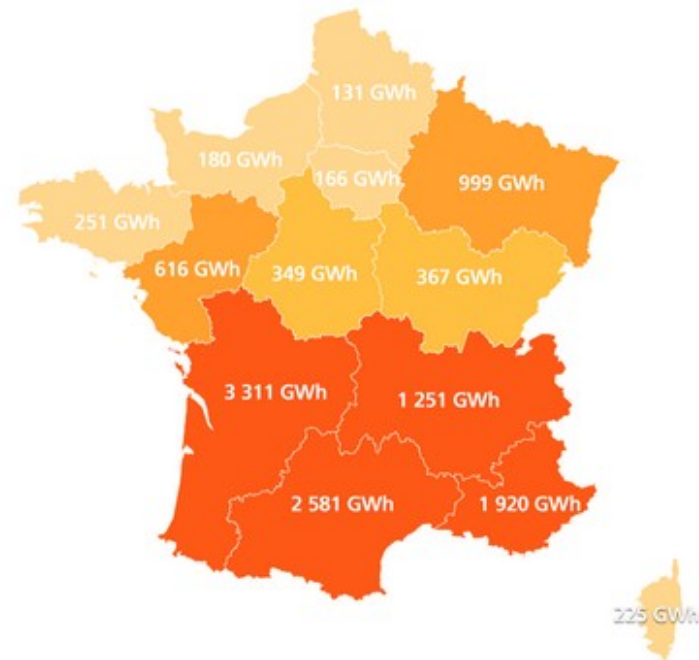
Eolien en France - Eolienne flottante du Croisic



- **Installée en 2018, puissance : 2MW**
- **Alimentation en électricité de 5000 habitants**
- **Avantages éolien flottant :**
 - **Pas de PB de profondeur → loin des côtes → plus de vent**
 - **Inconvénient : plus cher (110€/MWh vs 60€/Mwh pour le terrestre !)**

Le photovoltaïque en France

- **Capacité photovoltaïque raccordée au réseau : 9 400 MW (équivalent 10 réacteurs nucléaires)
60 % de la capacité éolienne
Croissance de 10,4 % vs 2018**
- **Prod. d'électricité : 11,6 TWh → 2 % de la prod. Nationale.
Croissance de 7,8 % vs 2018**
- **4 régions se partagent 80 % de la prod. nationale**
- **Centrale solaire de Cestas : 300 MW –
Conso annuelle domestique – hors chauffage – de Bordeaux (240 000 habitants)**



Solaire photovoltaïque : production par région en 2019

Source RTE - Bilan électrique 2019

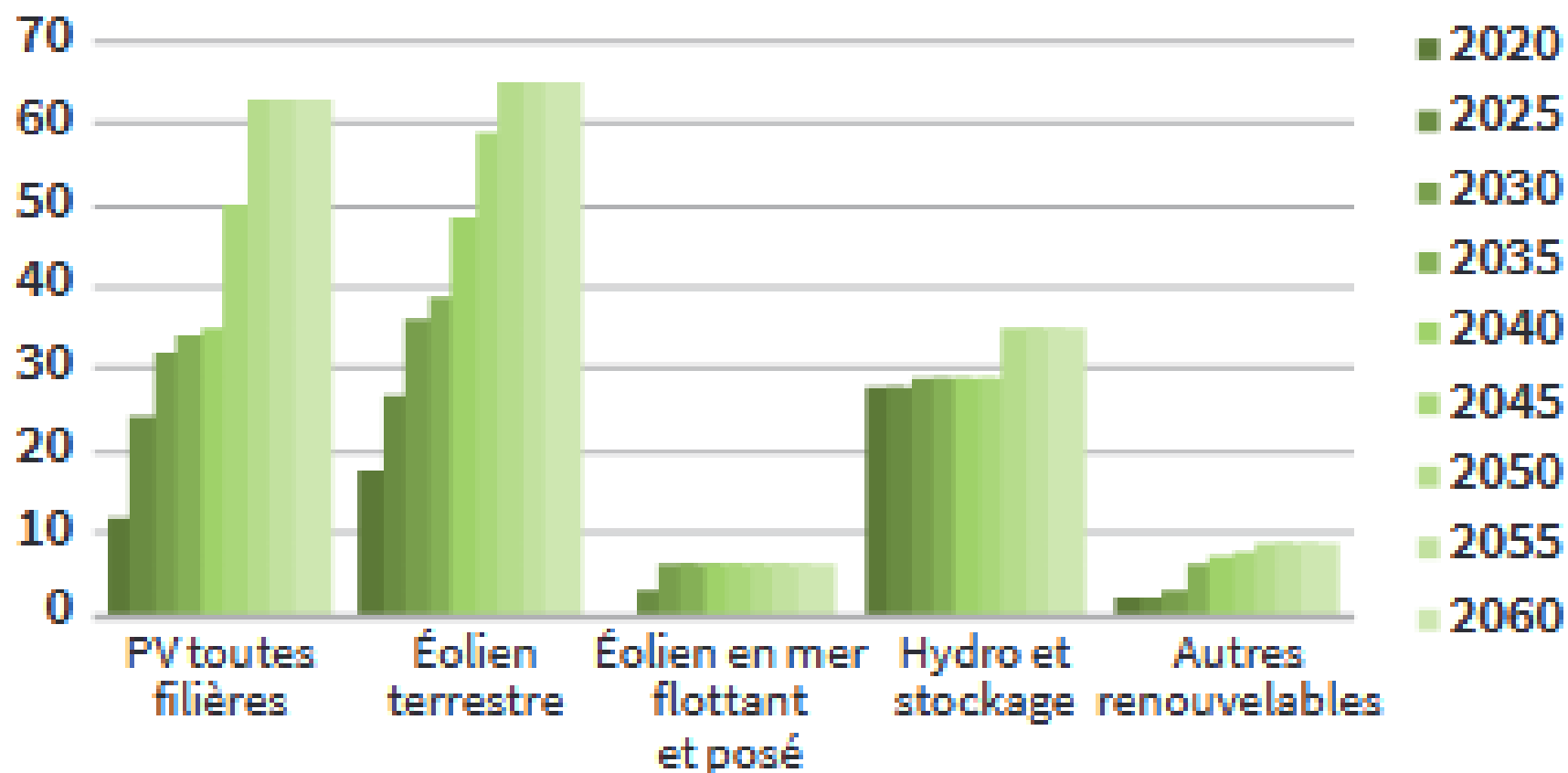
Trajectoire d'évolution du mix électrique 2020 - 2060 – Etude ADEME*

- **Objectif** : Optimisation économique entre 2020 et 2060 des sources d'énergie dans système électrique français, interconnecté avec voisins européens
- **Trajectoire retenue** (7 scénarii) : Mix ENR + nucléaire ; « **EPR en série** » (pas le plus économique)
- **Contexte : (Stratégie Nationale Bas Carbone 2050 (SNBC))** :
 - Diviser par 2 la consommation d'énergie
 - Réduction du nucléaire dans la prod. Électrique (50 % horizon à définir)
 - Forte croissance des ENR
 - Neutralité carbone en 2050
- **Hypothèse** : Demande électrique: entre 430 TWh et 600 TWh
- **Résultats** :
 - **ENR : 73 % en 2050** ; coût tendanciel dès 2030 : **50 MWh€**
 - **Nucléaire** : construction de **15 EPR d'ici 2035**
 - **Coût moyen sur la trajectoire: 104€ MWh (coût actuel 100€)**
 - **Coût total de la trajectoire : 1315 Mds€**
 - Bilan net des émissions en 2050 : **- 9 Mt CO²**

*https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2018/12/ADEME_%C3%A9tude_mix-electrique.pdf

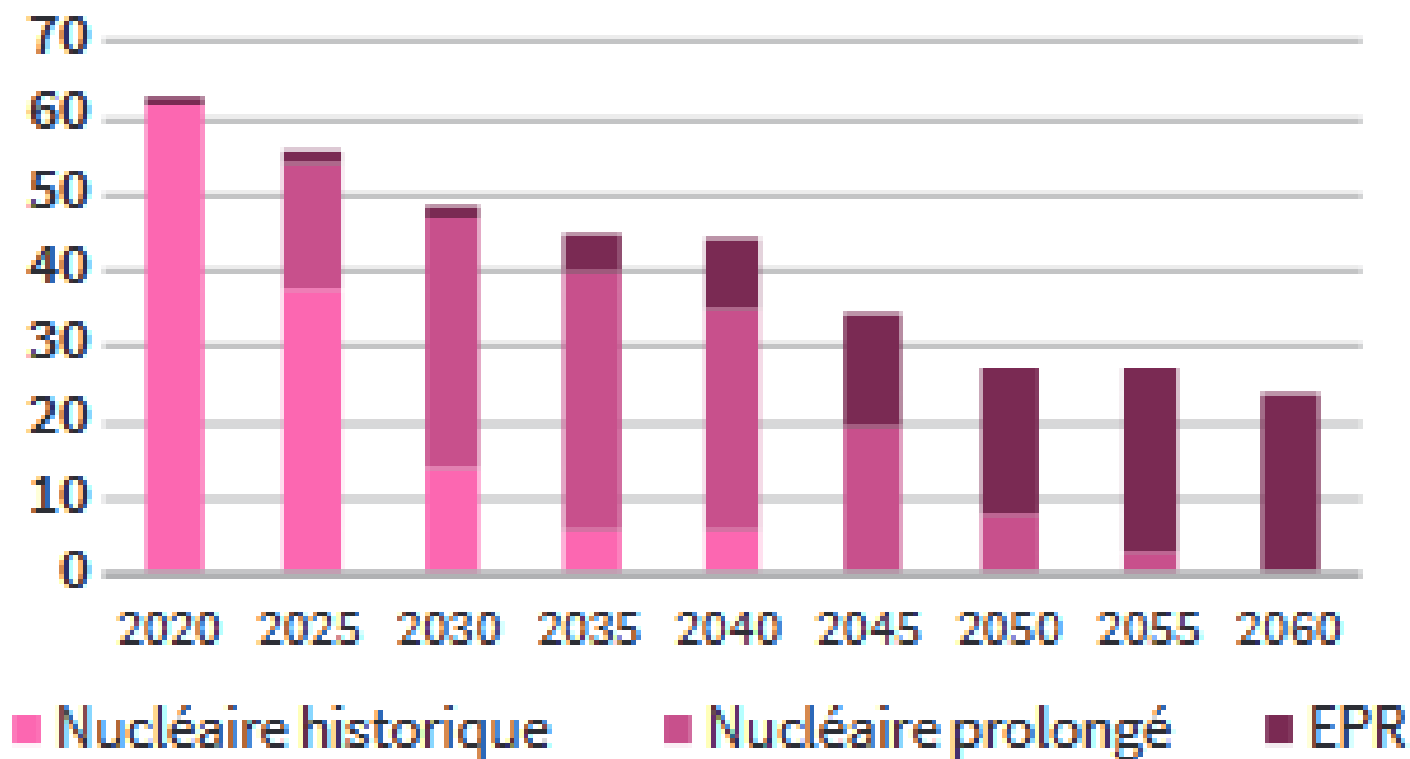
Etude ADEME – Trajectoire « EPR en série »

Capacités installées EnR et stockage (GW)



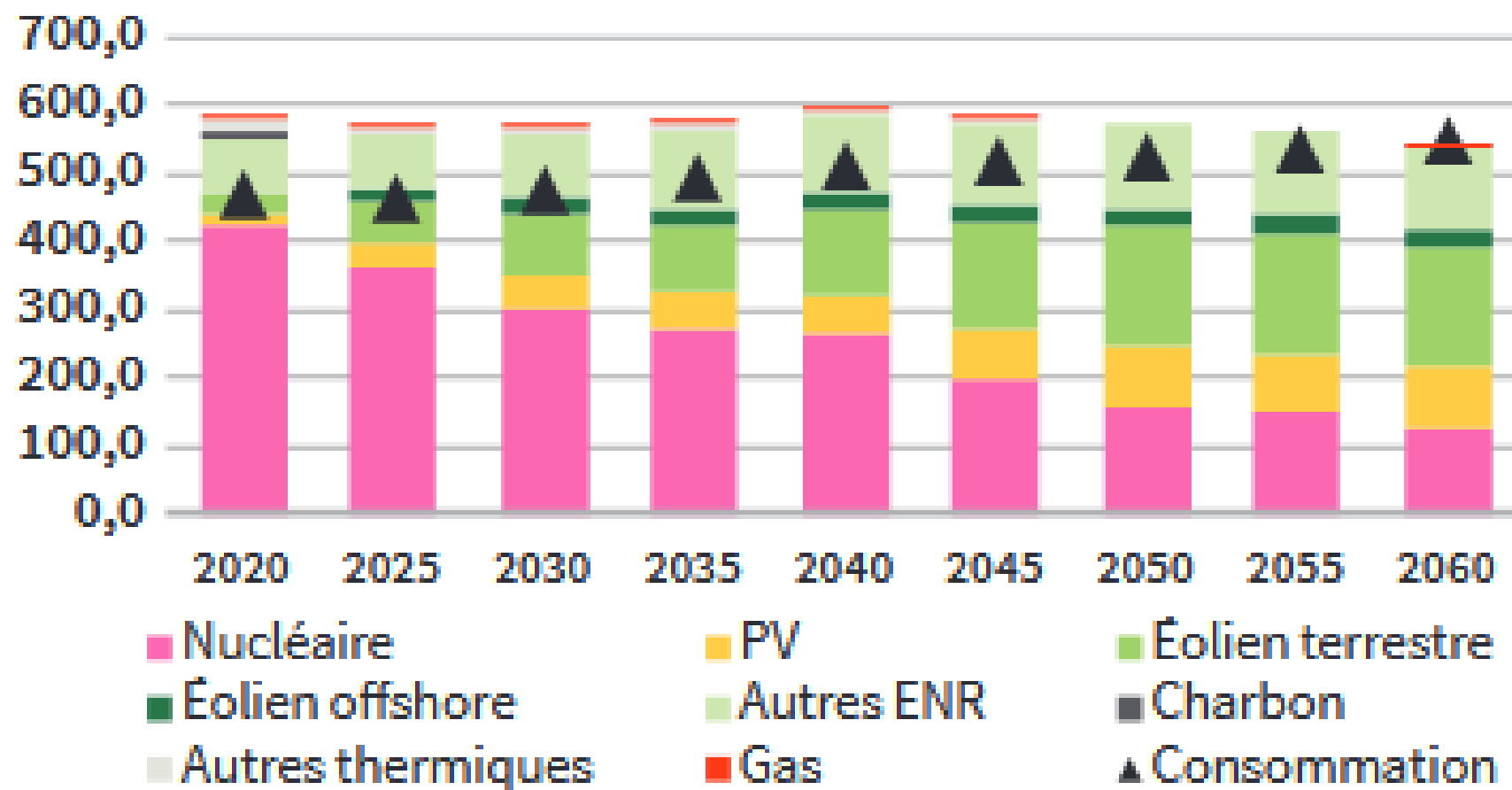
Etude ADEME – Trajectoire « EPR en série »

Capacités installées Nucléaire (GW)



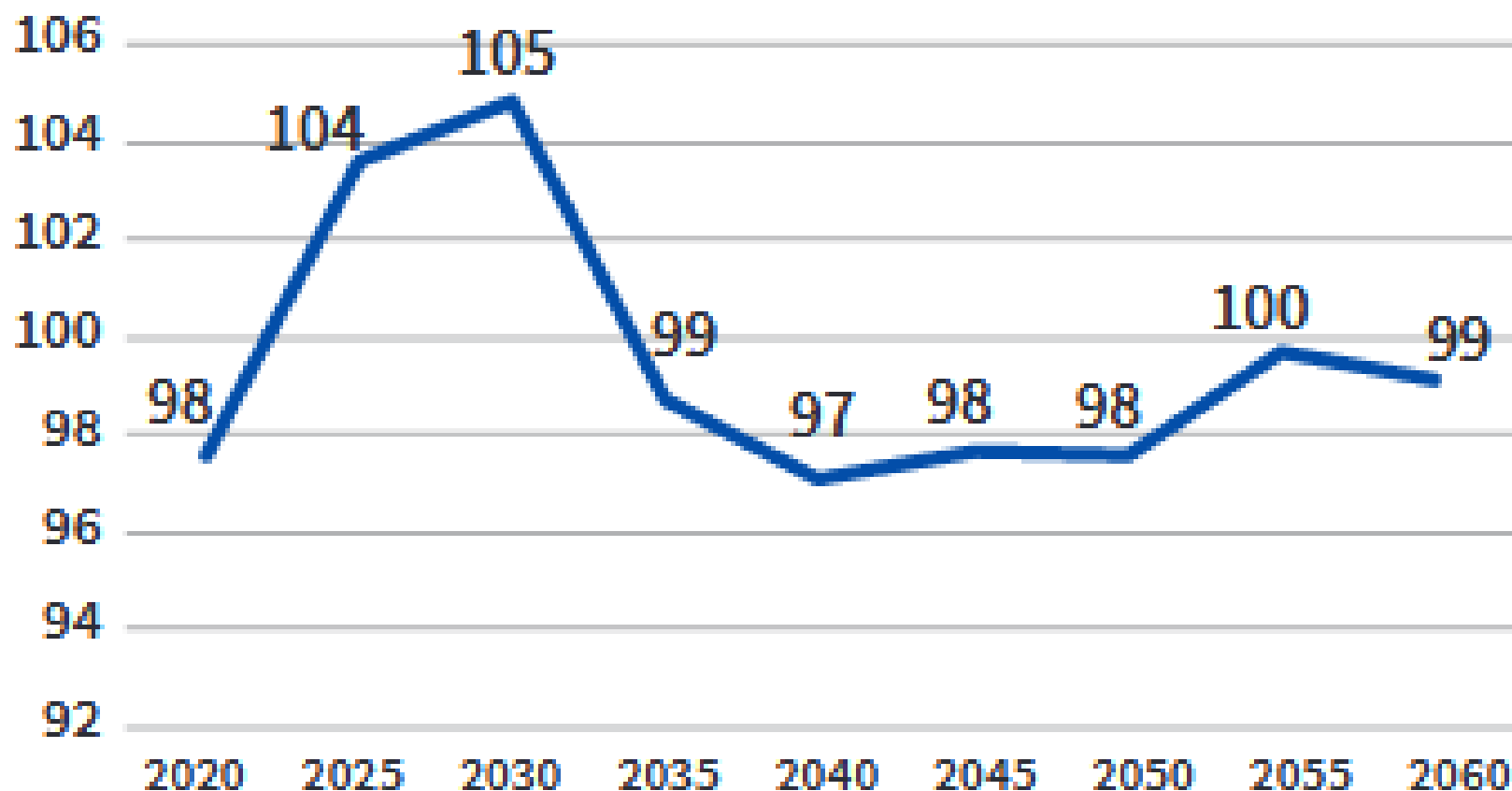
Etude ADEME – Trajectoire « EPR en série »

Mix de production en France (TWh)



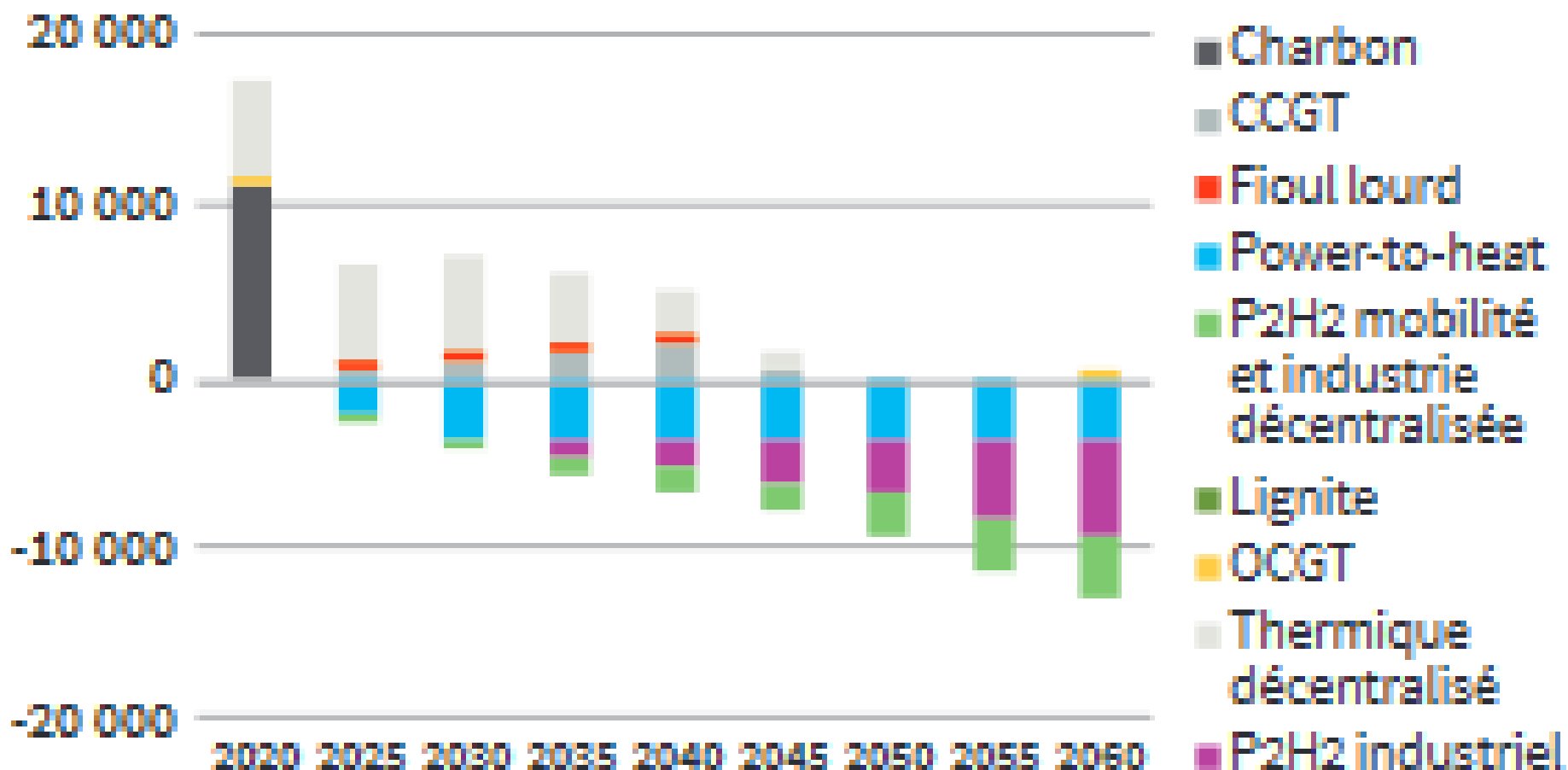
Etude ADEME – Trajectoire « EPR en série »

Coût total du système électrique par an (€/MWh)



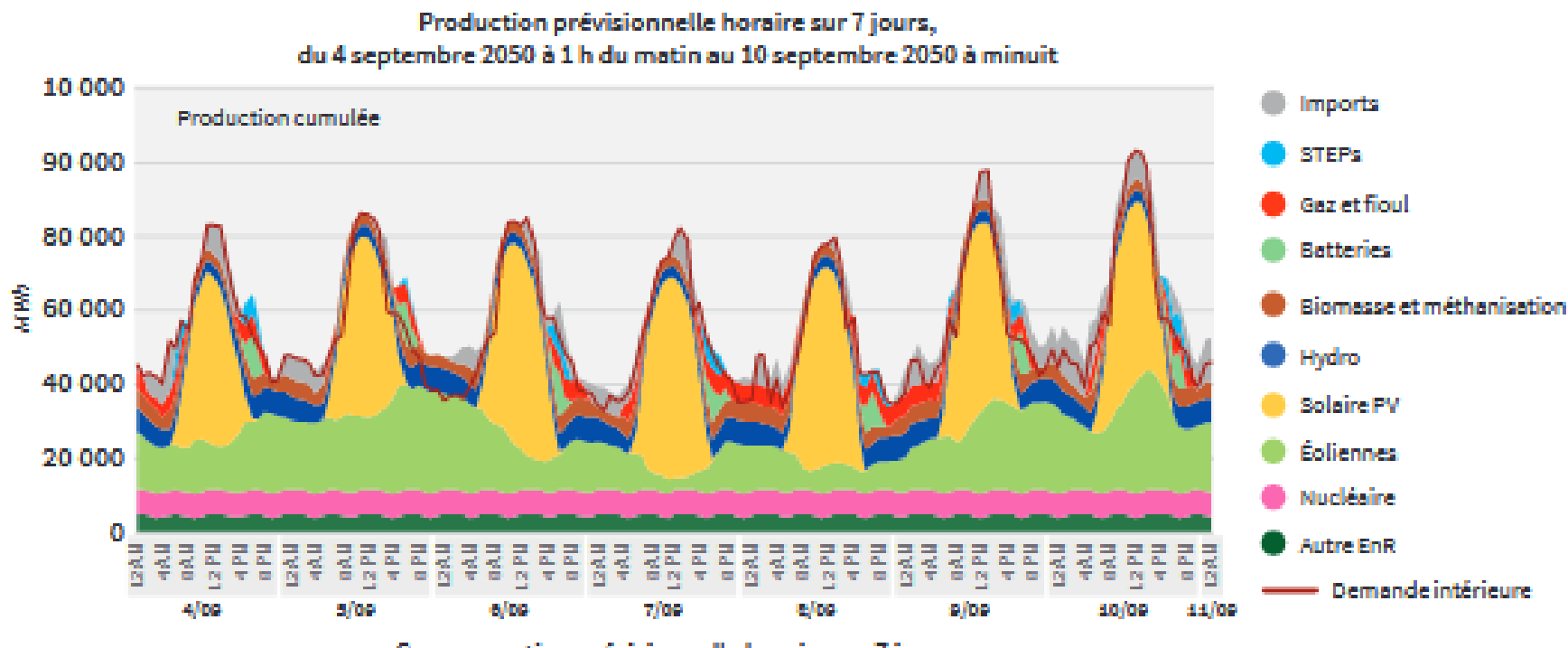
Etude ADEME – Trajectoire « EPR en série »

Émissions de CO₂ annuelles (kt/an)



Trajectoire d'évolution du mix électrique 2020 - 2050 – Etude ADEME*

FIGURE 7 : EXEMPLE DE RÉSULTAT DU MODÈLE SUR UNE SEMAINE D'HIVER 2050
(EN HAUT, L'APPEL DES DIFFÉRENTS MOYENS DE PRODUCTION ; EN BAS, LA DÉCOMPOSITION DE LA DEMANDE) ⁽²⁴⁾



Etude ADEME – Trajectoire de référence

- **Résultats :**
 - **Part ENR : 87 % en 2050** vs 73 % dans trajectoire « EPR en série »
 - **Nucléaire** : Zéro nucléaire en 2060
 - **Coût moyen sur la trajectoire: 96 € MWh** vs 104 € MWh
 - **Coût total de la trajectoire : 1277 Mds€** vs 1315 Mds€ - écart 38Mds€
 - **Bilan net des émissions en 2050 : – 3,3 Mt CO²** vs - 9 Mt CO²
 - Cf. Schémas annexes 8 à 13

Conditions pour l'intégration d'une proportion d'ENR élevée dans le réseau

1. Conserver la stabilité du système électrique

- Inertie des machines tournantes actuelles vers autres systèmes (convertisseurs spécifiques,...)

2. Assurer la sécurité d'alimentation en électricité

- Faire face à l'intermittence :
 - Nouvelles unités pilotables (hydrogène ou biogaz)
 - Installations de stockages dédiés grande échelle (batteries, STEP, hydrogène,...)
 - Réseaux intelligents (Smart-Grid)

3. Développer les réseaux de transport électriques

- D'ici 2030 → aménagements ; au-delà --> modifications en profondeur
- Adhésion des populations locales

Energies renouvelables (ENR)

Sources

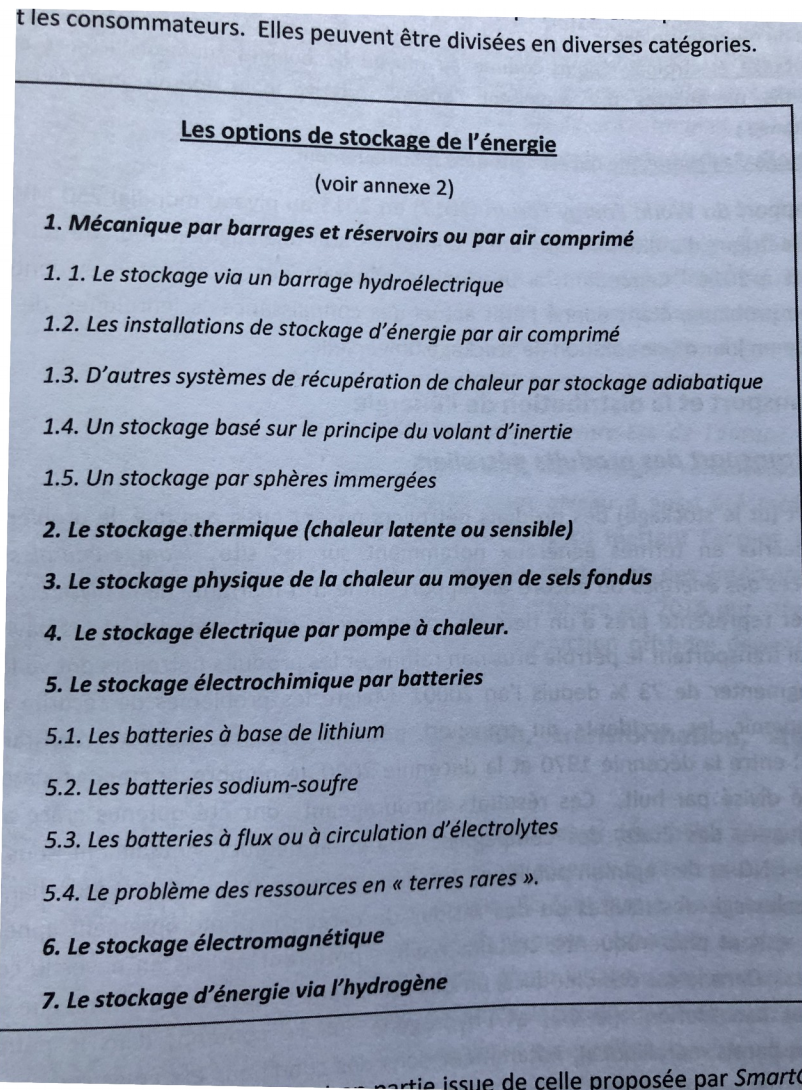
- https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2018/11/Chiffres-Clefs-du-Climat_2019.pdf
- https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2018/12/ADEME_%C3%A9tude_mix-electrique.pdf
- https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019_0.pdf
- **Les enjeux liés aux transitions énergétiques – Jacques de Gerlache**
- https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese%20ENR%20horizon%202050_FR.pdf

Annexe 1 – Liste des Energies renouvelables

 Energie solaire	 Énergie éolienne	 Énergies marines	 Énergie hydraulique	 Énergie géothermique	 Bioénergie
<i>Source:</i> soleil	<i>Source:</i> vent	<i>Source:</i> vagues, marées	<i>Source:</i> eau	<i>Source:</i> terre	<i>Source:</i> biomasse, déchets
<i>Technologies:</i> systèmes photovoltaïques, systèmes solaires thermiques	<i>Technologies:</i> éoliennes	<i>Technologies:</i> barrages marémoteurs	<i>Technologies:</i> centrales hydroélectriques	<i>Technologies:</i> géothermique et pompes à chaleur	<i>Technologies:</i> combustion de biomasse, usines de production de biogaz, biocarburants
<i>Applications:</i> électricité, chauffage et refroidissement	<i>Applications:</i> électricité	<i>Applications:</i> électricité	<i>Applications:</i> électricité	<i>Applications:</i> électricité, chauffage et refroidissement	<i>Applications:</i> électricité, chauffage et refroidissement, transports

Annexe 2 – Solutions de stockage –

source : *Les enjeux liés aux transitions énergétiques (2017) – J. de Gerlache



Annexe 3 – Principaux groupes industriels mondiaux

Principaux groupes industriels des énergies renouvelables en 2019¹⁴⁸

Groupe	Pays	Puissance installée en GW (hors hydroélectricité) fin 2019	Capitalisation boursière (milliards d'euros) au 25/11/2020
China Longyan Power	 Chine	20,5	6,2
Iberdrola	 Espagne	18,9	71,8
NextEra Energy	 États-Unis	17	127,9
Enel	 Italie	14,3	86,4
Huaneng Renewables	 Chine	12,1	non coté
EDP Renovaveis	 Portugal	11,4	15,2
Orsted	 Danemark	9,8	61,6
China Resources Power (Hong Kong)	 Chine	9,8	4,4
EDF	 France	9,8	36,7
Huadian Fuxin Energy (Hong Kong)	 Chine	9,4	2,3
China Datang Corporation	 Chine	9	1,1
RWE	 Allemagne	8,6	23,3
Engie	 France	7,3	30,8
Acciona	 Espagne	7,2	5,7
GCL New Energy (Hong Kong)	 Chine	7	0,3

Annexe 4 - Le Danemark – Champion des ENR

- **Répartition de l'énergie primaire (2019)**
 - **Combustibles fossiles : 57 %**
 - Pétrole : 36 %
 - Gaz naturel : 15 %
 - Charbon 6 %
 - **ENR : 40 %**
 - Biomasse : 30 %
 - Eolien – solaire : 9 %
- **Répartition de la production d'électricité :**
 - **Centrales thermiques : 18 %**
 - Charbon : 11 %
 - Gaz naturel : 6 %
 - **ENR : 79 %**
 - **Eoliennes : 55 %**
 - Biomasse : 23 %
 - Solaire : 3 %
- **Promotion des ENR depuis 30 ans**
- **Objectif 2050 pour la production d'électricité : 100 % ENR**

Annexe 5 - Aspects économiques (Externalités)

- **Externalités**

- Les ENR induisent des externalités (coûts supportés par personnes ou entités autres que producteurs)
 - **Etude EDF/Compass Lexecon 2014 sur transition énergétique.**

Conclusions :

- L'ajustement en temps réel offre/demande implique des besoins supplémentaires de flexibilité et de réserves
- Les réseaux doivent être renforcés pour l'acheminement des ENR
- Il existe des pertes de production lorsque celle des ENR dépassera la demande (existe déjà au Danemark et en Allemagne)
- Pour une pénétration des ENR de 10 à 15 %:
 - » Coûts d'insertion :
Eolien : 10 €/MWh Solaire : 25 €/MWh



Annexe 6 - Aspects économiques

- **Coûts (suite)**

- Etude IRENA 2019* sur 17 000 projets et 9 000 Appels d'offres :
 - « 77% des projets éoliens et 83 % des projets de centrales photovoltaïques seraient moins coûteux que les projets les moins chers de combustibles fossiles et ce sans aide financière »
- Compte tenu de l'intermittence, les ENR demeurent, pour l'instant, complémentaires des énergies fossiles ou nucléaire
 - *ajouter coûts de stockage ou coûts de sources de secours.*
 - *Nécessité d'établir un bilan économique global de la solution énergétique en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie*

* <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019/>

Annexe 7 - Aspects économiques

Effets sur les prix

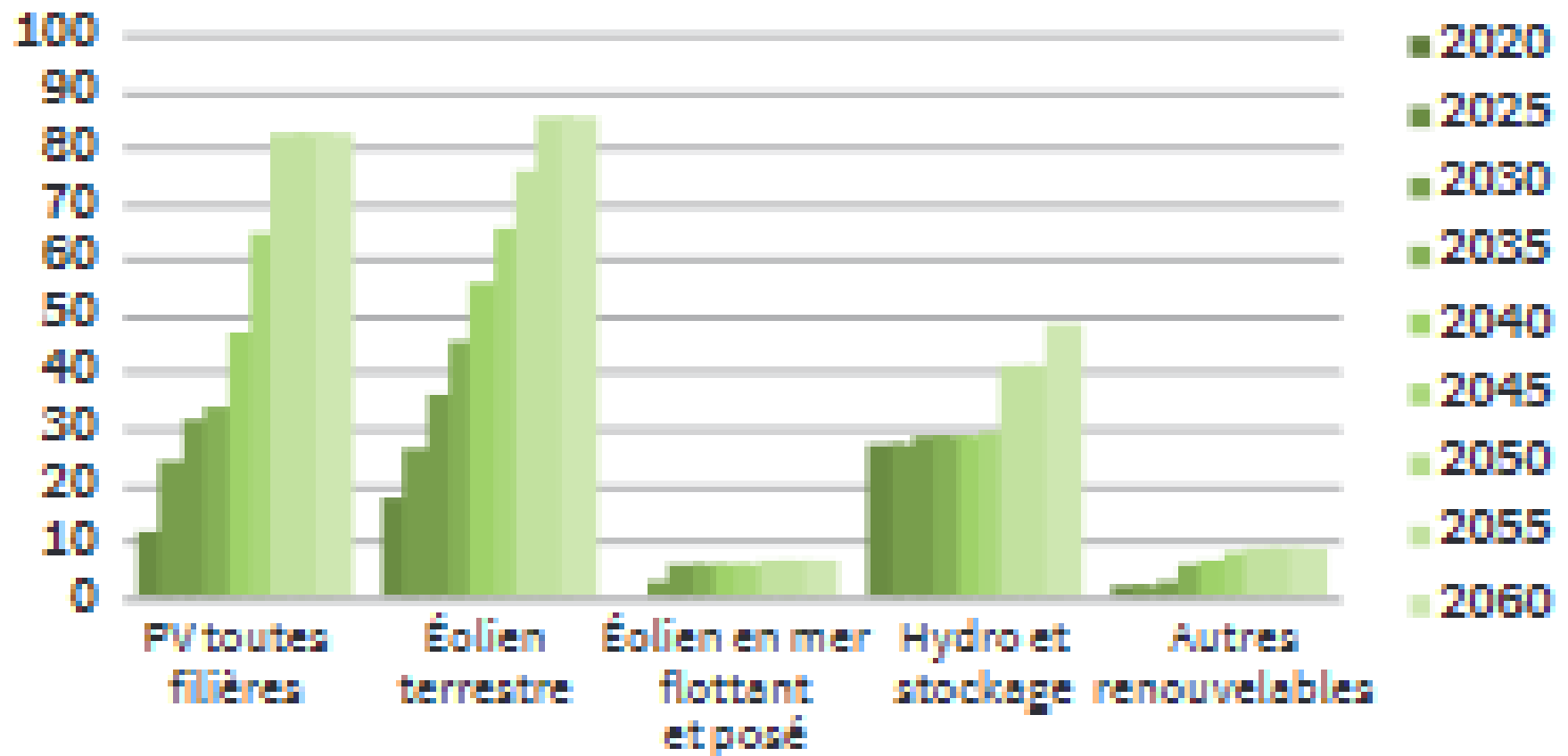
- **Effets sur les prix des marchés**

Lors de périodes de faible demande, les prix de l'électricité sur les marchés de gros peuvent devenir négatifs.

- Exemple : avril 2020 ; température clémente + confinement :
→ **prix devenus négatifs en France et autres pays européens.**
- **Cet aspect va s'accroître avec les ENR** → faible demande + surproduction ENR
 - En Allemagne de + en + fréquent :
 - 2018 : 134 périodes de prix négatifs
 - 2020 : 211

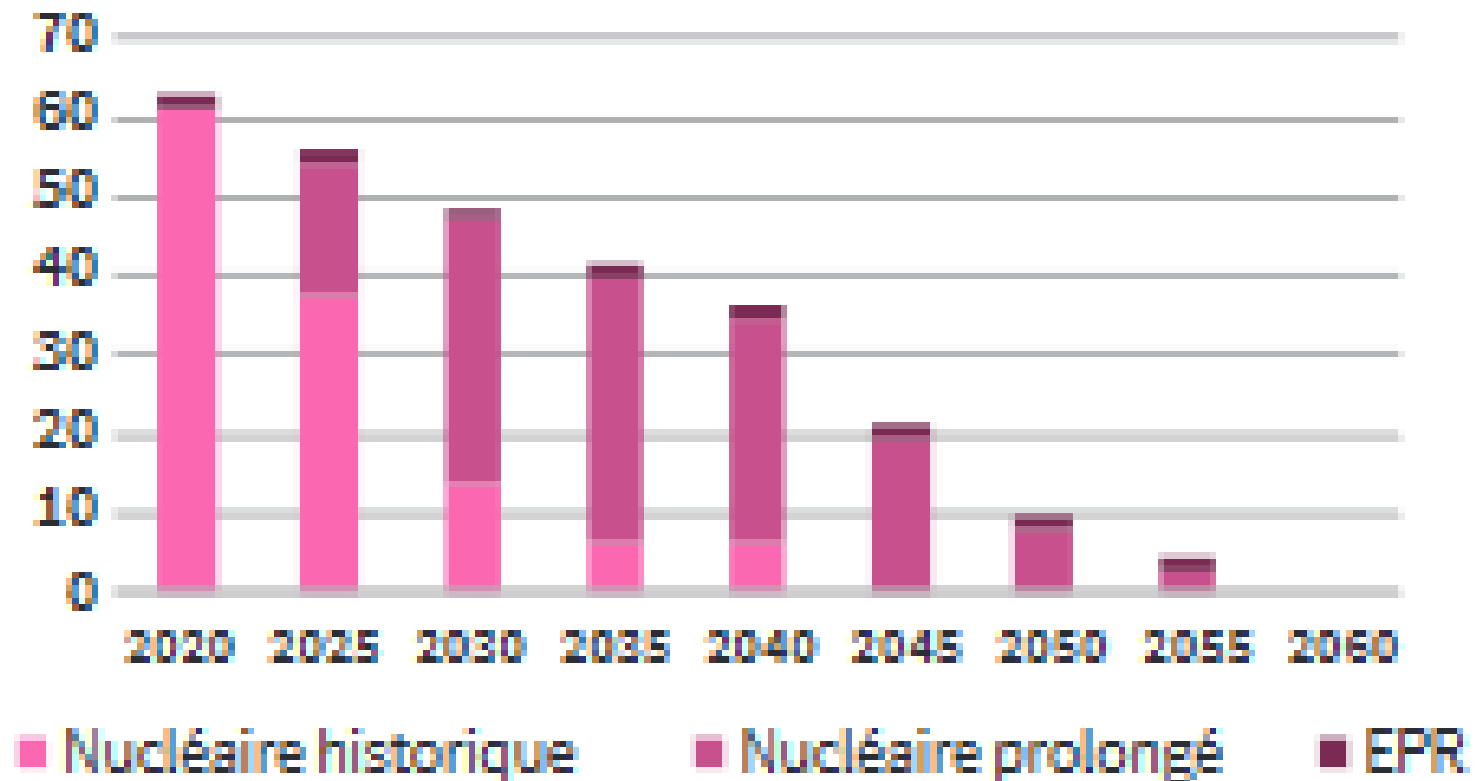
Annexe 8 - Etude ADEME – Trajectoire de référence

Capacités installées EnR et stockage (GW)



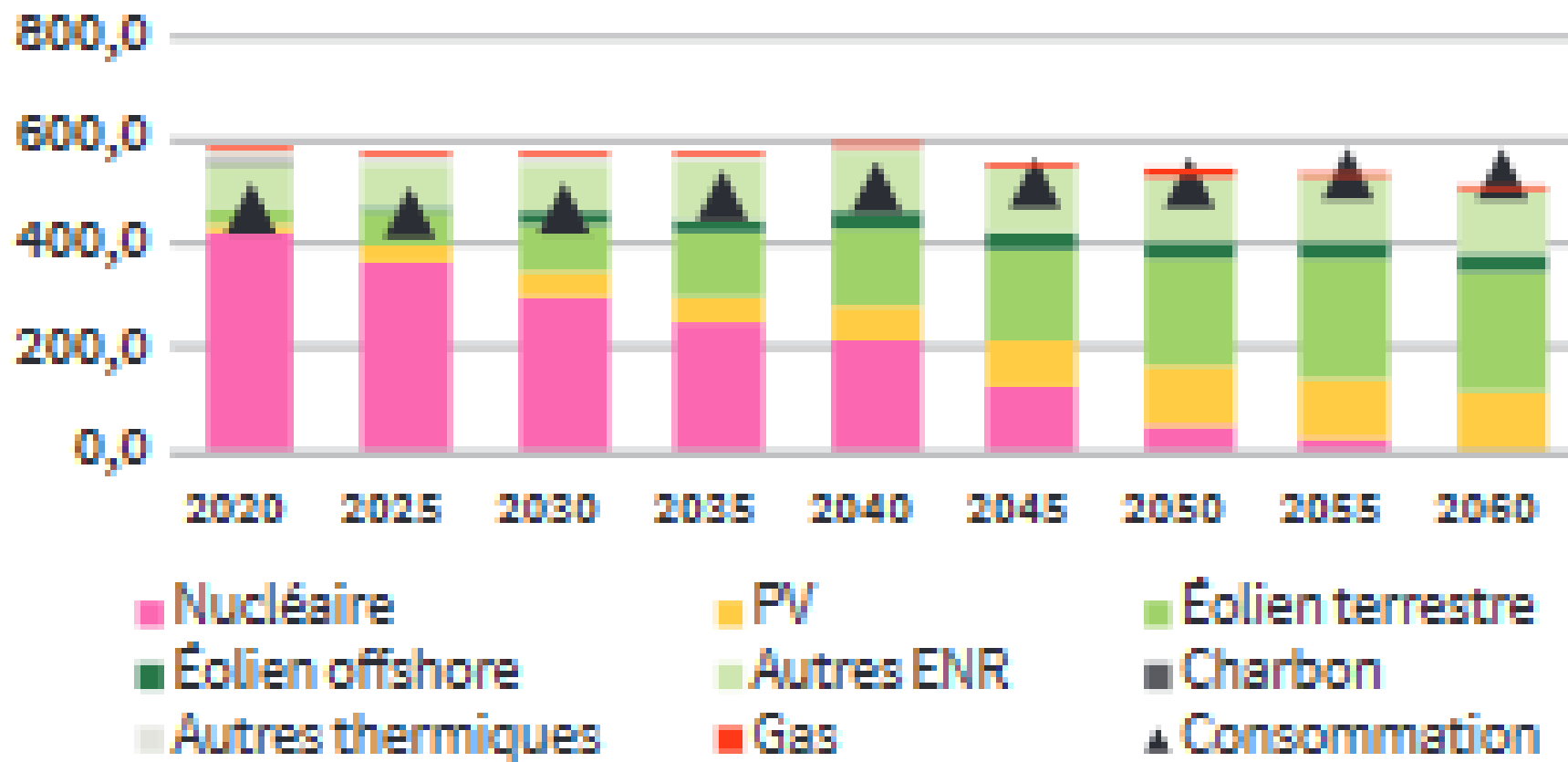
Annexe 9 - Etude ADEME – Trajectoire de référence

Capacités installées Nucléaire (GW)



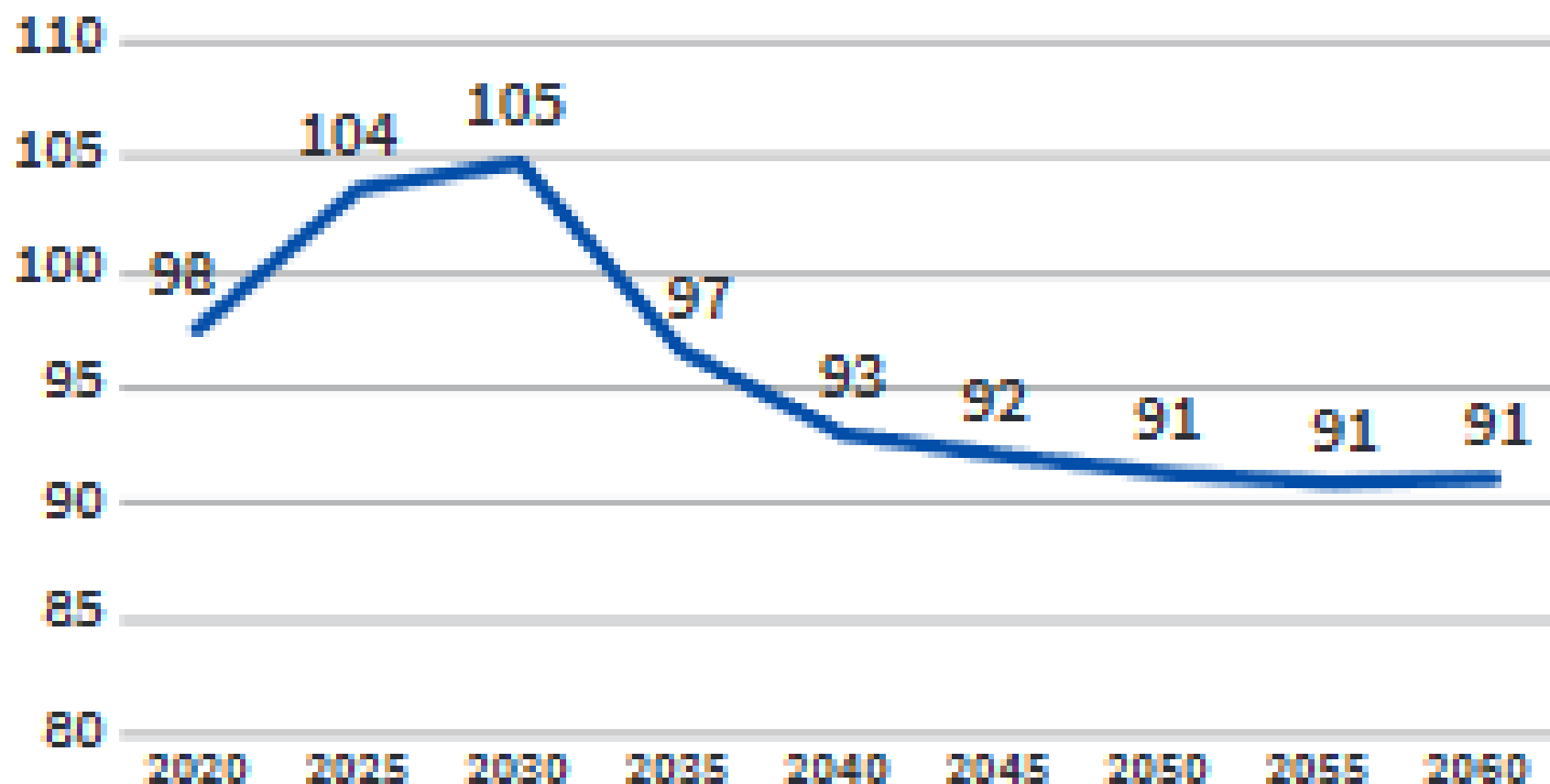
Annexe 10 - Etude ADEME – Trajectoire de référence

Mix de production en France (TWh)



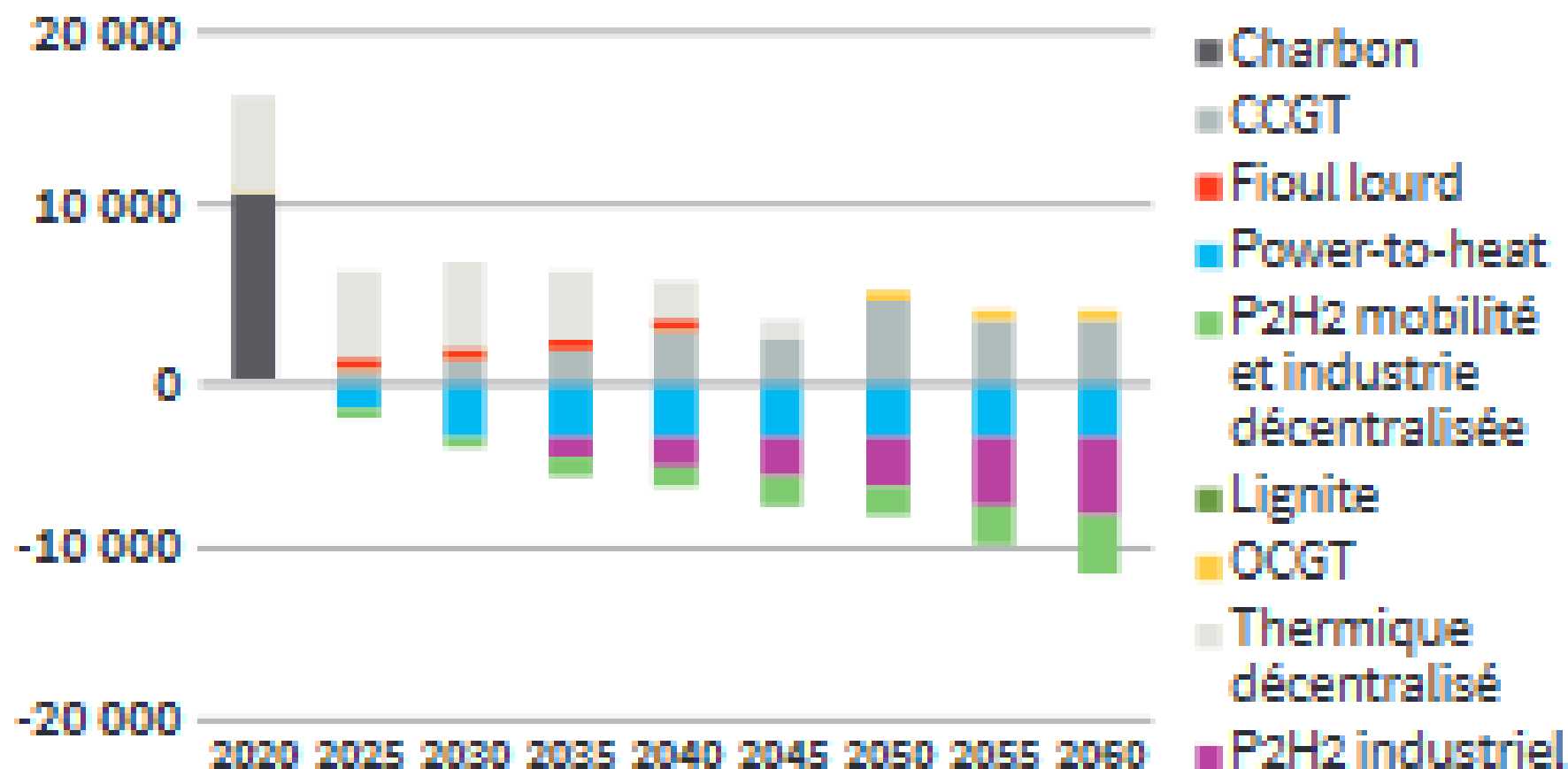
Annexe 11 - Etude ADEME – Trajectoire de référence

Coût total du système électrique par an (€/MWh)



Annexe 13 - Etude ADEME – Trajectoire de référence

Émissions de CO₂ annuelles (kt/an)



Annexe 14 - Les objectifs de la transition énergétique française

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.
- Réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030.
- Diminuer de 30 % la consommation primaire d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012.
- Porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030.
- Réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % (horizon à préciser).
- Diminuer de 50 % le volume de déchets mis en décharge à l'horizon 2050.
- Atteindre une valeur de la tonne carbone de 56 euros en 2020 et de 100 euros en 2023.