



Marc FONTECAVE

CHAIRE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

La transition énergétique :
aujourd'hui et demain (III)

5 nov. > 17 déc. 2025



COLLOQUE
Mercredi 14 janvier 2026

Vivre avec
le climat qui change :
enjeux et perspectives
de l'adaptation

PROGRAMME

Amphithéâtre Maurice Halbwachs

| | | | |
|-------|---|-------|---|
| 9h | Accueil Marc Fontecave (Professeur au Collège de France) | 14h | Changement climatique et résilience du système électrique français Philippe Drobinski (Directeur de recherche CNRS et Professeur à l'Ecole polytechnique - Laboratoire de Météorologie Dynamique-IPSL & Directeur du centre interdisciplinaire Energy4Climate, Palaiseau) |
| 9h15 | Vulnérabilités et risques climatiques : trajectoires intégrant atténuation, adaptation, limites à l'adaptation et soutenabilité Valérie Masson-Delmotte (Directrice de Recherches CEA, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, responsable du Centre Climat Société de l'Institut Pierre Simon Laplace, Paris Saclay) | 14h30 | Comment construire des stratégies d'adaptation pour l'agriculture ? Enseignements des recherches sur la vigne et le vin Jean Marc Touzard (Directeur de recherche INRAE, économiste de l'innovation et de l'adaptation au changement climatique, UMR Innovation, Montpellier) |
| 9h45 | La ville à l'épreuve des altérations de ses écosystèmes microbiens sous l'effet des changements climatiques Philippe Sansonetti (Professeur honoraire, Collège de France, Paris) | 15h00 | Évolution de l'enveloppe du bâtiment pour s'adapter au changement climatique, enjeux et perspectives dans le secteur résidentiel Johann Meulemans (R&D group leader, Saint-Gobain Research Paris, Aubervilliers, France) |
| 10h15 | La mortalité associée à la chaleur : évaluations épidémiologique et économique. François Lévéque (Professeur, Mines Paris-PSL) | 15h30 | Pause |
| 10h45 | Pause | 15h45 | Pour une adaptation des territoires au changement climatique fondée sur les écosystèmes et leur biodiversité Sandra Lavorel (Directrice de Recherche CNRS, Laboratoire d'Ecologie Alpine, Université Grenoble Alpes, Grenoble) |
| 11h | Comment adapter nos villes aux impacts du changement climatique ? Vincent Viguié (Chercheur en économie du climat au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris) | 16h15 | L'adaptation et la résilience : un défi pour le développement Stéphane Hallegatte (Économiste en Chef pour le Climat à la Banque Mondiale, Washington DC) |
| 11h30 | EDF et les enjeux industriels de l'évolution du climat dans le système électrique Bernard Salha (Directeur Technique Groupe, Directeur de la Recherche et Développement, EDF, Paris) | 16h45 | Quels messages généraux sur l'adaptation au changement climatique ? Matthieu Glachant (Professeur d'économie, Mines Paris-PSL) |
| 12h | Pause déjeuner | 17h15 | Discussion |
| | | 17h30 | Fin |



Perspectives françaises: La Programmation Pluriannuelle de l'énergie

Marc FONTECAVE

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



Autres combustibles électriques: e-ammoniac, e-kérosène,..

Marc FONTECAVE

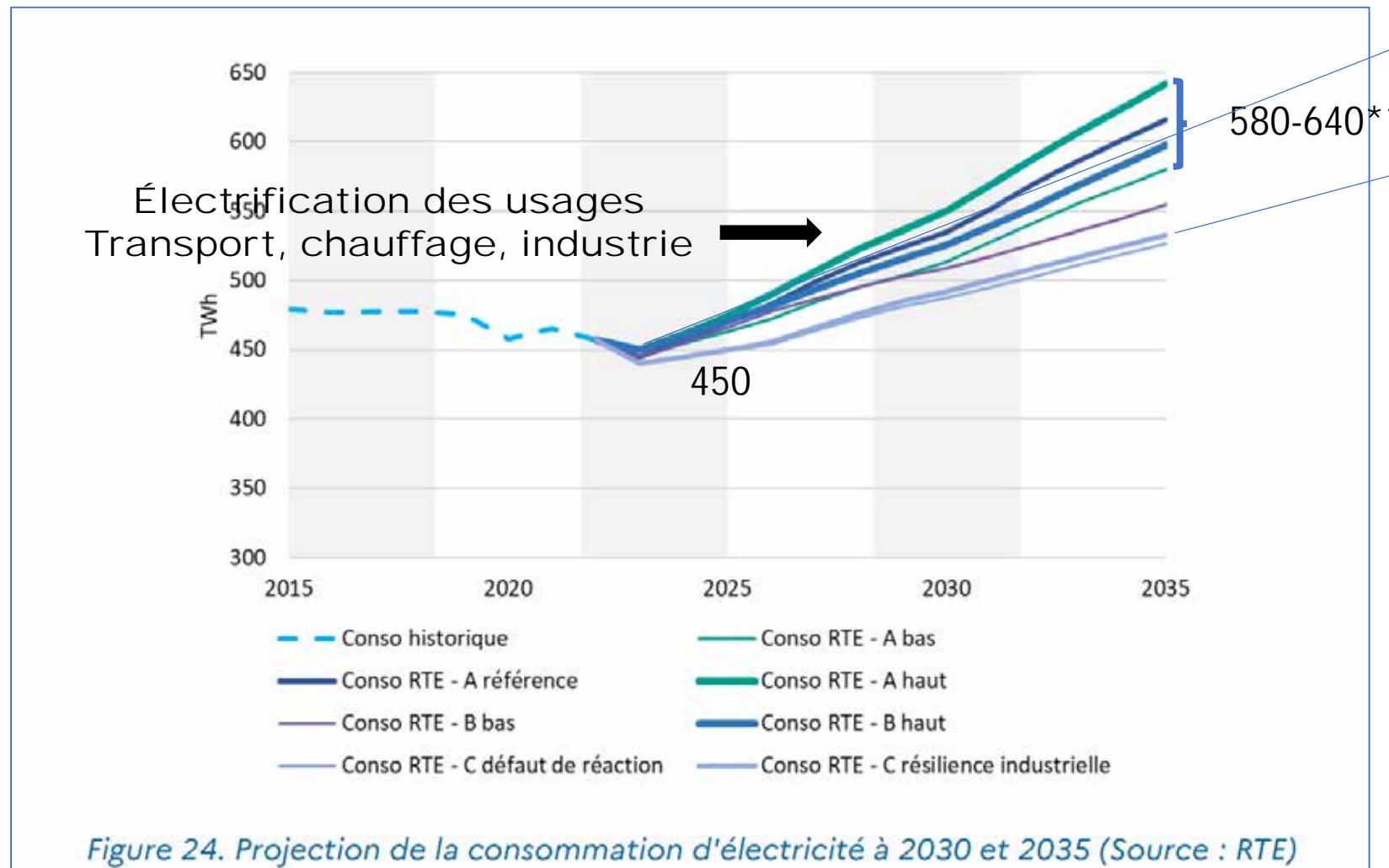
*Professeur au Collège de France
Président du Comité de Prospective en Energie
(Académie des Sciences)*

SÉMINAIRE :

Daniel Iracane, Membre de l'Académie des technologies
« Défossiliser l'économie : le cas particulier de l'aviation et du
transport maritime »

SCENARIOS 2035-2050 (France)?

La consommation électrique dans le texte de la PPE3
février 2025



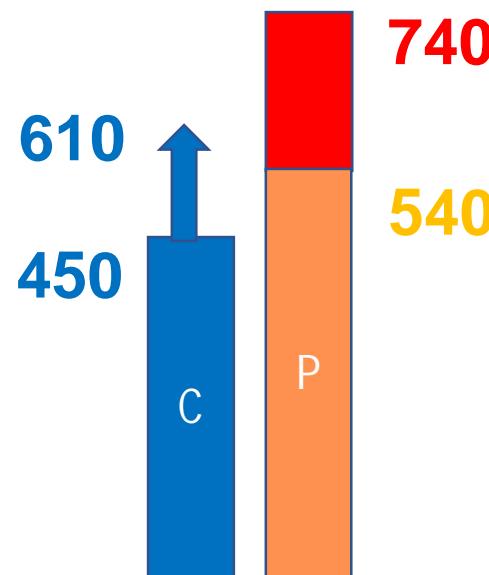
*RTE scénario 2021
(scénario de référence)

**RTE scénario 2023

Bilan prévisionnel

LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

La production électrique dans le texte de la PPE3
février 2025



Socle nucléaire

2035 : 60 GW-360-400 TWh

Socle hydroélectrique

2035 : 29 GW-54 TWh

Installation massive de capacités d'ENRs (intermittentes)

Eolien en mer: 0,65 GW- 2 TWh (2023) > 18 GW-71 TWh (2035)

Eolien sur terre: 22 GW-49 TWh (2023) > 40-45 GW-91-103 TWh (2035)

PV: 19 GW-23 TWh (2023) > 65-90 GW GW-92-110 TWh (2035)

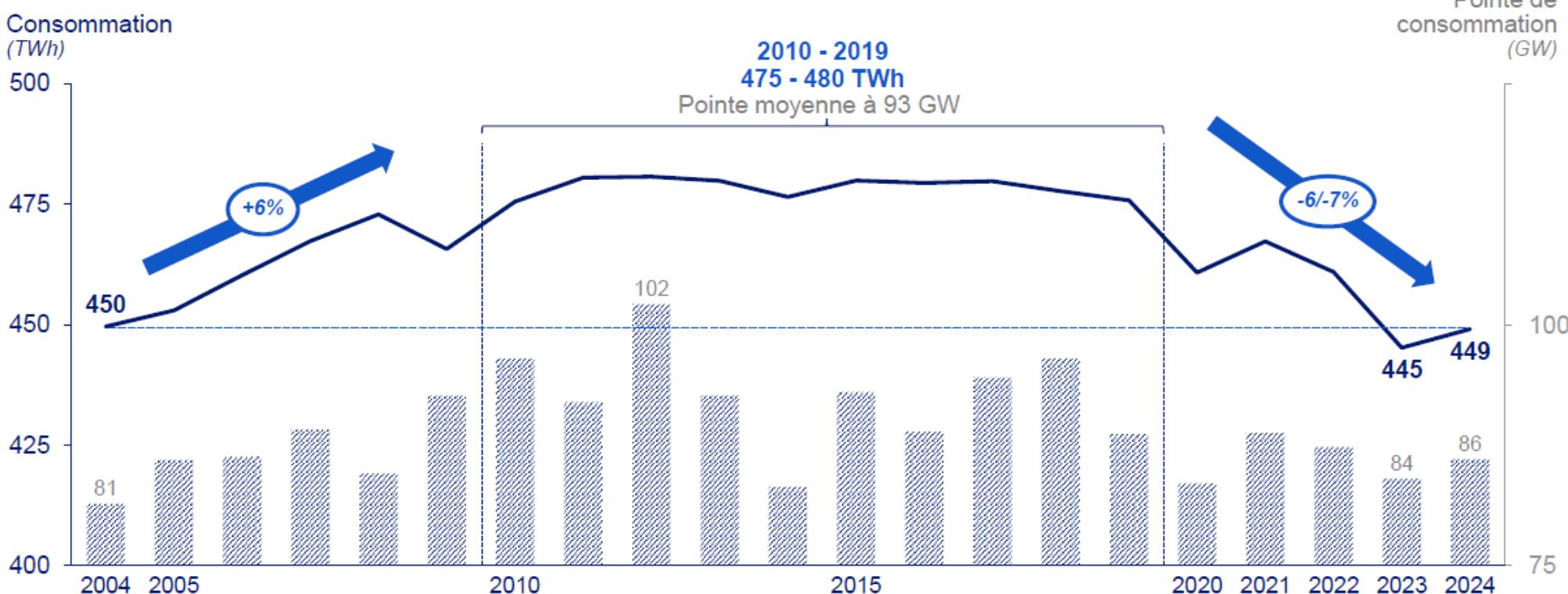
Total: 75 > 270 (255-285) TWh (total 125-150 GW)

CONSOMMATION ELECTRIQUE EN HAUSSE ?

Franc
e

Evolution de la consommation corrigée d'électricité et de la pointe de consommation
France, 2004-2024

Source : RTE, bilan électrique 2024



- Ø Amélioration de l'efficacité énergétique des convertisseurs d'énergie
- Ø Prix de l'électricité à la hausse
- Ø Baisse de la demande (économies d'énergie: sobriété)
- Ø Désindustrialisation/délocalisations
- Ø Électrification des usages plus difficile que prévu

Nouveau scénario RTE : bilan prévisionnel 2025-2035



Les Echos Entreprises&Marchés

La France revoit à la baisse ses scénarios de consommation électrique

ÉNERGIE

Amélie Laurin

Le secret de Polichinelle sera très bientôt rendu public. La France anticipe une consommation électrique moins forte qu'envisagé pour

Cette nouvelle borne haute était il y a deux ans le plancher du scénario le plus optimiste parmi les trois présentés par RTE dans la fourchette de 525-640 TWh. L'entreprise codétenu par EDF, la Caisse des Dépôts et CNP Assurances prônait alors un quadruplement de la production d'électricité solaire et éolienne. Pour



Nouveau scénario RTE : bilan prévisionnel 2025-2035

Nécessité de se préparer au cas où l'électrification et la réindustrialisation prendraient beaucoup de retard

BP 2023

Scénario A : « Accélération réussie »

Scénario de référence pour l'atteinte des objectifs climatiques

BP 2025

Scénario A actualisé :
« Accélération réussie »,
actualisé en cohérence avec les dernières informations



Décarbonation rapide
atteinte des objectifs publics

La France atteint les objectifs du Fit for 55 et réussit son redressement économique et industriel (PIB +1,1%/an et légère hausse de la part de l'industrie)

Scénario B : « atteinte partielle »

Scénario intégrant un retard d'électrification mais également un retard de développement de la production



Pas de modifications de ces scénarios

Scénario C : Mondialisation contrariée

Scénario reposant sur une croissance économique faible à long terme et des prix des commodities élevés



Nouveauté

Scénario D : faible augmentation de la consommation, basée sur une analyse des tendances récentes



Décarbonation lente
non atteinte des objectifs publics

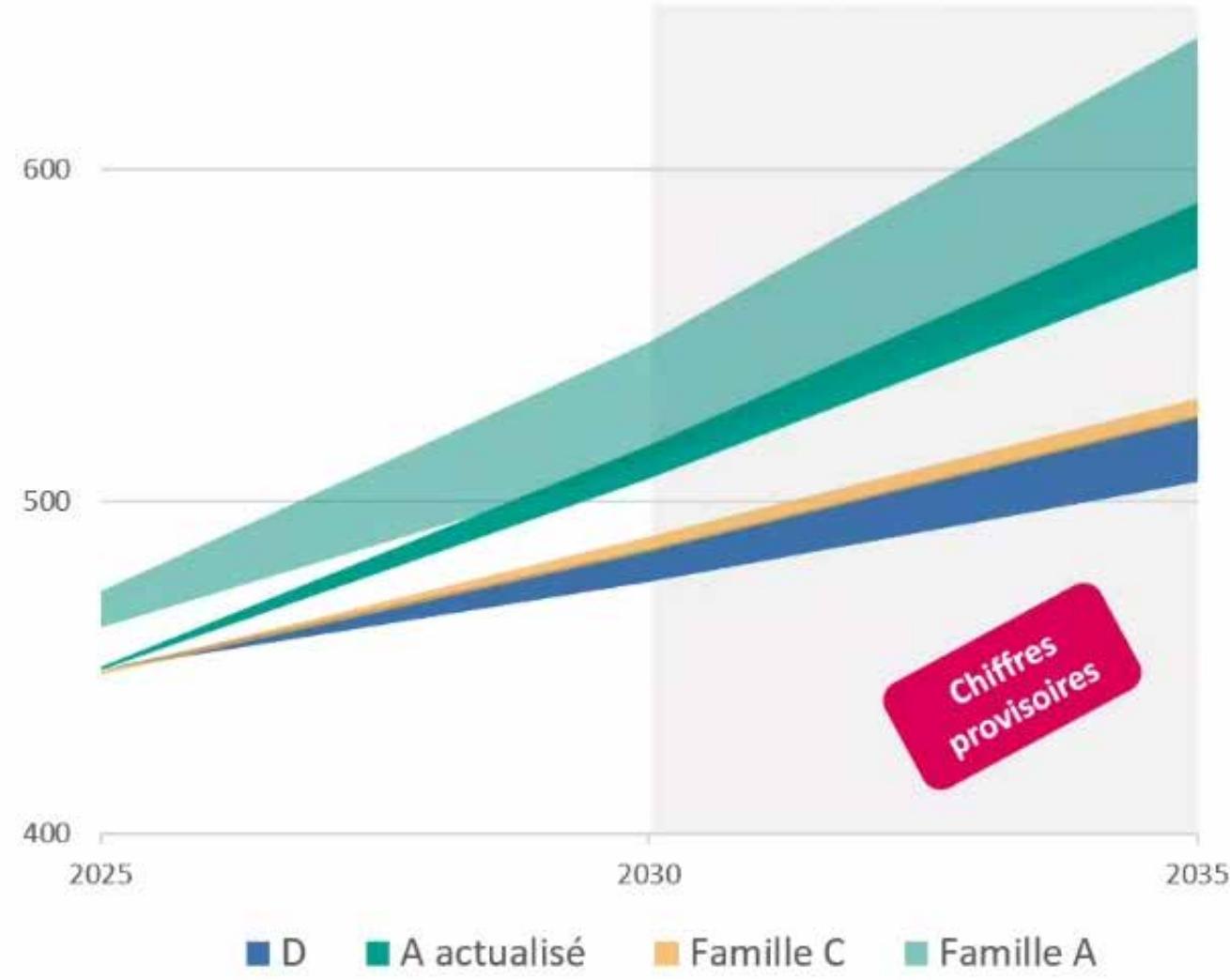
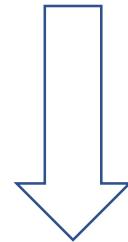
La consommation française suit une trajectoire non compatible avec les objectifs climatiques, dans un contexte économique dégradé (PIB +0,6%/an et baisse de la part de l'industrie)

HYPOTHESES (CONSOMMATION ÉLECTRIQUE)

Trajectoires de consommation (TWh)

Nouvelles dynamiques

- Ø Économies d'énergie persistantes
- Ø Perspectives moins favorables pour l'industrie
- Ø Électrification des usages ralentie



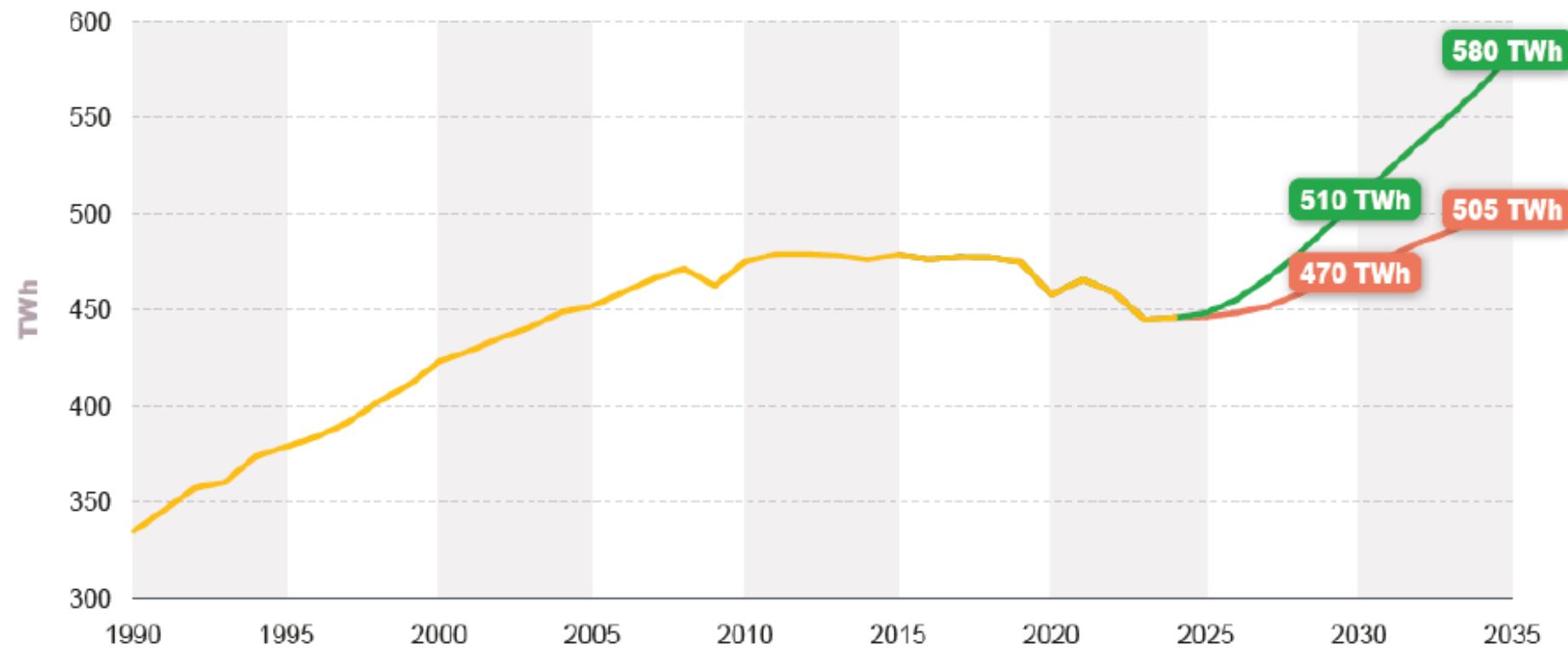
- Ø **Scénario A « actualisé »:** consommation dans le bas du cône des scénarios A du BP 2023

580 TWh

- Ø **Scénario D:** en dessous du cône des scénarios C du BP2023

505 TWh

HYPOTHESES (CONSOMMATION ÉLECTRIQUE)



2. Le Bilan prévisionnel 2025 intègre des trajectoires de consommation contrastées pour tenir compte de l'incertitude sur l'électrification effective du pays

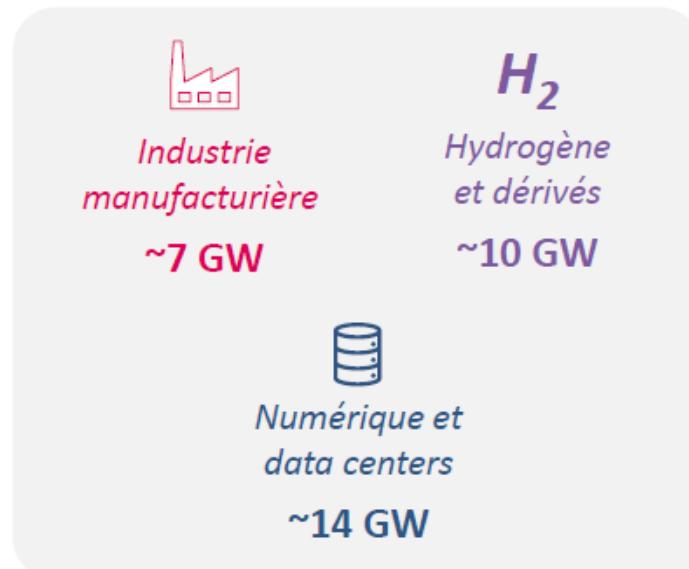
Il existe donc un large écart entre la tendance actuelle d'une part, et la situation souhaitée et compatible avec les projets d'électrification existants en France d'autre part – qui devrait conduire

à une augmentation du taux d'électrification mais également du volume d'électricité consommée et d'une baisse importante des quantités de gaz et de pétrole importée en France.

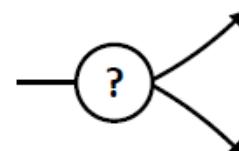
HYPOTHESES (CONSOMMATION ÉLECTRIQUE)

De nombreux projets industriels ont déjà sécurisé leur accès au réseau pour les prochaines années

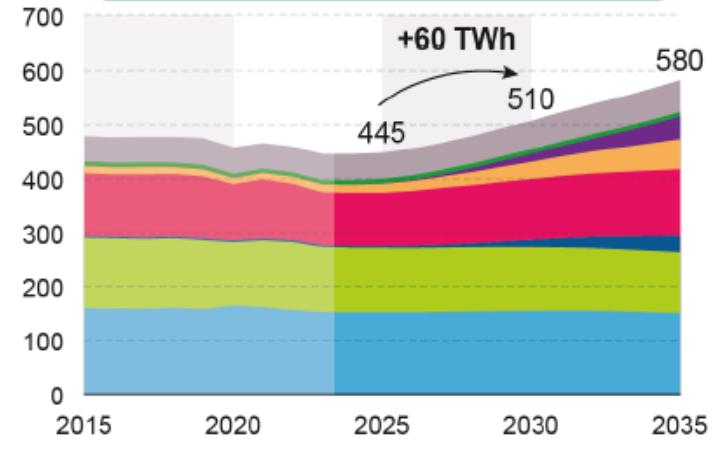
~30 GW
de capacités d'accès
au réseau de transport réservées



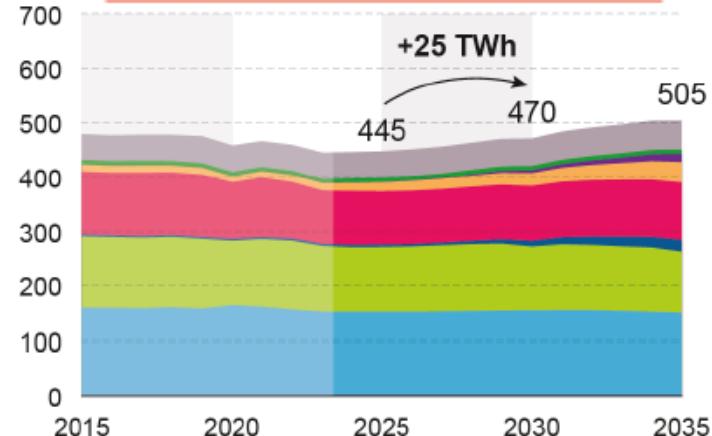
+ des volumes également importants sur les réseaux de distribution



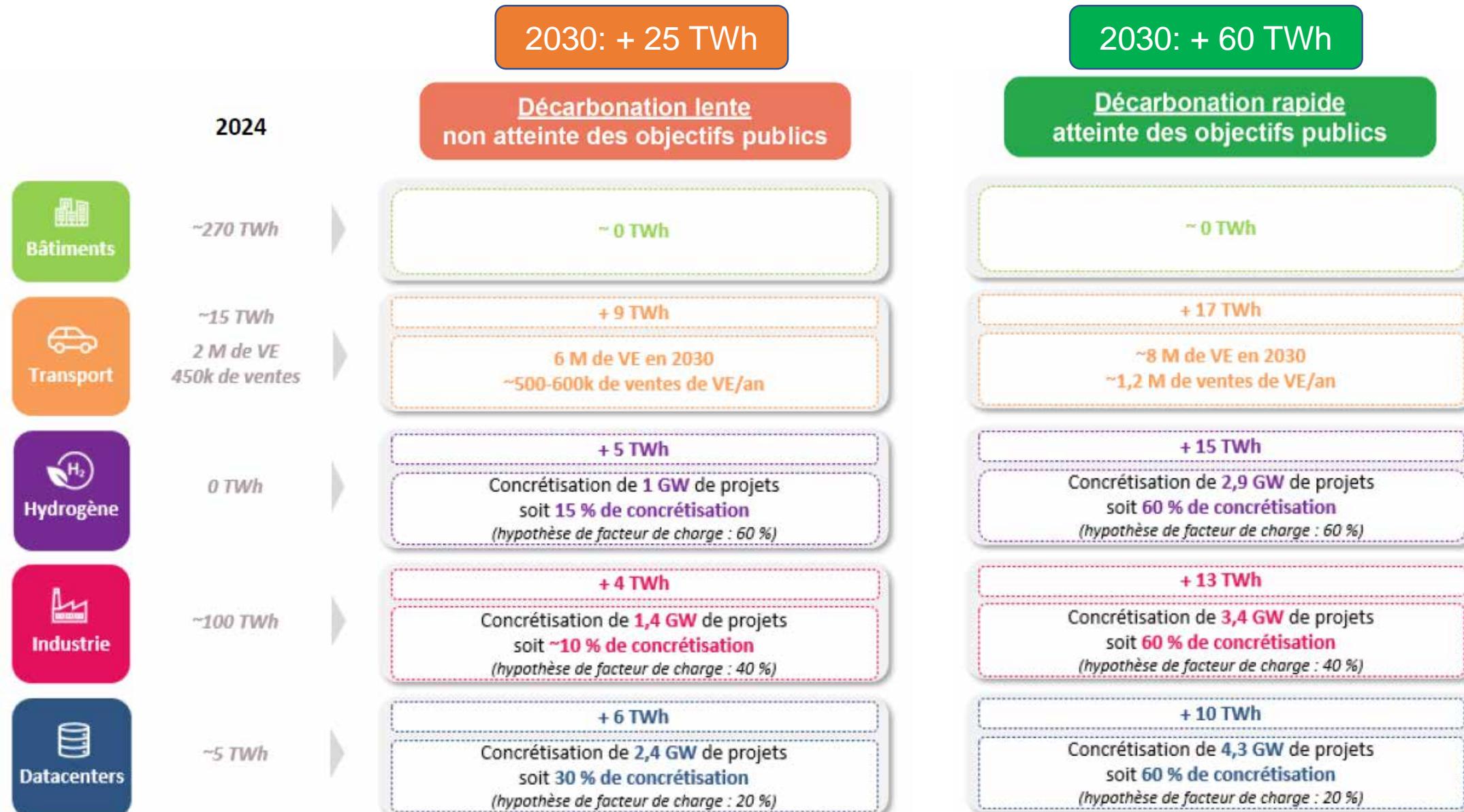
Décarbonation rapide atteinte des objectifs publics



Décarbonation lente non atteinte des objectifs publics

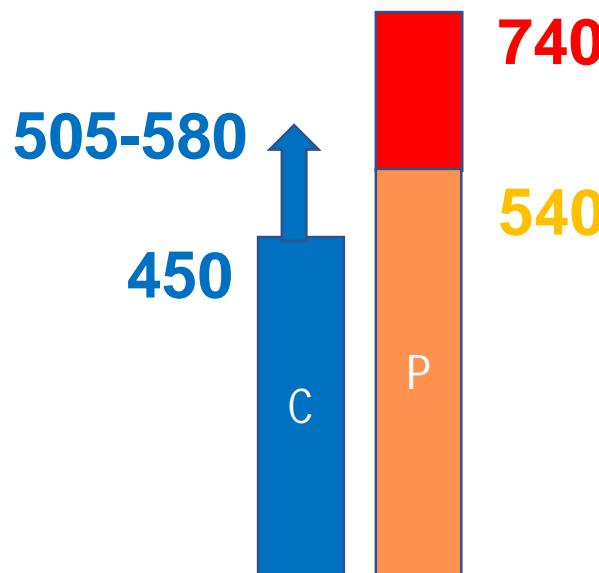


HYPOTHESES (CONSOMMATION ÉLECTRIQUE)



LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE (2035)

La production électrique dans le texte de la PPE3
février 2025



Socle nucléaire

2035 : 60 GW-360-400 TWh

Socle hydroélectrique

2035 : 29 GW-54 TWh

Installation massive de capacités d'ENRs (intermittentes)

Eolien en mer: 0,65 GW- 2 TWh (2023) > 18 GW-71 TWh (2035)

Eolien sur terre: 22 GW-49 TWh (2023) > 40-45 GW-91-103 TWh (2035)

PV: 19 GW-23 TWh (2023) > 65-90 GW GW-92-110 TWh (2035)

Total: 75 > 270 (255-285) TWh (total 125-150 GW)

Surproduction électrique: 160 – 235 TWh

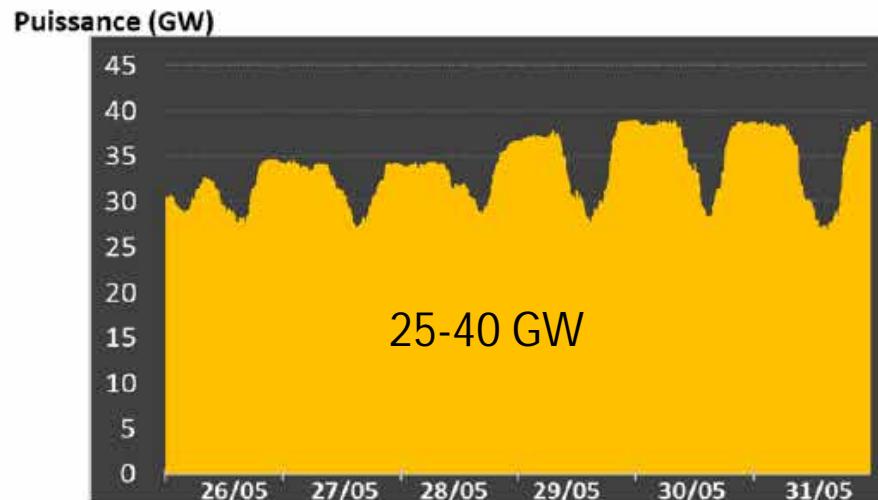
Pourquoi limiter les surcapacités (intermittentes) ?

Surcapacités électriques

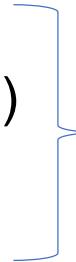
Aujourd'hui ≈ 90 TWh; 2035 ≈ 200 (chiffres PPE avec moyenne RTE)



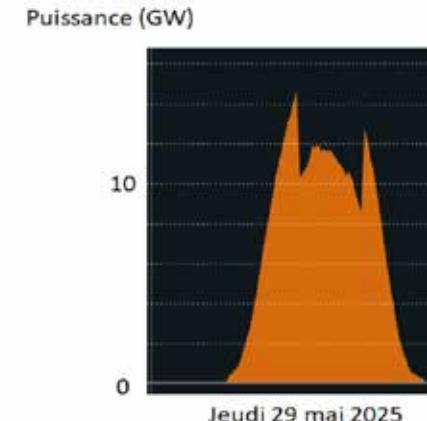
- Ø Multiplication des prix spots négatifs ou nuls
- Ø Modulation de plus en plus importante du nucléaire (pilotable)
- Ø Écrêtage de plus en plus fréquent des ENRi
- Ø Adaptation des réseaux électriques
- Ø Exportations limitées



: modulation observée par le parc nucléaire entre le 26 mai et le 31 mai 2025



Coût du système ↑
(capacités non utilisées)
Impacts techniques



La production solaire a été diminuée de 4 GWe vers 12h, pour retrouver sa pleine puissance à 17h, soit un total de 20 GWh de perdus (« perdus » au sens payés par le contribuable, mais pourtant pas produits).



Le fait d'écrêter les ENR signifie qu'on a atteint les limites de la modulation par les pilotables et les limites de l'exportation



Pourquoi limiter les surcapacités (intermittentes) ?

Figure 7

Effets techniques et économiques d'une situation de surcapacité telle que résultant de la trajectoire «Décarbonation lente» à l'horizon 2030



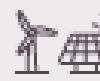
Problématiques techniques (trajectoire «décarbonation lente» - 2030)



Stagnation du solde exportateur au-delà de 80-110 TWh (moindres débouchés économiques en Europe)



Plus forte sollicitation de la faculté de modulation du parc nucléaire :
~50 TWh de modulation pour absence de débouché économique



Augmentation du volume des écrêtements renouvelables ($\times 2$ à $\times 3$ par rapport à 2025) et **augmentation de la puissance maximale à écréter** (jusqu'à ~30 GW, contre ~10 GW en 2025)

→ nécessité de mettre en place un dispositif de modulation renouvelable contrôlée



Effets économiques (trajectoire «décarbonation lente» - 2030)



Hausse du coût complet de production (en €/MWh) : environ +7% par rapport à une trajectoire de décarbonation rapide

Baisse des prix de marché (prix spot moyen de 35 à 50 €/MWh) entraînant une **dégradation du modèle économique des producteurs** : perte de revenus marchés par rapport à une trajectoire de décarbonation rapide de l'ordre de -20 Md€/an



Baisse de la valeur des exports



Effet haussier sur les charges budgétaires liées au soutien public aux renouvelables par rapport à une trajectoire de décarbonation rapide

Illustration : PPE3 et demande stable

Hypothèse (PPE3): 80 GW de solaire (65-90)

Pic de puissance consommée entre 10 et 17h un jour d'été (≈ 55 GW en 2024)*

Facteur de charge 70 % (en moyenne 15-17%)

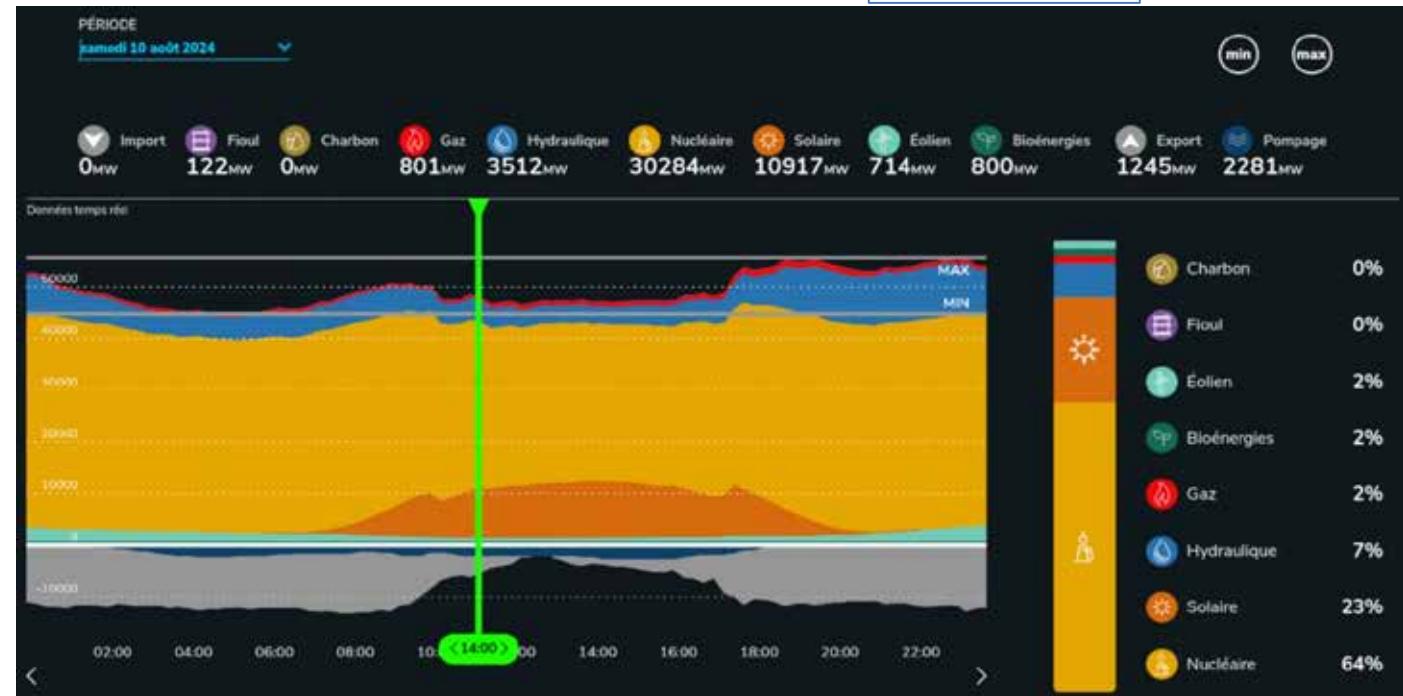
$$80 \times 0,7 = 56 \text{ GW} !!$$

Aujourd'hui

* Si électrification (moyenne RTE): 65 GW



Production
10 août 2024
(Eco2mix)

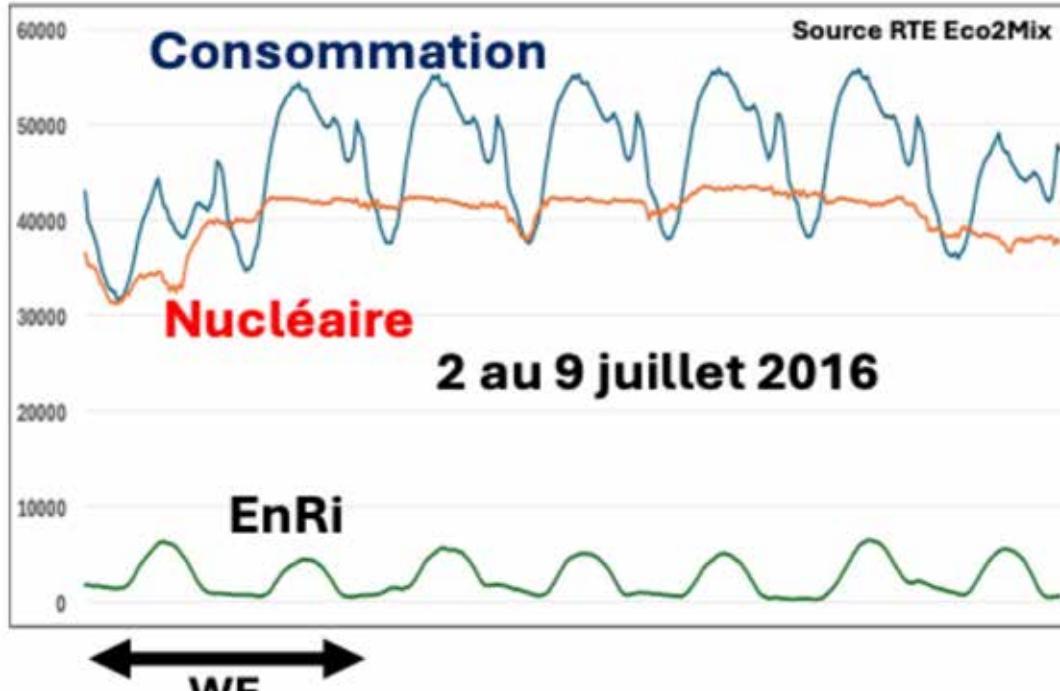


Ø Il faut arrêter tous les réacteurs nucléaires !

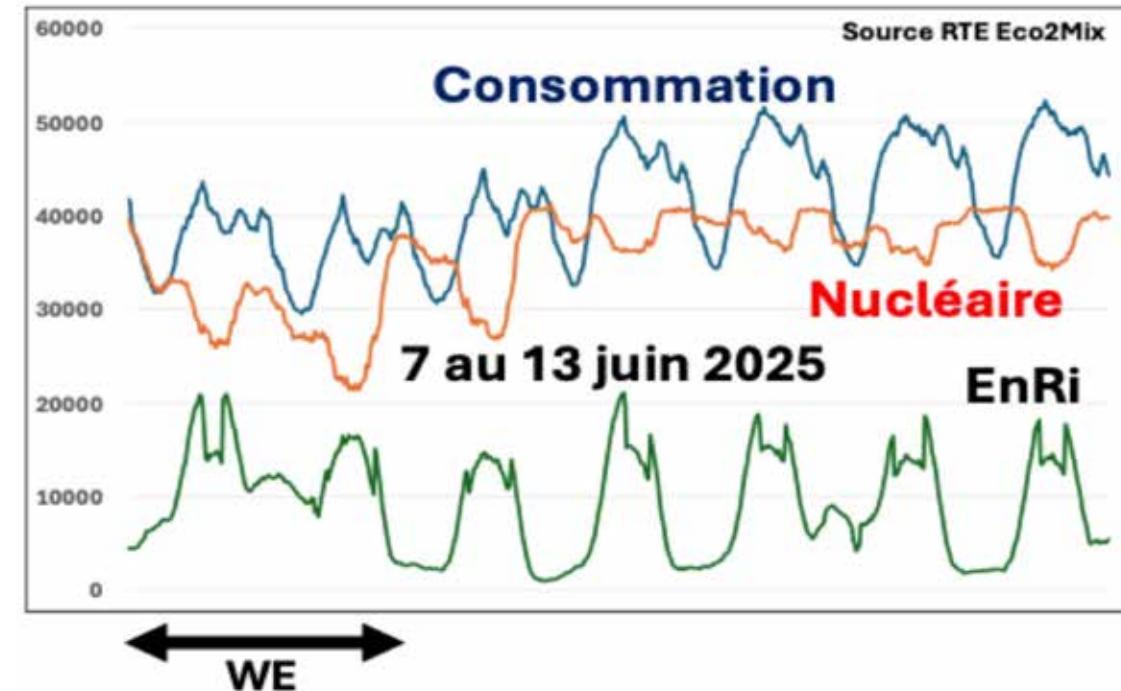
Problèmes : redémarrage, inertie,...

Ø Il faut écrêter massivement la production solaire

Modulation croissante du nucléaire (2016-2025)



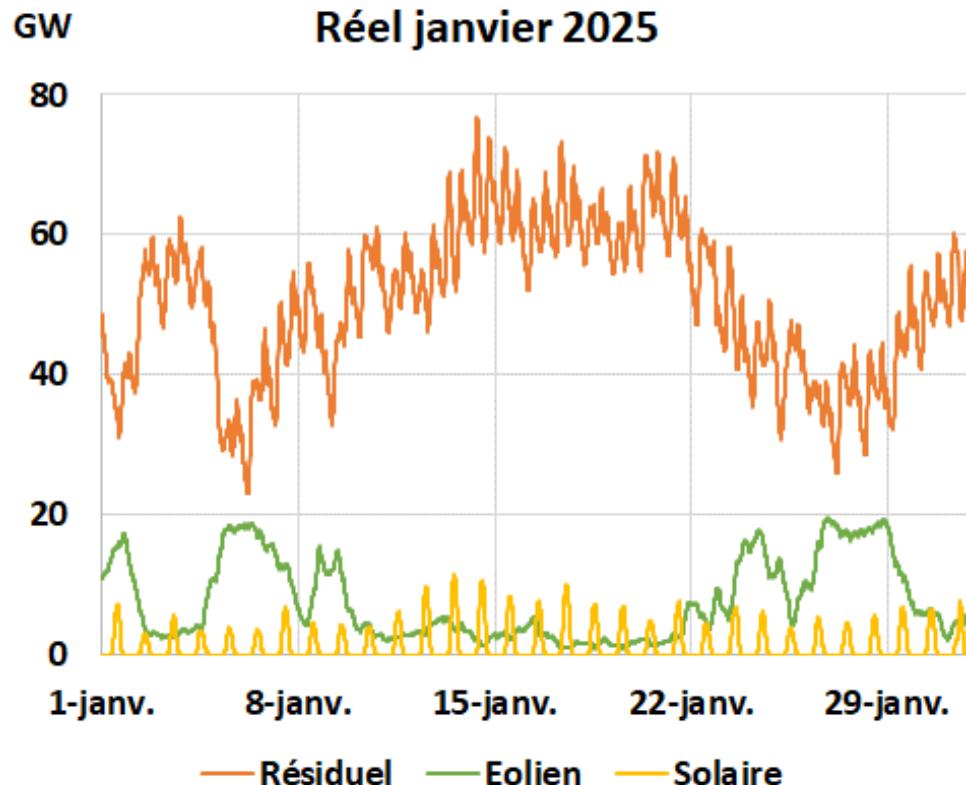
$P_i (\text{ENRi}) = 16 \text{ GW}$
Nucléaire faiblement modulé
Modulation par hydro, gaz, échanges,..



$P_i (\text{ENRi}) = 51 \text{ GW}$
Nucléaire beaucoup plus modulé
(+ 5 TWh/an (2025: 35 TWh; 2024: 30 TWh))
Déjà RTE efface certains parcs (éoliens et solaires)

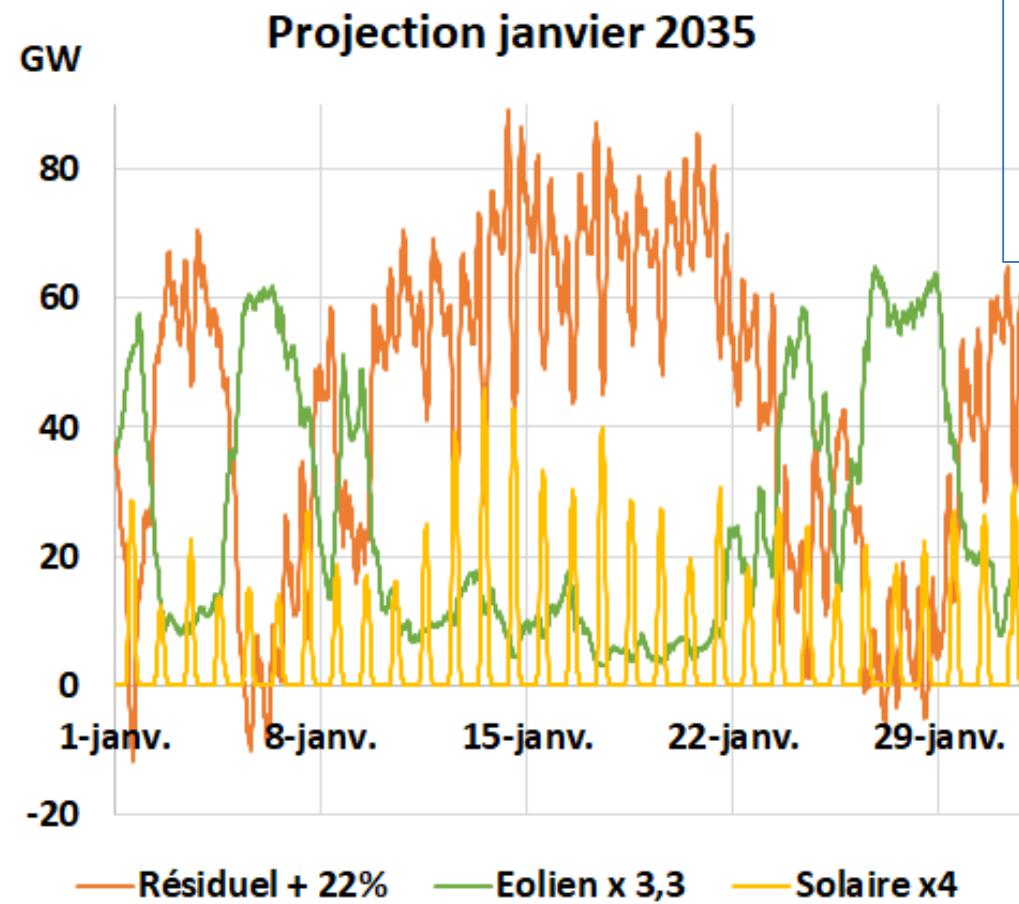
Demain (2035)?: + 100 GW d'ENRi (les pics ENRi, solaire notamment, seront au niveau de la conso, l'été mi journée)!
+ les centaines de GW européens (Allemagne, Espagne,...)

Modulation croissante du nucléaire (2035)



Résiduel: 25 GW à 75 GW

Modulation: perte de ≈
15-20 TWh; 30 TWh (2024); 35 TWh (2025)



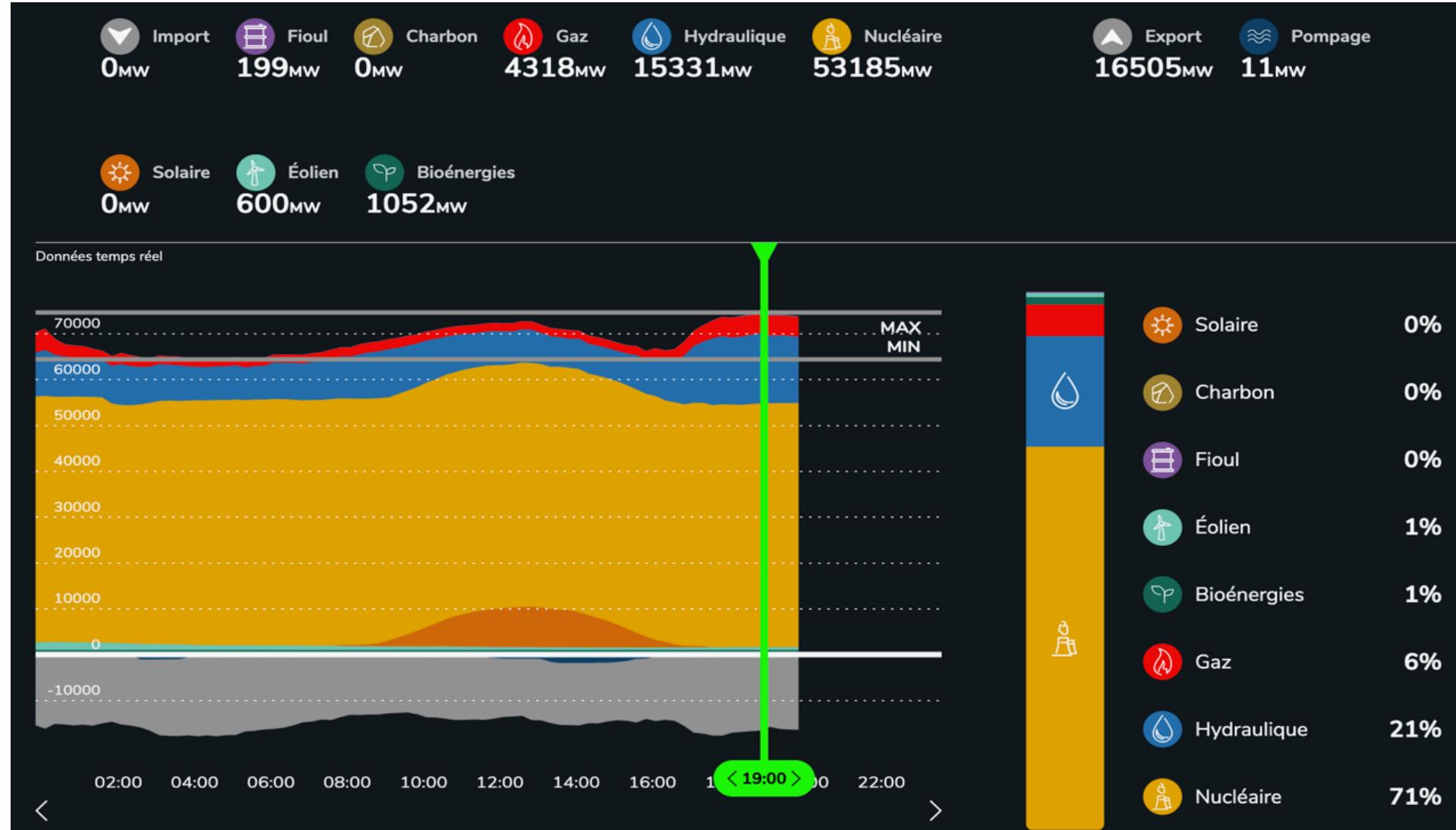
Résiduel: -10 GW à 90 GW
Modulation: perte de > 100 TWh

- Équilibrage par :
- (i) nucléaire;
 - (ii) hydraulique;
 - (iii) gaz;
 - (iv) échanges;
 - (v) demande

Surproduction... et sous-production (intermittence)

Samedi 13 décembre 2025 à 19h: ni vent, ni soleil

MERCI à FM BREON
LSCE, Paris Saclay



Evolution du cycle diurne

MERCI à FM BREON
LSCE, Paris Saclay

Montre comment le cycle diurne de la production nucléaire a évolué, année après année

Dans les années 2010, minimum de production pendant la nuit. Ces dernières années, gros minimum de production en milieu de journée. Le nucléaire s'efface devant les productions solaire PV

Attention : Valeur absolue n'a pas de sens (courbes décalées les unes par rapport aux autres)

FLEXIBILITE: QUELQUES RAPPELS

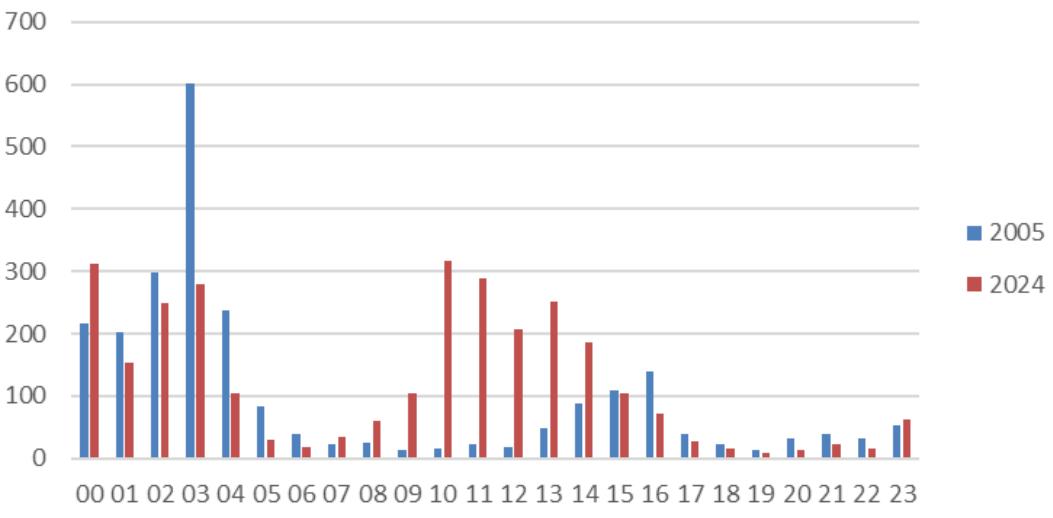
Comparaison 2024-2005

Le parc manœuvrait déjà beaucoup en 2005, surtout la nuit : creux de consommation.

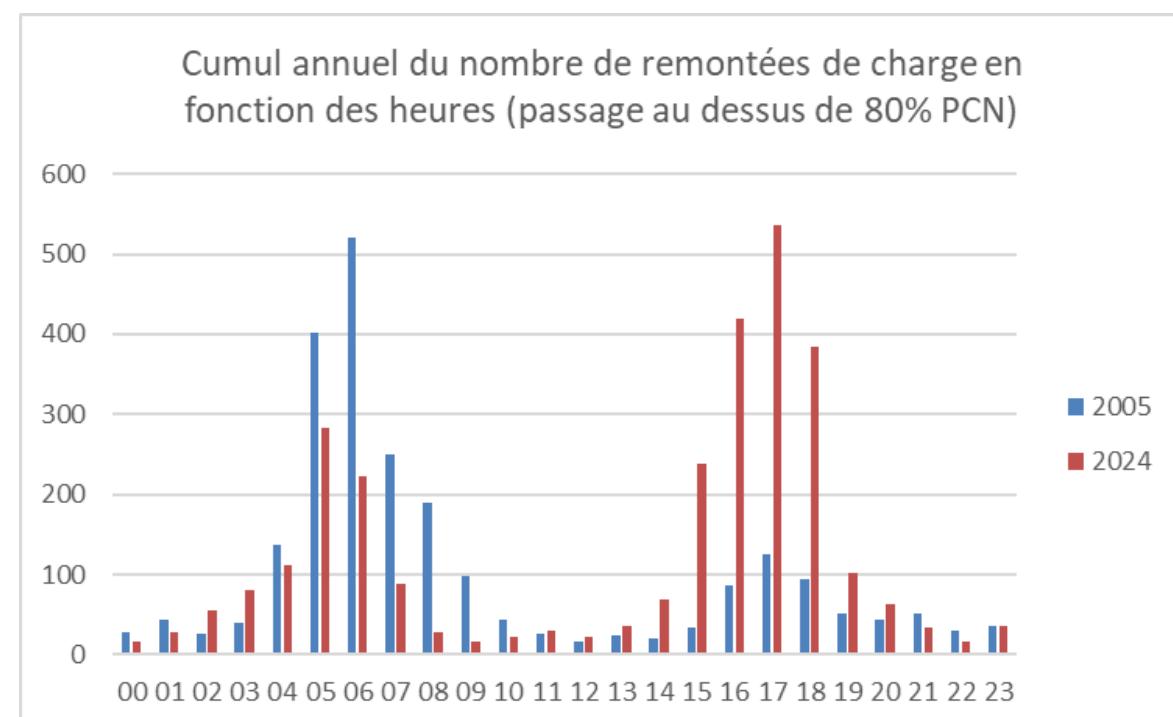
En 2024, déplacement vers le milieu de journée : pic solaire.

L'effet des EnR a dépassé l'effet de la consommation (arrêts en pleine semaine).

Cumul annuel du nombre de baisses de charge en fonction des heures (passage en dessous de 80% PCN)



Cumul annuel du nombre de remontées de charge en fonction des heures (passage au dessus de 80% PCN)



Production solaire vs consommation: décorrélation ?

MERCI à FM BREON
LSCE, Paris Saclay

Chaque point est une journée sur 2024

La production solaire est faible lorsque la conso est élevée et vice-versa

Du coup, le solaire est peu adapté à la consommation française

Modulation croissante du nucléaire

N° 2149

ASSEMBLÉE NATIONALE
CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958
DIX-SEPTIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la présidence de l'Assemblée nationale

le 27 novembre 2025

N° 166

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE 2025 - 2026

Enregistré à la présidence du Sénat

le 27 novembre 2025

RAPPORT

au nom de

L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

sur

Les impacts technologiques de l'évolution du mix énergétique
et ses conséquences sur l'outil industriel et les réseaux

par

M. Joël BRUNEAU, député, et M. Patrick CHAIZE, sénateur

Ainsi, l'accroissement rapide des capacités en énergies intermittentes, en particulier solaire photovoltaïque, sans accroissement en parallèle de la demande en électricité et de la flexibilité de cette demande, pourrait non seulement avoir un impact potentiel sur le parc nucléaire, mais aussi conduire à des actifs échoués, les nouvelles installations n'étant plus en capacité de produire que marginalement, ce qui pourrait se traduire par des surcoûts considérables pour les contribuables.

Dans le cadre de l'audition de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASN) par l'OPECST du 22 mai 2025, Olivier Dubois, membre du collège, rejoignait ce point de vue :

« Le parc des réacteurs français peut faire de la modulation de puissance pratiquement depuis sa création. Des spécificités techniques comme les "grappes grises" permettent des transitoires de charge rapides. Jusqu'à présent, nous n'avons pas observé d'impact sur le vieillissement des composants, mais la fréquence et l'intensité des modulations augmentent avec l'évolution des moyens de production d'électricité.

« EDF étudie les potentiels impacts de cette intensification sur le vieillissement des composants, probablement plus au niveau du circuit secondaire que du circuit primaire, où les changements de pression et température sont plus importants pendant les transitoires de charge. Nous examinons également les aspects organisationnels et humains en salle de commande, car pendant ces transitoires, les opérateurs sont mobilisés par cette tâche et ne peuvent réaliser d'autres activités. »

Modulation croissante du nucléaire

N° 2149

ASSEMBLÉE NATIONALE
CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958
DIX-SEPTIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la présidence de l'Assemblée nationale

le 27 novembre 2025

N° 166

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE 2025 - 2026

Enregistré à la présidence du Sénat

le 27 novembre 2025

RAPPORT

au nom de

L'OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

sur

Les impacts technologiques de l'évolution du mix énergétique
et ses conséquences sur l'outil industriel et les réseaux

par

M. Joël BRUNEAU, député, et M. Patrick CHAIZE, sénateur

À l'occasion de son audition du 16 juin 2025 par les rapporteurs, le professeur Yves Bréchet, spécialiste des matériaux, membre de l'Académie des sciences et ancien Haut-Commissaire à l'énergie atomique, a également souligné que « *ce serait la première fois, dans tous les secteurs industriels que je connais, que le remplacement d'une sollicitation constante par une sollicitation alternée ne conduirait pas à une dégradation des matériaux.* »

Modulation croissante du nucléaire

Cour des comptes



DEUXIÈME CHAMBRE

S2025-1528

TROISIÈME SECTION

RAPPORT ENTREPRISE PUBLIQUE

(Article R. 143-11 du code des juridictions financières)

LA MAINTENANCE DU PARC ELECTRONUCLEAIRE D'EDF EN FRANCE

Exercices 2014 et suivants

Le présent document, qui a fait l'objet d'une contradiction avec les destinataires concernés, a été délibéré par la Cour des comptes, le 16 juillet 2025.

17 Novembre 2025

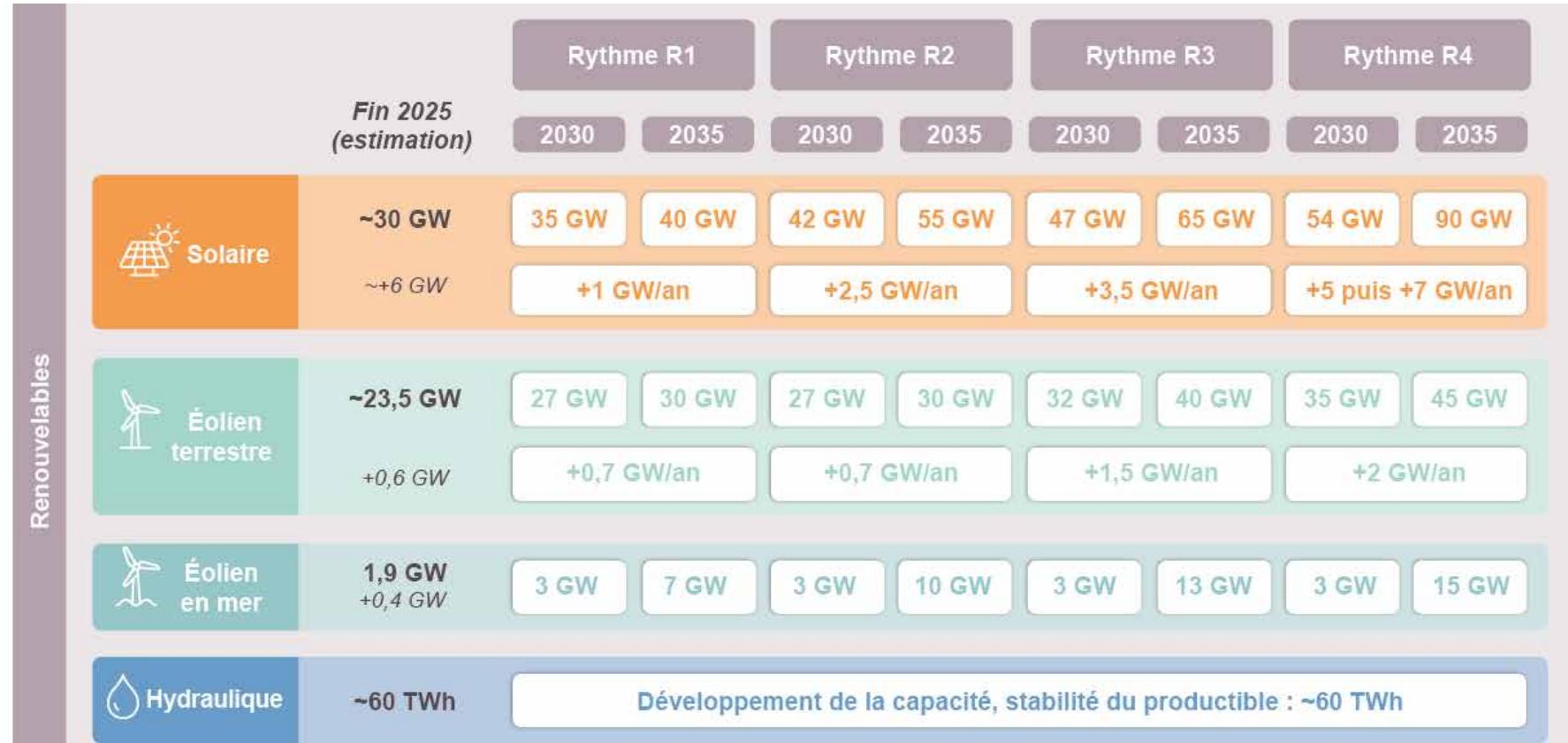
Bernard Fontana, Président d'EDF, interpelle les sages de la rue Cambon au sujet du recours accru à la modulation :

« Cette situation de forte modulation soulève des questions sur le plan technologique, aussi bien en termes d'impact sur le fonctionnement des réacteurs qu'en matière de résilience du système électrique. »

Affaire à suivre : EDF devrait publier un rapport sur le sujet prochainement.

Conclusions

Ø Réviser la feuille de route 2025-2035 (PPE3)



R4 ≈ PPE3

| | | | | | |
|----------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Total production : | 540 | 610 | 640 | 690 | 740 |
| Total consommation : | 450 | (505-580) | (505-580) | (505-580) | (505-580) |
| Différence : | 90 | (105-30) | (135-60) | (185-110) | (235-160) |

Conclusions

- Ø Réviser la feuille de route 2025-2035 (PPE3)

- Ø Electrifier (directement) les usages

- Ø Stimuler la demande électrique

- Ø Stimuler l'industrie (française/européenne) électrique



Autres combustibles électriques: e-ammoniac, e-kérosène,..

Marc FONTECAVE

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

SÉMINAIRE :

Daniel Iracane, Membre de l'Académie des technologies
« Défossiliser l'économie : le cas particulier de l'aviation et du
transport maritime »

Aviation: état mondial



Quelques ordres de grandeur du transport aérien⁶

Trafic aérien mondial (en 2019)

- **46,8 millions de vols** effectués par 1 478 compagnies aériennes
- **8 680 milliards** de passagers-km transportés (pkt) et **57 millions** de tonnes de fret
- **115 accidents** dont 6 accidents mortels ayant causé **239 victimes**

Nombre d'avions à turboréacteurs

- **23 000 avions** en service consommant en moyenne **3,4 l/100 pkt**
- **6 500 avions** post 2017
- **15 000 avions** de type récent commandés (fermes + options) consommant **2,5 l/100 pkt**
- Cadences de production : **2 000 à 2 500 avions/an à partir de 2025**
- Apparition d'**avions de type nouveau en 2035** consommant **1,8 l/100 pkt**, soit presque deux fois moins que la consommation moyenne constatée en 2019

Consommation kérosène en 2019^{7 8}

- **290 Mt** (monde) dont 20% pour le fret – **50 Mt** (au départ de l'UE) fret inclus
- Seulement 30% des vols au départ d'Europe dépassent 1 500 km, mais ceux-ci émettent 75% du CO₂ imputable au trafic aérien européen

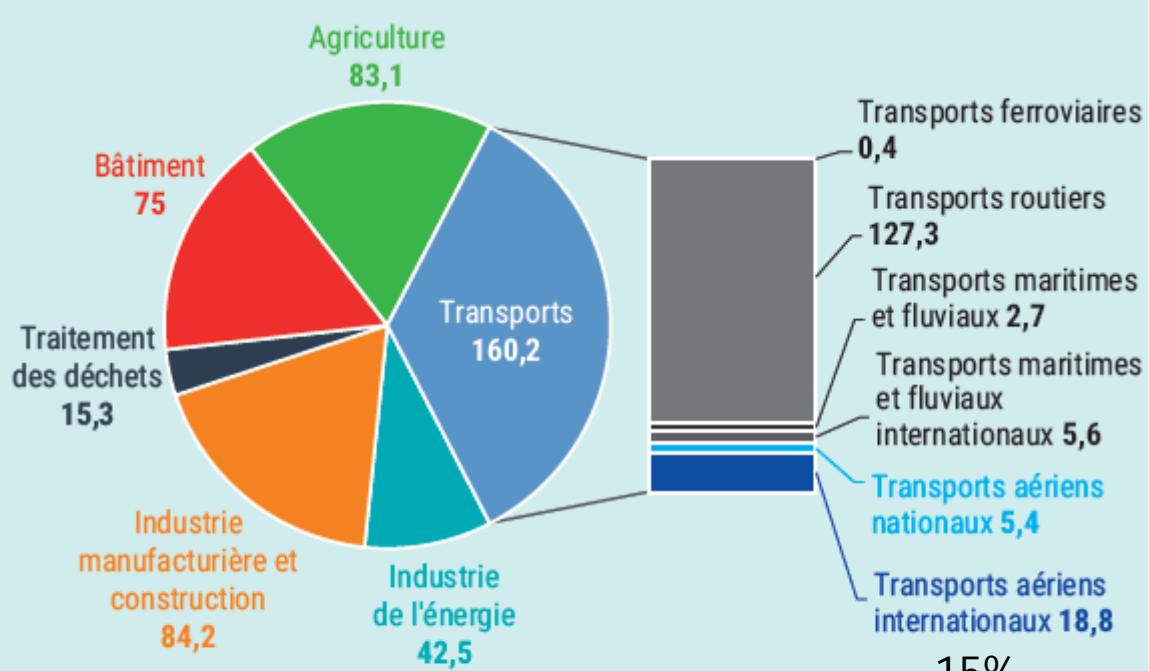
Émissions CO₂

- **915 Mt** (monde) – **156 Mt** (au départ de l'UE)

Avis AAE
2024
(Académie de l'Air
Et de l'Espace)

Aviation (France): émissions de GES

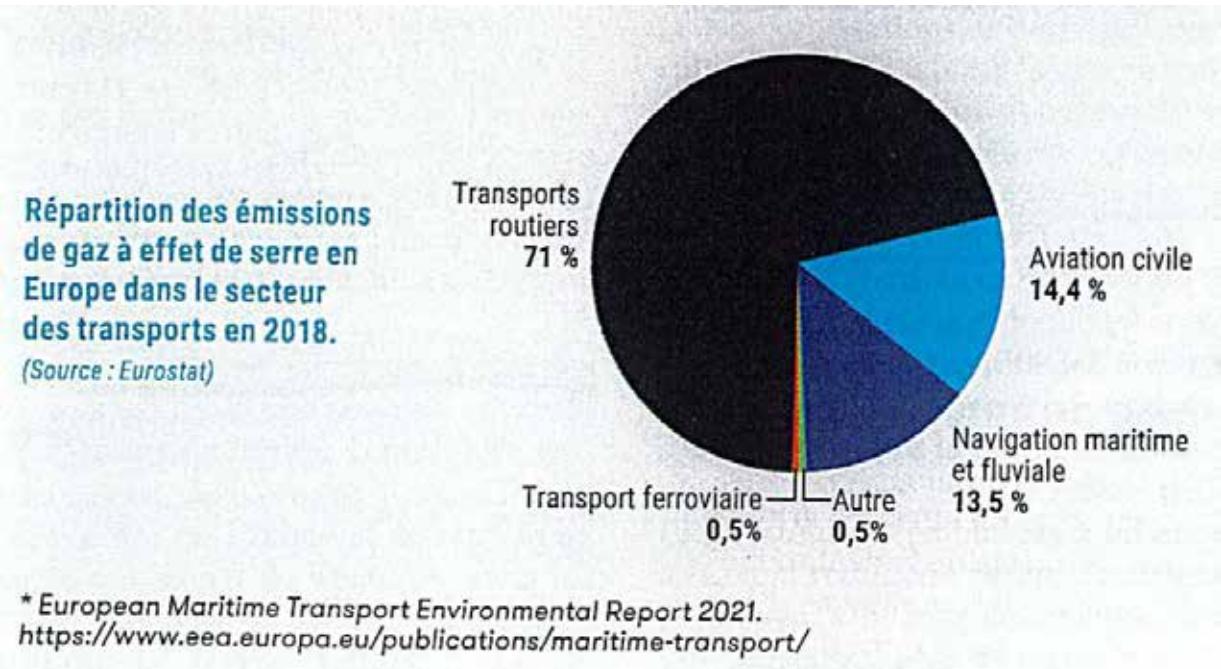
FRANCE



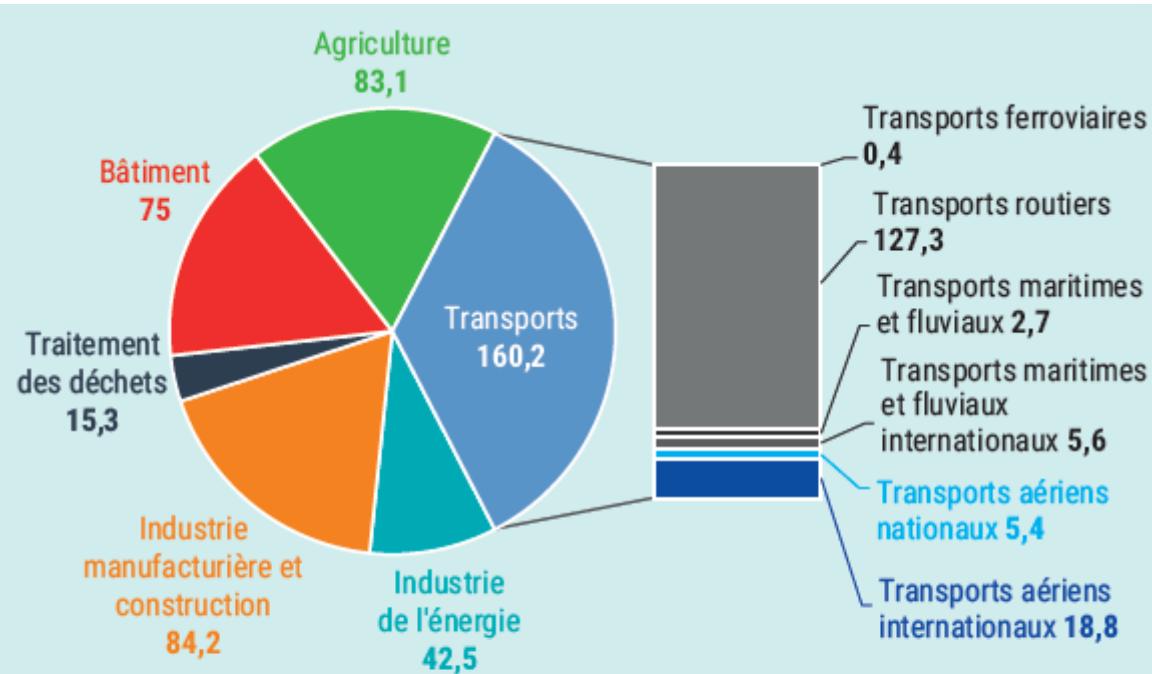
Répartition des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019
(en Mt de CO₂e), y compris transports internationaux.

Source : Données CITEPA-Secten.

EUROPE



Aviation: émissions de GES



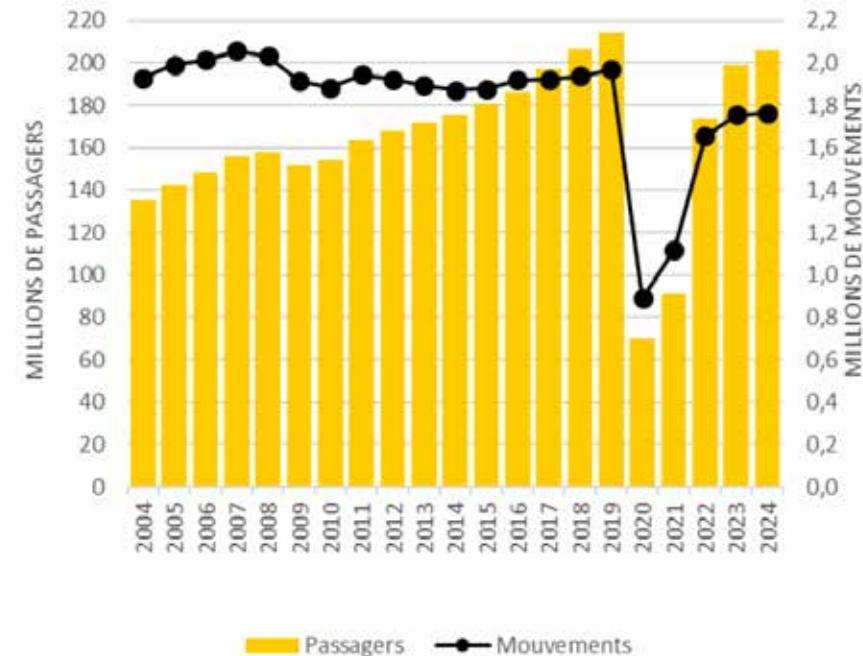
Répartition des émissions de gaz à effet de serre en France en 2019
(en Mt de CO₂e), y compris transports internationaux.

Source : Données CITEPA-Secten.

| | Consommation de carburant par passager en l/100 km | Émissions de CO ₂ par passager en g/km |
|--|--|---|
| Avion Source : Calculateur en ligne Air France | | |
| Paris-Brest | 3,81 | 95,0 |
| Paris-Nice | 3,64 | 91,0 |
| Paris-Madrid | 3,76 | 94,0 |
| Paris-New York | 3,13 | 78,0 |
| Paris-Pékin | 3,00 | 75,0 |
| Trains grande vitesse Source : SNCF | | 1,7 |
| Trains TER Source : SNCF | | 24,8 |
| Bus Source : SNCF - Transilien | | 104,0 |
| Voiture (occupation moyenne de 1,4 passager par véhicule) Source : SNCF - Transilien | 6,80 (véhicule) | 110,7 |
| Autocar Source : Chaire énergie et prospérité | | 58,5 |

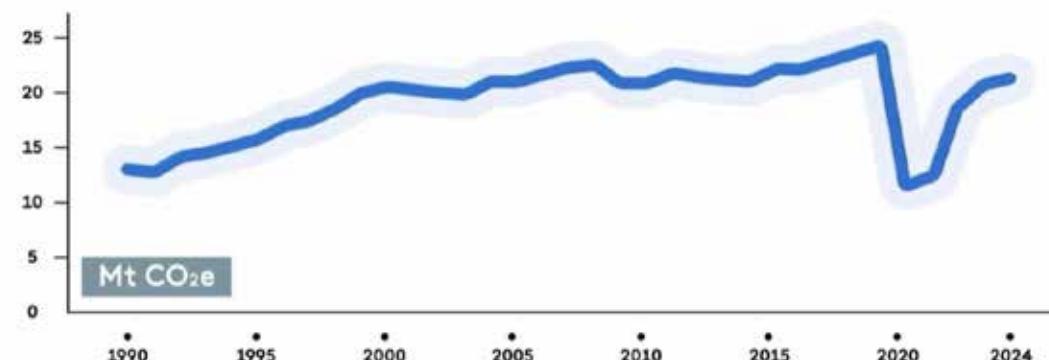
— Aviation (France): un secteur dynamique —

- Ø Chiffres d'affaires: 65 milliards d'euros (4,3 % PIB)
- Ø Territoires outre-mer
- Ø France: première destination touristique mondiale
- Ø Premier pays exportateur pour l'aéronautique
- Ø Premier gestionnaire d'aéroport
- Ø Air France: compagnie nationale parmi les plus importantes
- Ø Haute continue du traffic
- Ø SAF: production embryonnaire et coûts prohibitifs

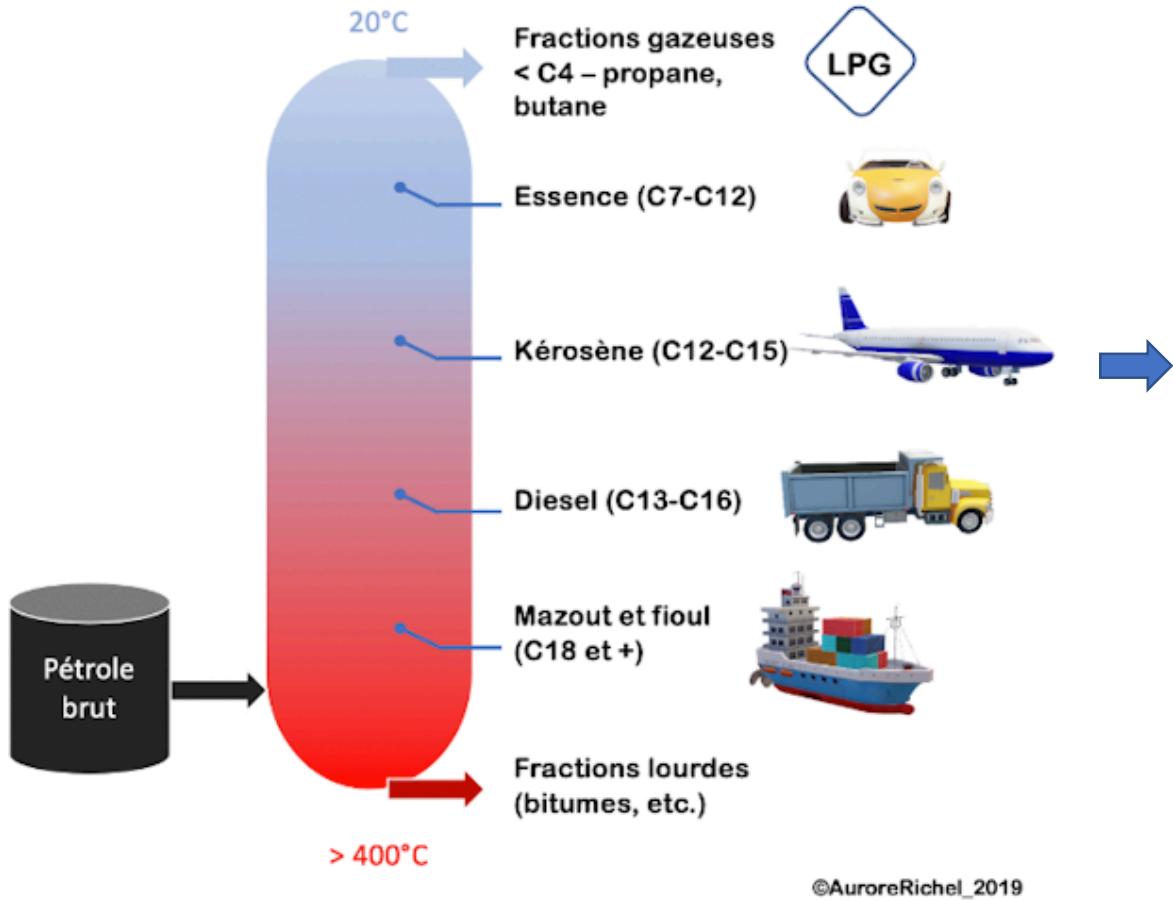


Émissions de CO₂ du secteur aérien en France

Source : Citepa Secten 2024



Kérosène pour l'aviation



Contraintes garanties par normes/régulations internationales en termes de:

- Ø Densité d'énergie massique (MJ/kg)
- Ø Densité d'énergie volumique (MJ/L)
- Ø Émissions de particules
- Ø Viscosité
- Ø Point de congélation
- Ø Température de distillation (volatilité suffisante pour une combustion efficace)
- Ø Minimum de composés aromatiques

Composition typique (% en poids)

- | | |
|---------------------------------|---|
| Ø 20-26% n-alcanes (paraffines) | Densité énergie Performance à froid Stabilité thermique |
| Ø 30-37% iso-alcanes | |
| Ø 19-25 % cyclo-alcanes | Bas point de congélation Stabilité thermique |
| Ø 3-7% alcanes bicycliques | |
| Ø 14-19% aromatiques | |

— Aviation: alternatives au kérósène

Ø HYDROGENE ↴

- Un gaz (compression/liquéfaction)
- Sécurité
- Stockage (réservoir)

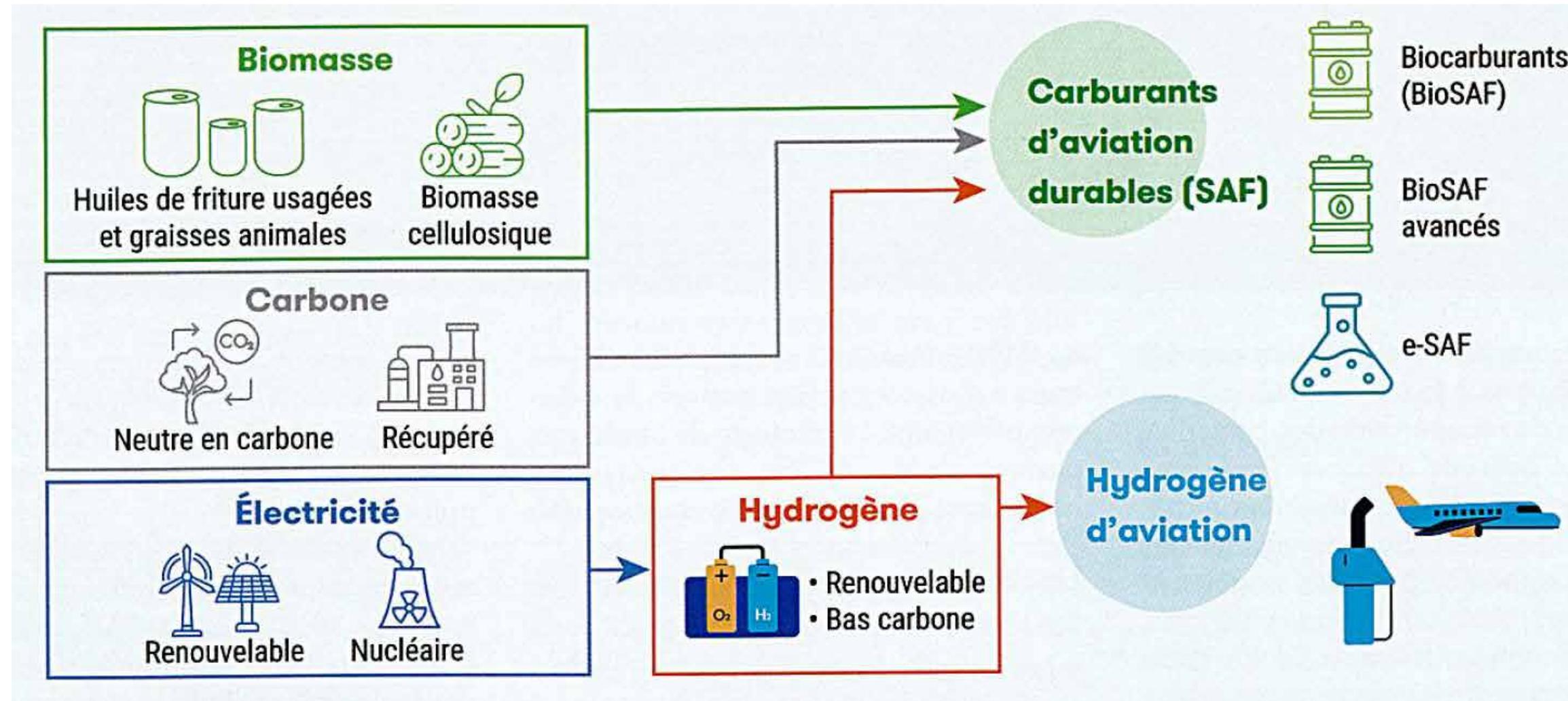
Ø BATTERIES ↴

- Long courrier 200 tonnes + 40 tonnes de kérósène pour 2000 km
- Équivalent batteries: 680 tonnes > poids x 4

Ø CARBURANTS D'AVIATION DURABLES (SAF)

- Biocarburants (ressource limitée)
- e-kérósène

Carburants d'Aviation Durables (SAFs)



Règlement européen ReFuelEU Aviation

Carburants durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF)

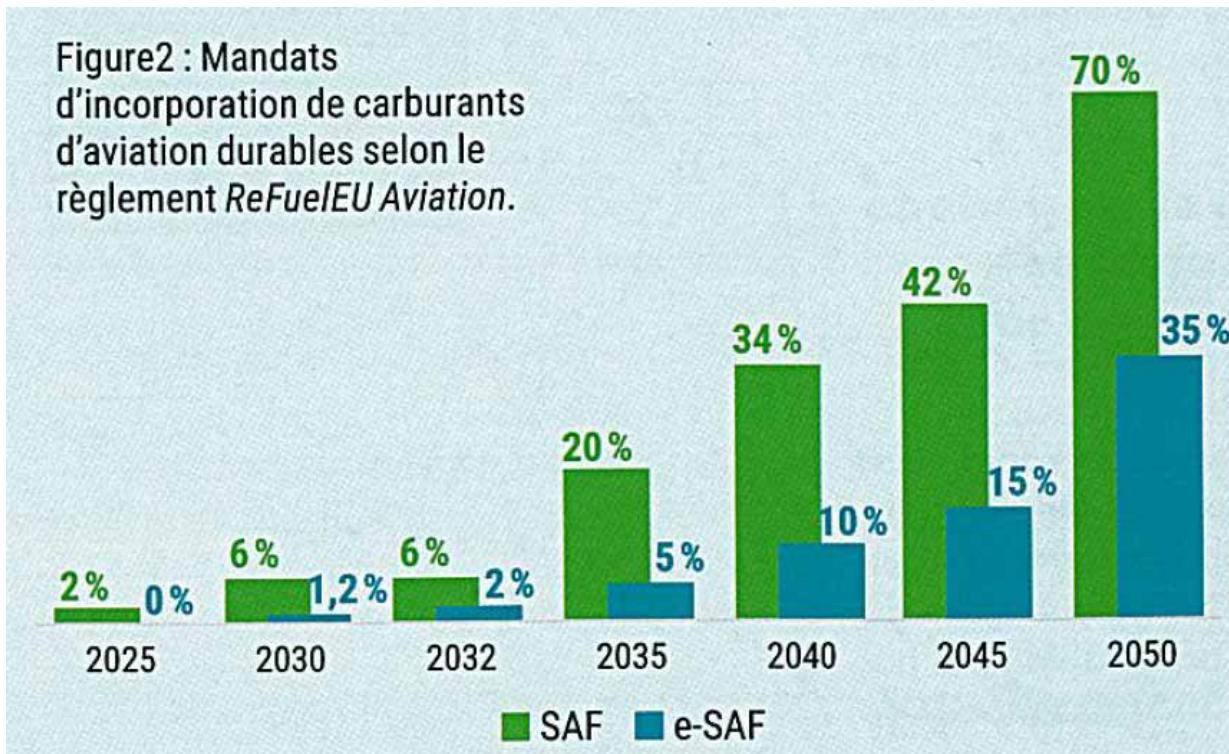
Ü Biocarburants (1G exclus)

Ü e-kérosène

Ü (Hydrogène)

SAF: 2% (2025); 20 % (2035); 70 % (2050)

2050: 35 % biocarburants; 35 % e-carburants; 30 % kérosène fossile



Règlement européen ReFuelEU Aviation: France

Carburants durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF)

Ü Biocarburants (1G exclus)

Ü e-kérosène

Ü (Hydrogène)

SAF: 2% (2025); 20 % (2035); 70 % (2050)

2050: 35 % biocarburants; 35 % e-carburants; 30 % kérosène fossile

| En kt/ an | 2030 | 2032 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Europe | | | | | | |
| BioSAF | 2 200 | 1 900 | 6 900 | 11 200 | 12 800 | 16 800 |
| e-SAF | 550 | 900 | 2 300 | 4 700 | 7 100 | 16 800 |
| France | | | | | | |
| BioSAF | 350 | 300 | 1 100 | 1 800 | 2 100 | 2 700 |
| e-SAF | 70 | 150 | 380 | 760 | 1 200 | 2 700 |

Tableau 1 : Besoins prévisionnels en bioSAF et e-SAF pour satisfaire aux exigences de ReFuelEu. Source : Estimations de la profession.

Total kérosène France:
[7,5 – 8] Mt/an
[90-100] TWh

5,4 Mt SAF/an

e-kérosène: à partir de CO₂ ?

Fuel 366 (2024) 131269



Règlementation: le kérosène de synthèse doit être mélangé à du kérosène fossile

Seuls les SAFs produits par FT sont approuvés par les instances internationales de l'aviation
Il n'y a pas pour le moment de production MeOH-to-kérosène

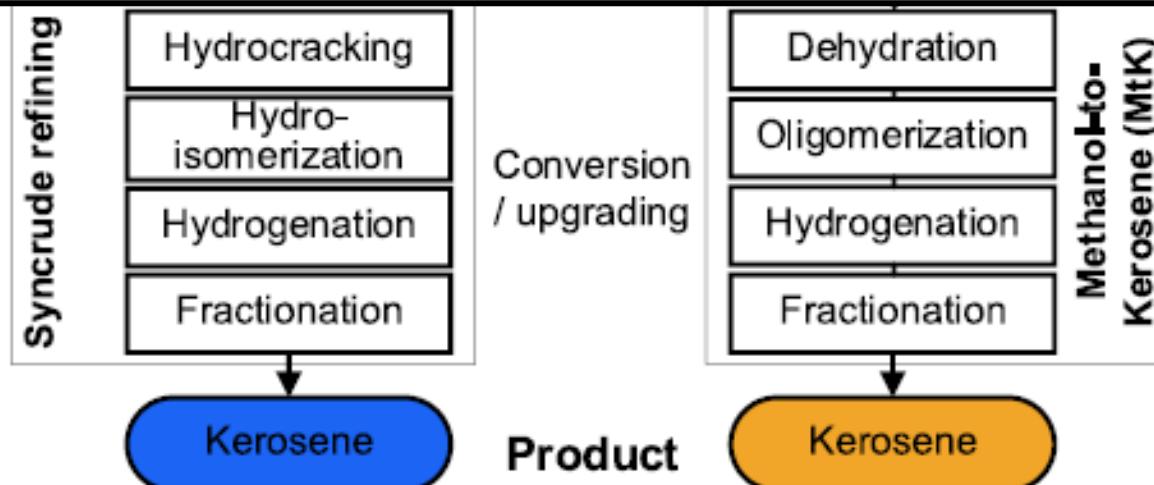
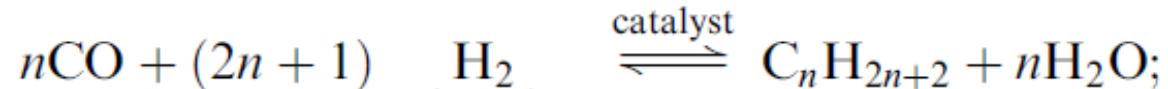
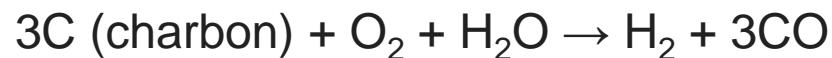
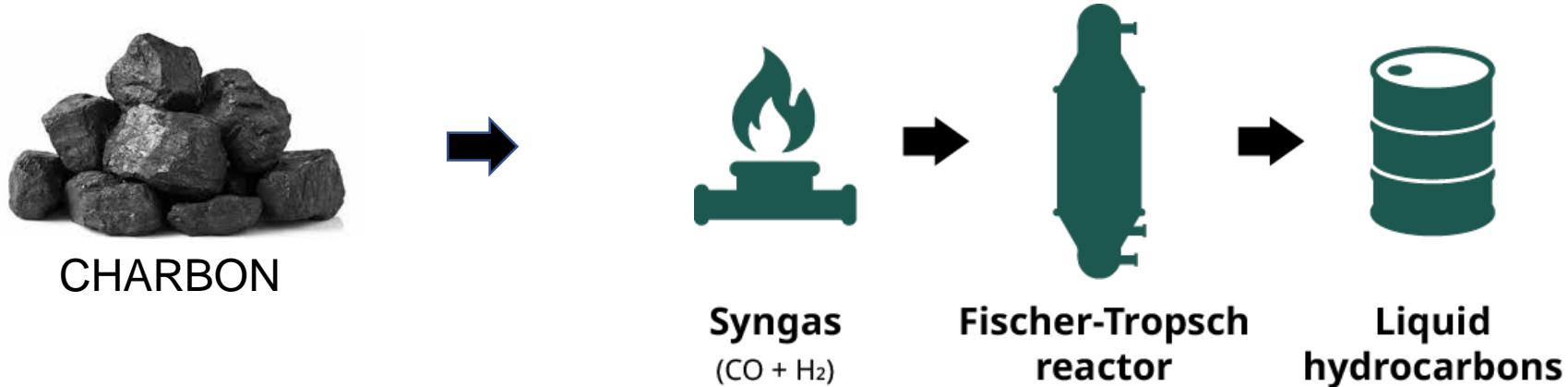


Fig. 1. Fischer-Tropsch- and methanol-based kerosene production pathways.

Fischer-Tropsch



Histoire

- Ø Premier brevet 1923 (Franz Fischer et Hans Tropsch)
- Ø Allemagne et Japon (seconde guerre mondiale)
1944 le 3è Reich produisait 124000 barils par jour
90% des besoins pour l'aviation; 50 % des besoins totaux
- Ø Afrique du Sud
2006: 1/3 des besoins assurés par FT (Coal-to-Liquids)

Catalyseur: Fe, Co
P = 15-30 bar
T = 210-350 °C

Projets e-kérosène (Monde)

BUREAU
FRANÇAIS
des
e-fuels

Observatoire international des e-fuels.
Avril 2025

Cartographie des projets. E-kérosène

Sur la base des projets ≥ 50ktep annoncés publiquement

Encouragée par le mandat d'incorporation d'e-SAF de l'Union européenne, l'**Europe s'impose comme leader mondial de la filière e-kérosène**. La plus grande partie des porteurs de projets basés strictement sur une valorisation d'hydrogène électrosourcé, sans apport en biomasse, misent sur la **technologie Fischer-Tropsch**, bien maîtrisée par l'industrie des hydrocarbures.

Amérique du Nord
3 projets
394 ktep
soit 375 kt

Europe
35 projets
3 332 ktep
soit 3 778 kt

Asie
2 projets
473 ktep
soit 450 kt

Légende

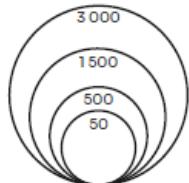
Pays concerné par au moins un projet e-kérosène ≥ 50ktep *

● Projet de production d'e-kérosène ≥ 50ktep *

Capacité de production d'e-kérosène cumulée *** (ktep/an)

Par technologie

- Fischer-Tropsch
- Methanol/
Alcohol to Jet
- E-biofuels
- Inconnue



Questions

§ Besoins en CO₂

§ Besoins en électricité

§ Coûts du e-kérosène

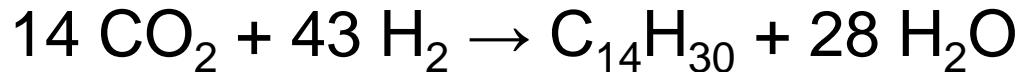
Besoins en CO₂ et électricité ?

Hypothèses:

France 2050 besoin: 7,7 Mt de kérosène et 2,7 Mt de e-kérosène

1 Mt de e-kérosène requiert 35 TWh d'électricité

1 Mt de e-kérosène requiert 4,5 Mt CO₂



Kérosène (C₁₄H₃₀): 12 kWh/kg

Pour **2,7 Mt** de e-kérosène (32 TWh)

Ø**12,5 Mt CO₂**

Ø**1,6 Mt H₂ vert**

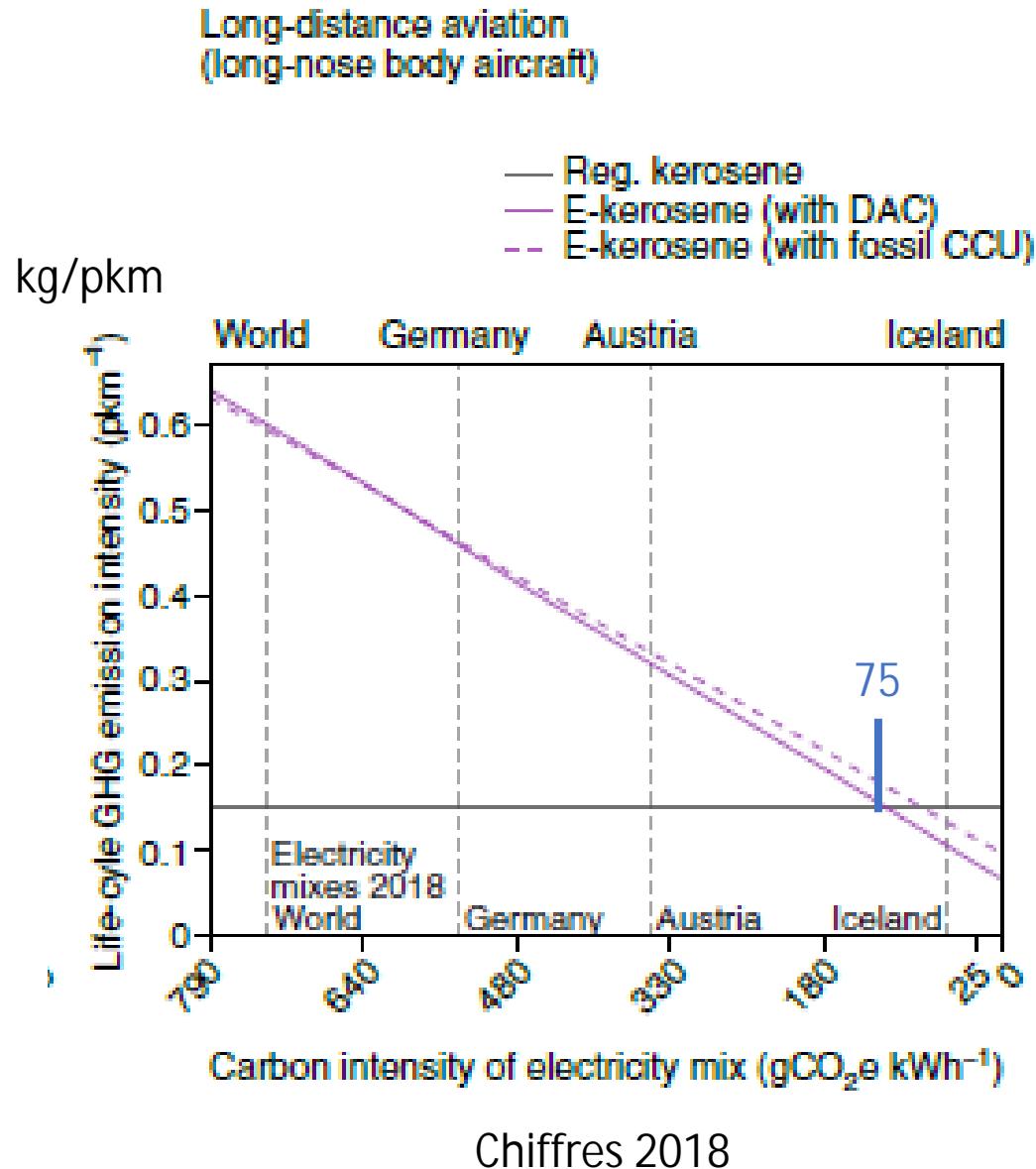
Ø**95 TWh d'électricité** (9 EPR !)*

* Chiffres Etude ADEME (octobre 2023) « Electrocarburants en 20250 »

Pour 2 Mt e-kérosène: 60-108 TWh électricité et 8,9-12,4 Mt CO₂

Scénario optimiste-conservateur (rendements et sélectivité des réactions)

Intensité carbone SAF: effet du mix électrique



Conclusion: pour la plupart des pays, on ne peut pas attendre de diminution des émissions de CO₂ grâce aux e-fuels

- ∅ France (21,3 en 2025): OK
- ∅ Allemagne (380 en 2024): émissions e-fuels/ref x 2,5
- ∅ Monde (700): émissions e-fuels/ref x 4,5
- ∅ Europe (180 en 2024): émissions e-fuels/ref x 1,4

e-kérosène: un coût encore trop élevé

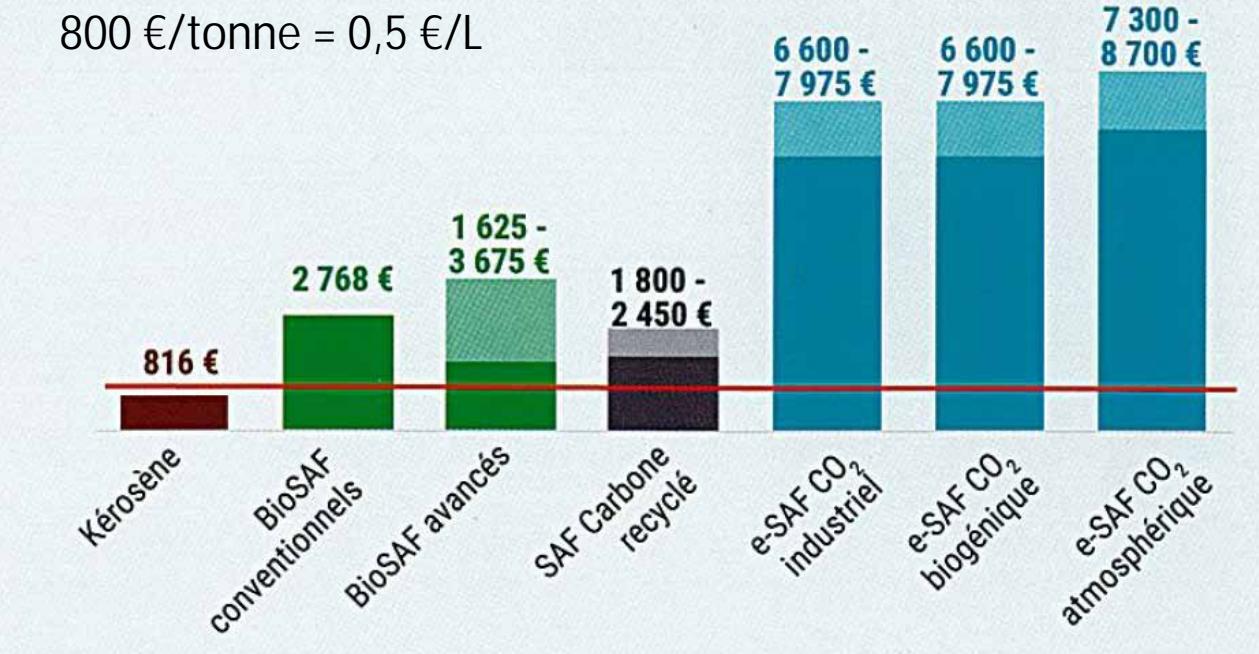


L'équation économique reste incertaine

L'EASA, dans son rapport de 2024 sur les SAF, établi à la demande de la Commission européenne¹, évalue à 2 768 €/t le prix en 2023 des bioSAF produits par voie conventionnelle, les seuls pour lesquels il existe aujourd'hui un marché. Ce prix est à rapprocher du prix du kérosène fossile évalué à 816 €/t (figure 4).

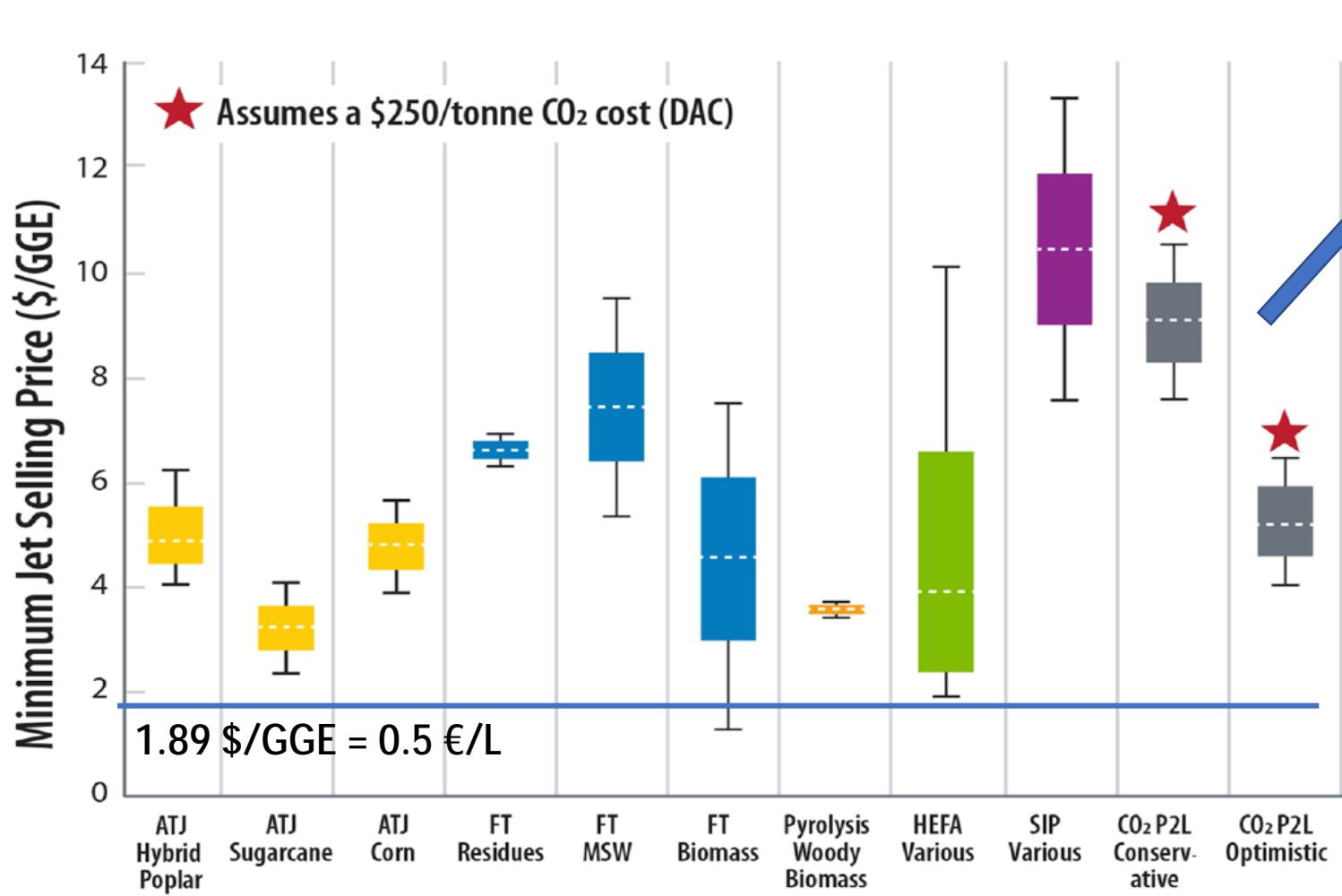
Mais les prix des e-SAF sont beaucoup plus élevés et se situent dans la fourchette 6 600 à 8 700 €/t, soit 8 à 10 fois le prix du kérosène pour des productions en Europe.

$$800 \text{ €/tonne} = 0,5 \text{ €/L}$$



X 8-10

e-kérosène: un coût encore trop élevé



2,7 – 3 €/L
Facteur 6

Table 2 Financial scenarios

Economic parameters

Conservative market case
H₂ price^a (\$ kg⁻¹)
CO₂ price (\$ tonne⁻¹)
Electricity price (\$ kW h⁻¹)

Assumed basis

4.50
40
0.068

Optimistic market case
H₂ price^a (\$ kg⁻¹)
CO₂ price (\$ tonne⁻¹)
Electricity price (\$ kW h⁻¹)

2.00
25
0.02

Conclusions

- § il est peu probable que les e-fuels deviennent bon marché et abondants à court terme. Le prix du C est trop bas pour les rendre compétitifs
- § Il est urgent dans ces conditions de définir des priorités d'usage de ces e-fuels: secteurs vraiment difficiles à décarboner et électrifier (avaiton, industrie,...)
- § La priorité c'est d'électrifier le plus de secteurs possibles (en stimulant la demande électrique au moins autant qu'en installant des capacités massives de production, en particulier intermittentes)

L'ELECTRIFICATION DIRECTE EST PLUS EFFICACE QUE SA
TRANSFORMATION EN E-CARBURANTS



Autres combustibles électriques: e-ammoniac, e-kérosène,..

Marc FONTECAVE

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

SÉMINAIRE :

Daniel Iracane, Membre de l'Académie des technologies
« Défossiliser l'économie : le cas particulier de l'aviation et du
transport maritime »