



Le réseau  
de transport  
d'électricité

# Avenir du système électrique

## Scénarios, équilibre, flexibilités et réseau

---

Nicolas KITTEN

L'école internationale PACA / Manosque - 25 avril 2024

## 1. Le rôle RTE et ses principaux enjeux

- A. La place de RTE dans le système électrique
- B. Les enjeux de la neutralité carbone et de la souveraineté

## 2. Les scénarios prospectifs du mix électrique

- A. Des scénarios qui reposent sur des hypothèses de consommation
- B. Principes de construction des scénarios de mix électriques
- C. Focus sur les scénarios : M1, N1 et N03

## 3. L'équilibre du réseau et le rôle central des flexibilités

- A. Les principes généraux qui gouvernent la gestion du système électrique
- B. Le dimensionnement des flexibilités par scénario
- C. L'évolution nécessaire du réseau quel que soit le scénario

# Le rôle de RTE et ses principaux enjeux

1

.....  
*A. La place de RTE dans le système électrique*

*B. Les enjeux de la neutralité carbone et de la souveraineté*

# La place de RTE dans le système électrique

.....



## PRODUCTION

L'électricité est produite par différentes sources d'énergie, principalement nucléaire et renouvelables, tels l'hydraulique, l'éolien ou le solaire.

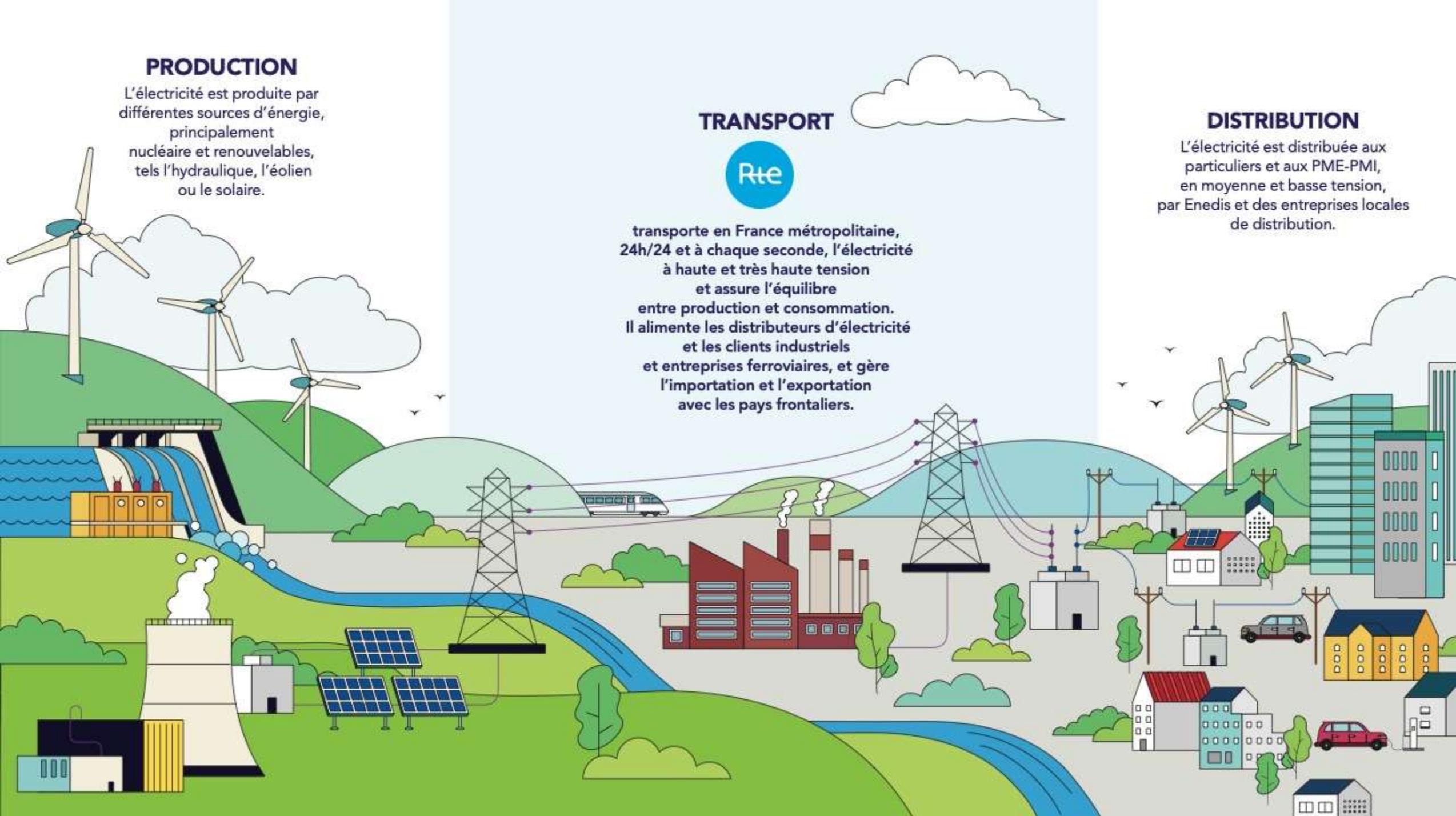
## TRANSPORT



transporte en France métropolitaine, 24h/24 et à chaque seconde, l'électricité à haute et très haute tension et assure l'équilibre entre production et consommation. Il alimente les distributeurs d'électricité et les clients industriels et entreprises ferroviaires, et gère l'importation et l'exportation avec les pays frontaliers.

## DISTRIBUTION

L'électricité est distribuée aux particuliers et aux PME-PMI, en moyenne et basse tension, par Enedis et des entreprises locales de distribution.



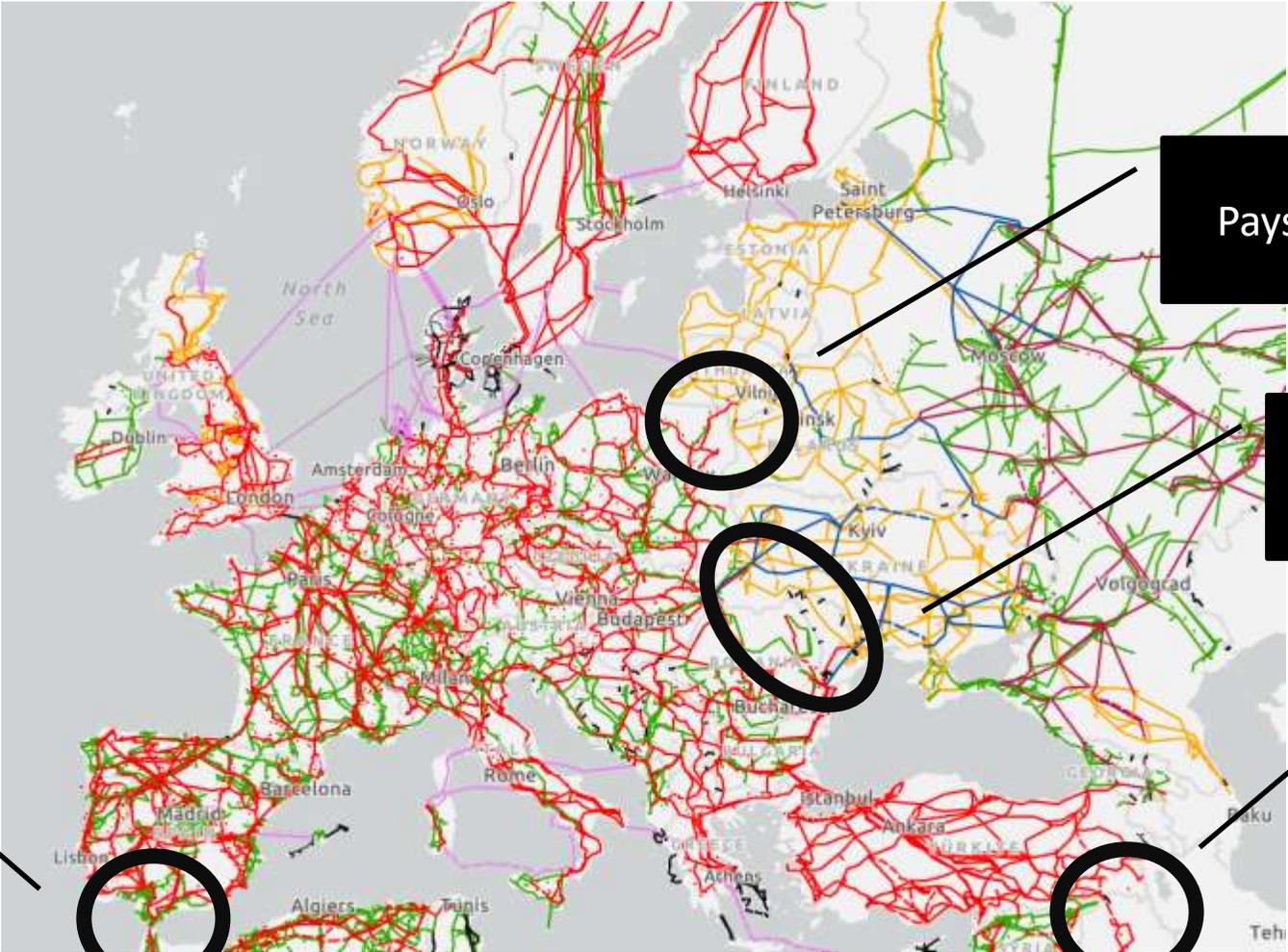
# Notre mission

---

**Assurer les conditions de l'équilibre offre et demande d'électricité.**

- **RTE éclaireur** des choix possibles sur notre avenir énergétique
- **RTE opérateur industriel** en transformant son outil productif au service de la transition énergétique
- **RTE optimisateur** de la transition énergétique en proposant des solutions pour minimiser l'empreinte du réseau de transport, mais aussi du mix électrique français

# Un réseau européen



Maroc

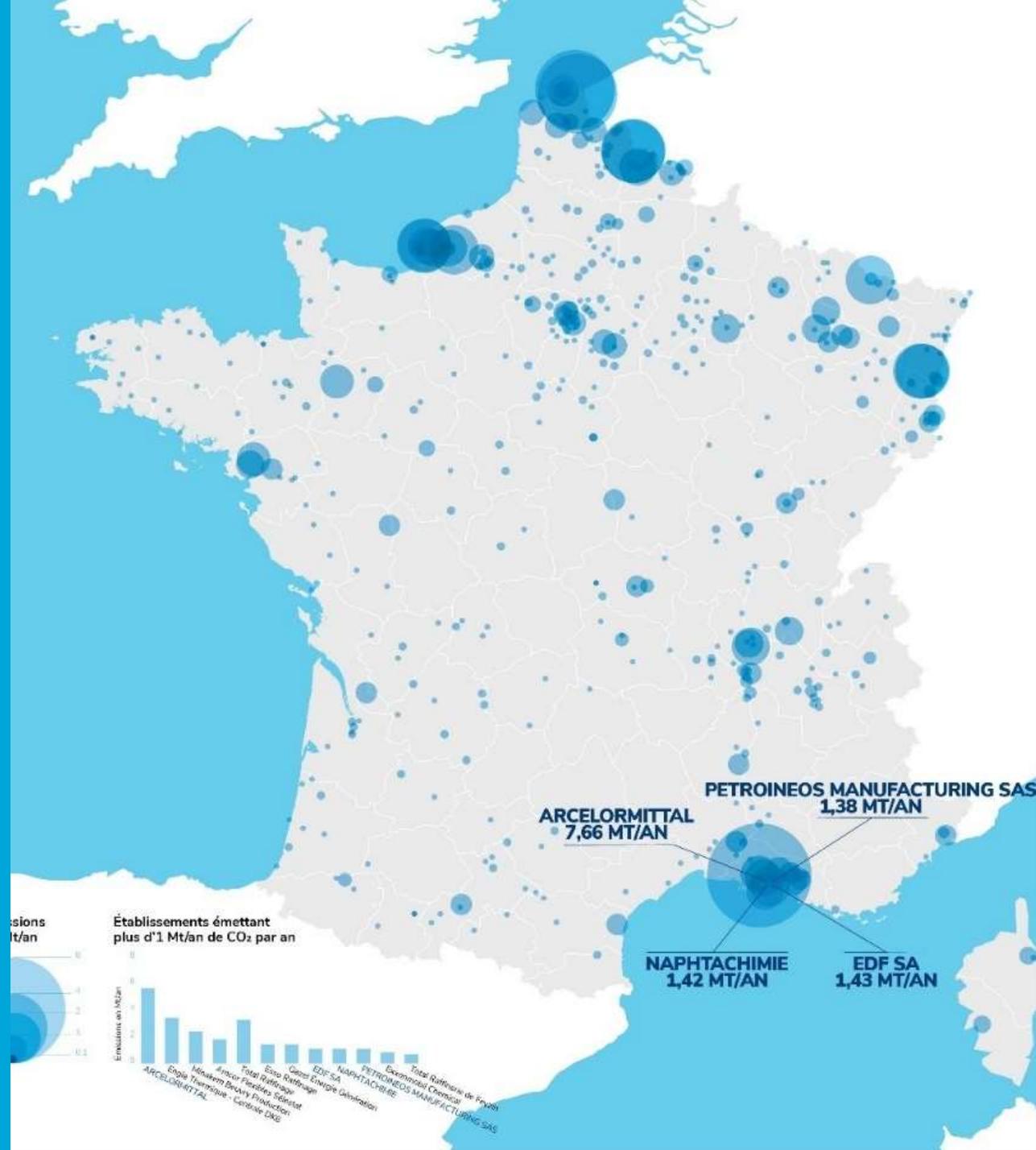
Pays Baltes

Ukraine

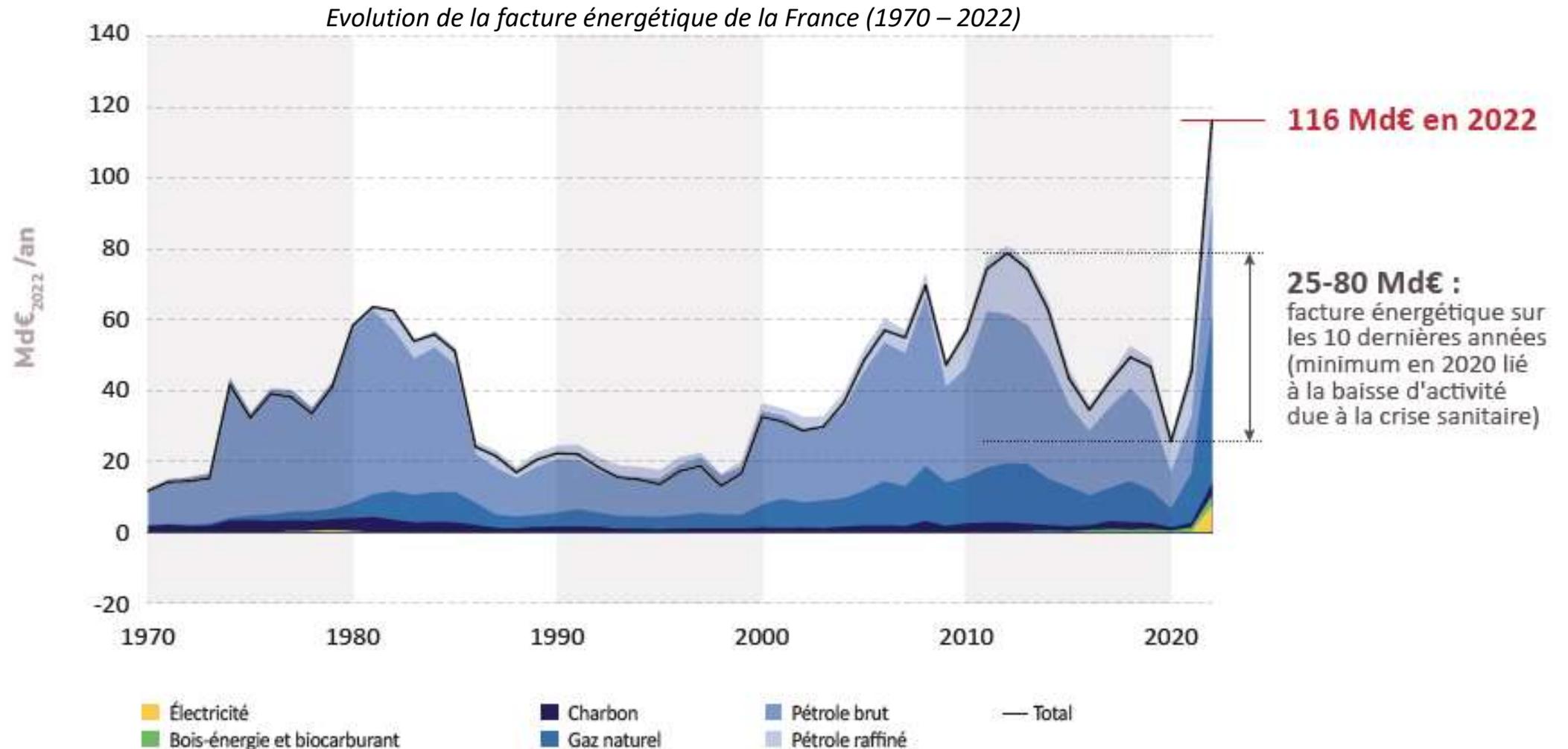
Irak

# Les enjeux de la neutralité carbone et de la souveraineté

.....



# Sortir des énergies fossiles : un impératif pour lutter contre le changement climatique et renforcer la souveraineté énergétique du pays



# Les ambitions de la transition énergétique française

## ➤ Neutralité carbone



Réduire de **55%** les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 (réf. 1990)  
(Fit for 55)



Réduire de **35%** les émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie d'ici 2030 (réf. 2015)

## ➤ Souveraineté énergétique



Atteindre **33%** d'énergie d'origine renouvelable dans la consommation d'ici 2030



Revalorisation du nucléaire dans le mix énergétique français  
(Loi relative à l'accélération du nucléaire du 23 juin 2023)

## ➤ Révision attendue de la stratégie française sur l'énergie et le climat



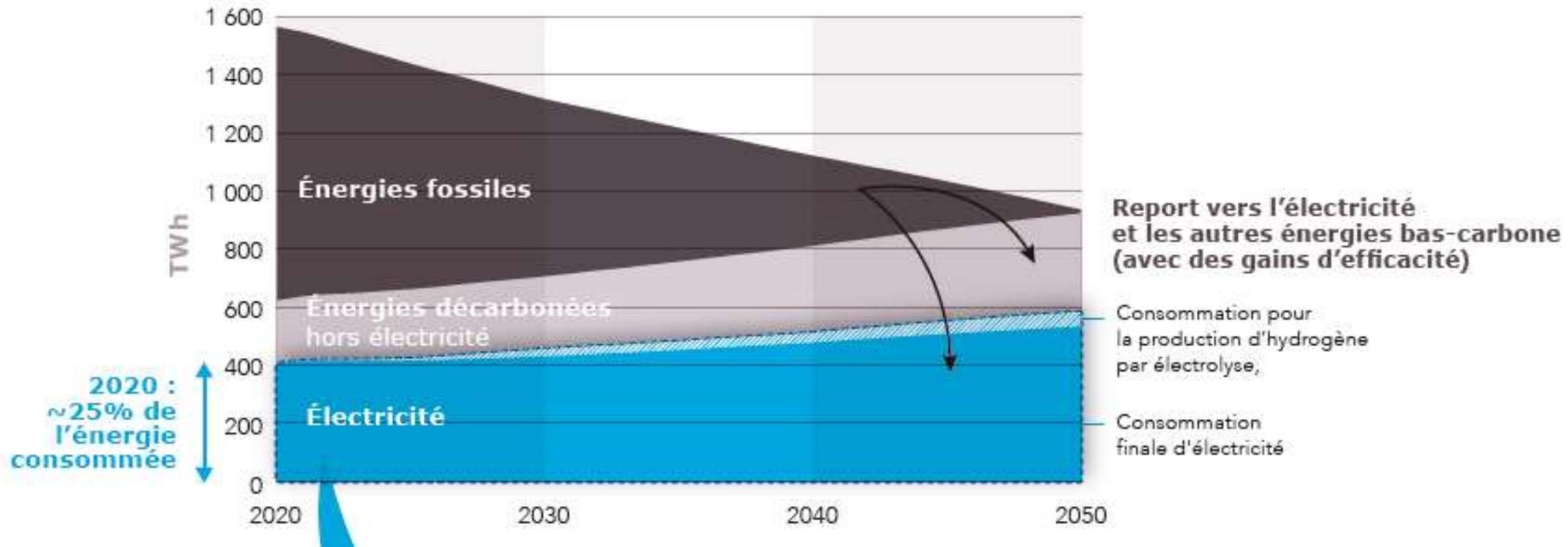
- Loi de programmation énergie climat (LPEC) (1ère édition)
- Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 3e édition)
- Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2024-2033)
- Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC 3e édition)

# La neutralité carbone implique une sortie totale des énergies fossiles d'ici 2050

## Enseignement n° 2

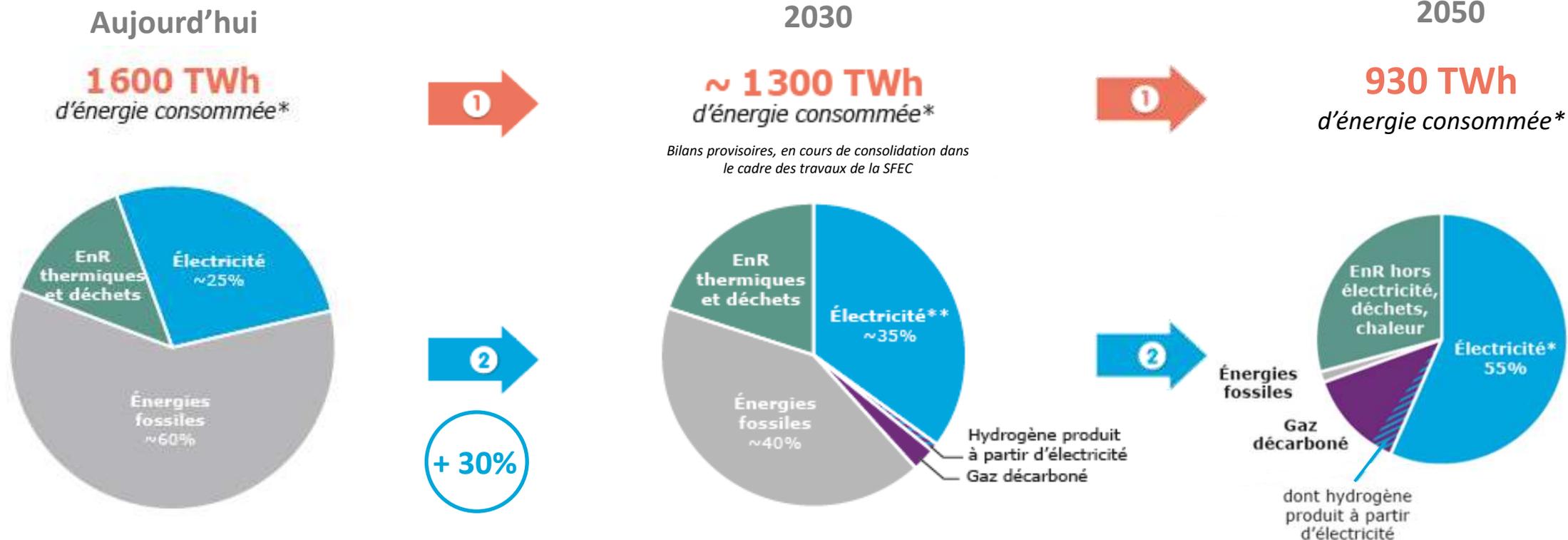
Évolution de la consommation d'énergie et d'électricité dans une perspective de neutralité carbone

Projection de la consommation d'énergie finale en France dans la SNBC



# Les scénarios de RTE proposent différents chemins pour y parvenir

## ① Une réduction de la consommation des énergies



## ② Une augmentation de la part de l'électricité

# Les scénarios prospectifs du mix électrique

## 2

- .....
- A. Les scénarios reposent sur des hypothèses de consommations*
  - B. Principes de construction des scénarios de mix électriques*
  - C. Focus sur les scénarios M1, N1 et N03*

# Les scénarios reposent sur des hypothèses de consommations

.....



# Comment RTE évalue les trajectoires de consommation futures ?

- Veille continue** de RTE, des travaux spécifiques d'exploration des gisements ,etc.
- Reprise des orientations de la **stratégie nationale bas-carbone (SNBC)** adoptée en 2020 : **la consommation d'énergie finale de la France se réduira de 40 % d'ici 2050** par rapport à aujourd'hui.
- Groupes de travail sectoriels** pour élaborer une trajectoire de référence
- Concertation publique** pour adapter, enrichir la trajectoire et identifier les variantes utiles au débat

**Figure 3.3** Démarche de construction de la trajectoire de consommation de référence de l'étude



# Principaux moteurs de l'évolution de la consommation

## Efficacité énergétique et sobriété

### Accroissement de l'efficacité énergétique dans différents secteurs

- **Rénovation** des bâtiments
- Efficacité des **procédés industriels**
- **Diminution de la consommation des appareils**
- **Meilleur pilotage de la consommation**

### Sobriété

- baisse de 1 °C de la **température de chauffe**
- **augmentation du taux d'occupation** moyen des véhicules légers
- **baisse du chauffage**



Augmentation de la **consommation d'électricité**  
(qui se substitue aux énergies fossiles)

### Electrification des usages

- **Remplacement des combustibles fossiles** par deux sources : électricité bas-carbone et biomasse

### Forte hausse de la consommation d'électricité centrée sur 3 secteurs

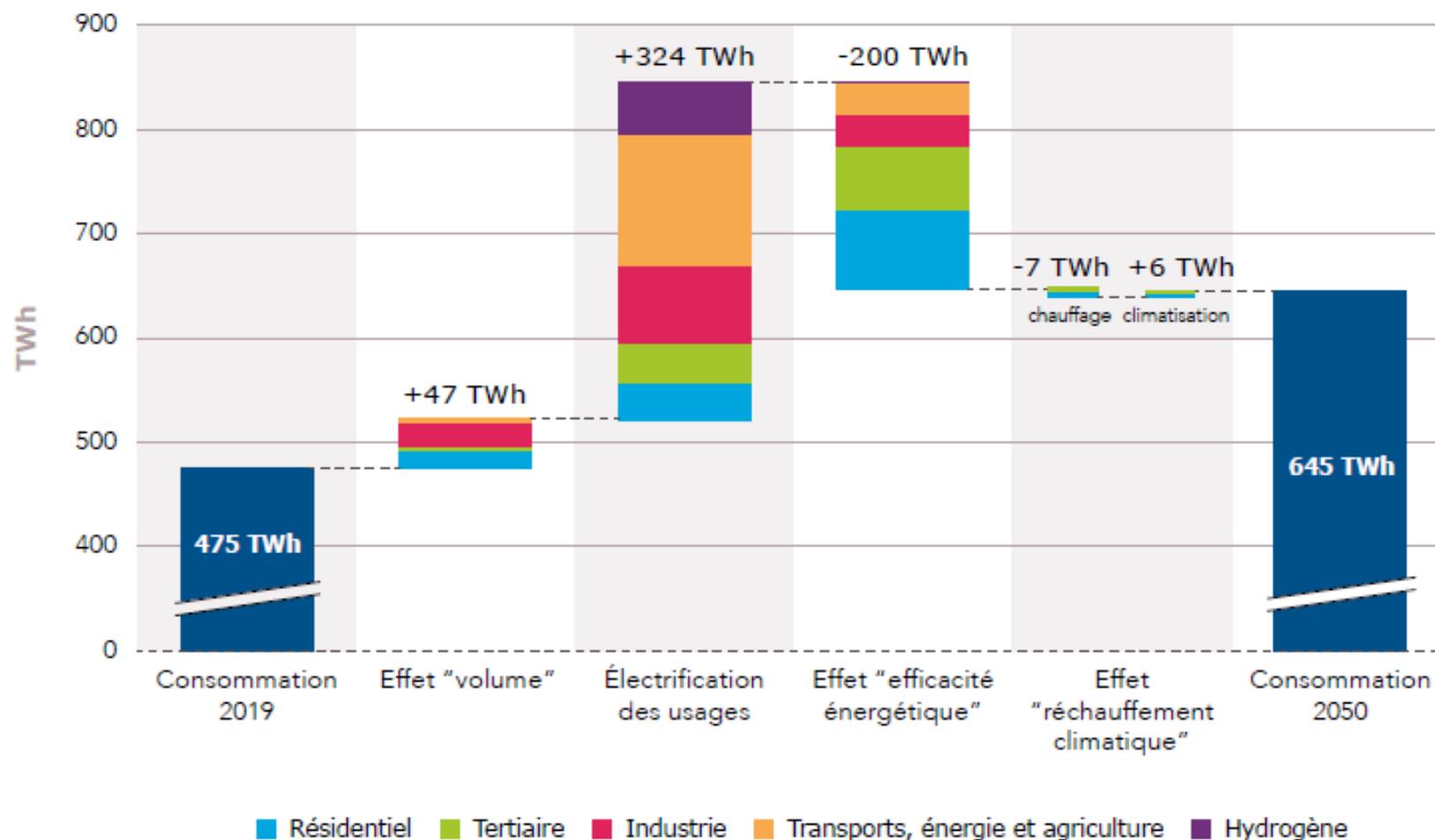
- **Transports** (+85TWh)
- **Industrie** (+65TWh)
- **Production d'hydrogène** (+50TWh)



**Augmentation de la consommation d'électricité  
dans tous les scénarios de consommation**

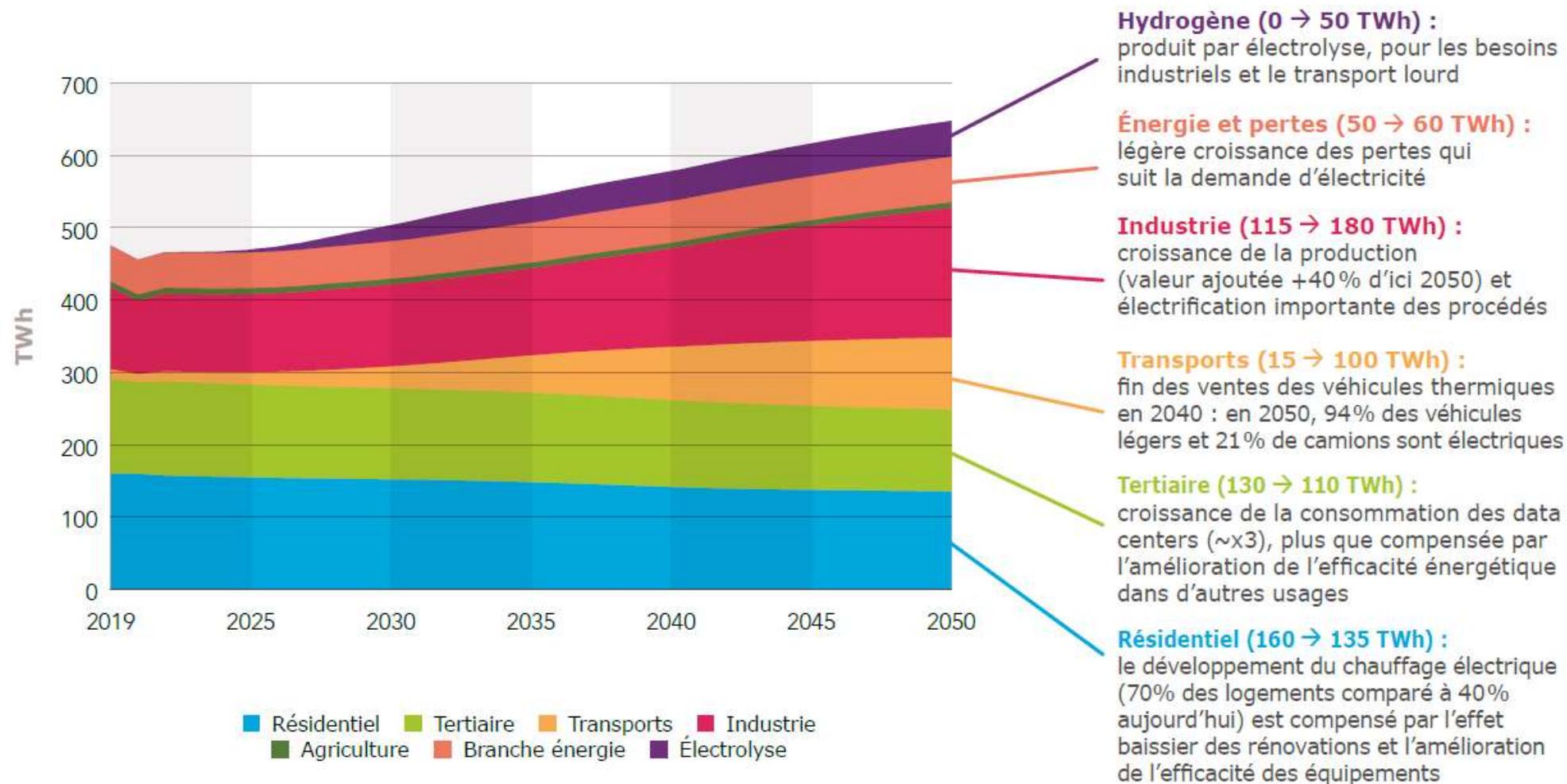
# L'efficacité et la sobriété modèrent la croissance de la consommation

**Figure 3.7** Évolution de la consommation intérieure d'électricité entre 2019 et 2050 dans la trajectoire de référence et décomposition en effets



# Industrie, transports et hydrogène porte la croissance

**Figure 3.5** Évolution de la consommation totale d'électricité dans la trajectoire de référence et décomposition sectorielle



# Principes de construction des scénarios de mix électriques

.....



# Des scénarios de mix électrique divergents mais fondés sur des principes communs

## Méthodologie / les principes initiaux qui lient les différents scénarios



Les scénarios permettent **d'atteindre la neutralité carbone** dans le respect de la sécurité d'approvisionnement : même trajectoire de consommation



Les scénarios ne doivent pas reposer sur des importations massives d'énergie  
Ni pour l'électricité, ni pour les combustibles bas-carbone.



Le mix de production est dimensionné de manière à **couvrir la consommation annuelle d'électricité projetée**



Tous les scénarios et variantes **respectent la sécurité d'approvisionnement** et comprennent un **bouquet de flexibilité**

# Différentes temporalités à court et moyen terme

## D'ici 2030



L'accroissement de la production décarbonée reposera essentiellement sur **les renouvelables terrestres**



La **sobriété** des gestes simples et la prolongation de mesures mises en place à l'hiver 2022/2023 produisent un effet rapidement sur la maîtrise de la consommation

## Entre 2030 et 2035



Un relais de croissance peut être assuré par **l'éolien en mer** (objectif 18 GW en 2035) si les appels d'offres sont lancés entre aujourd'hui et 2025



Les effets de la montée en cadence du rythme et de l'efficacité des rénovations peuvent se faire sentir à moyen terme, de même que les potentielles inflexions vers des modes de vie plus sobres

## Au-delà de 2035

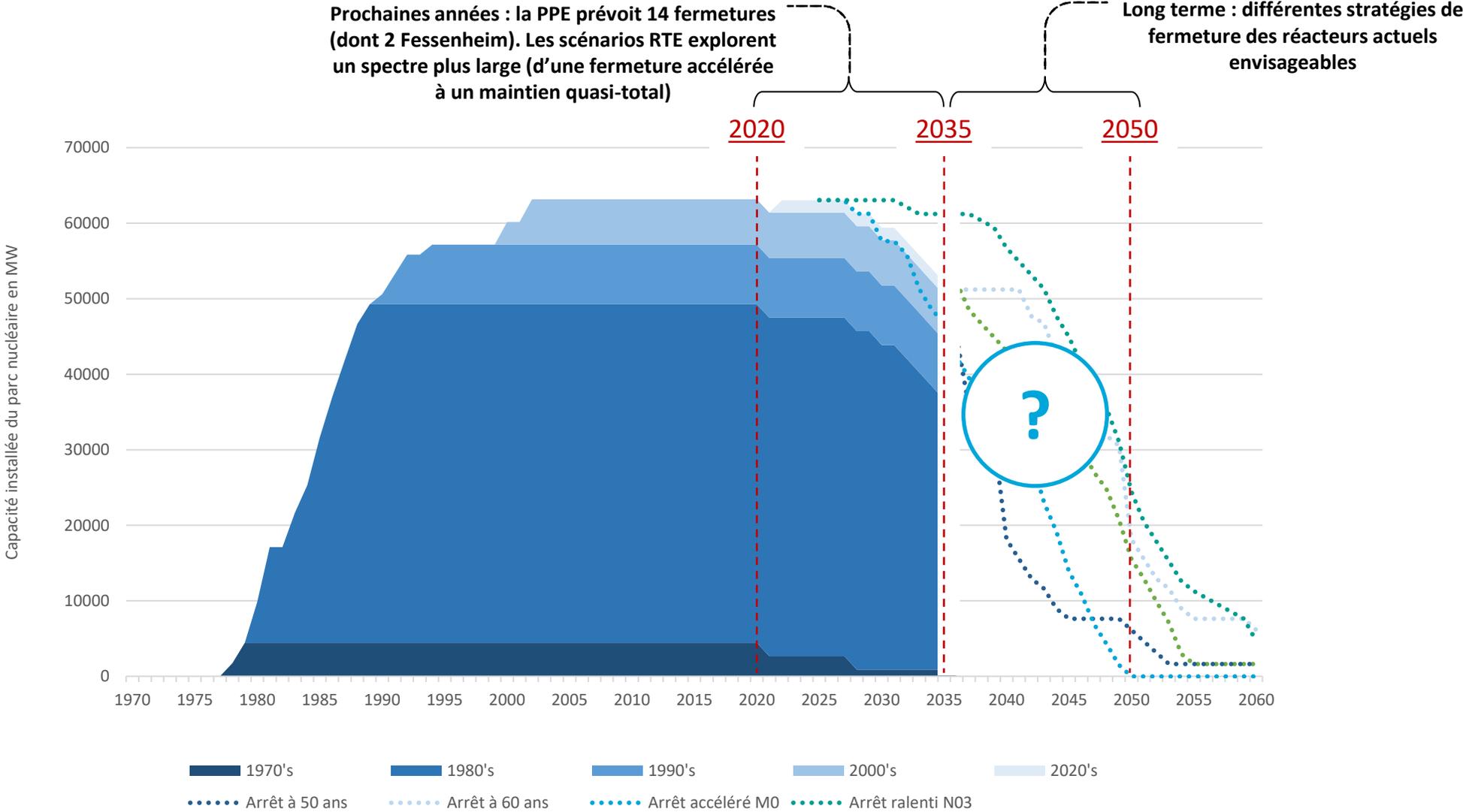


**Les nouveaux EPR2** apporteront leur contribution à la production nationale (en intégrant la perspective de fermetures de réacteurs à 60 ans)



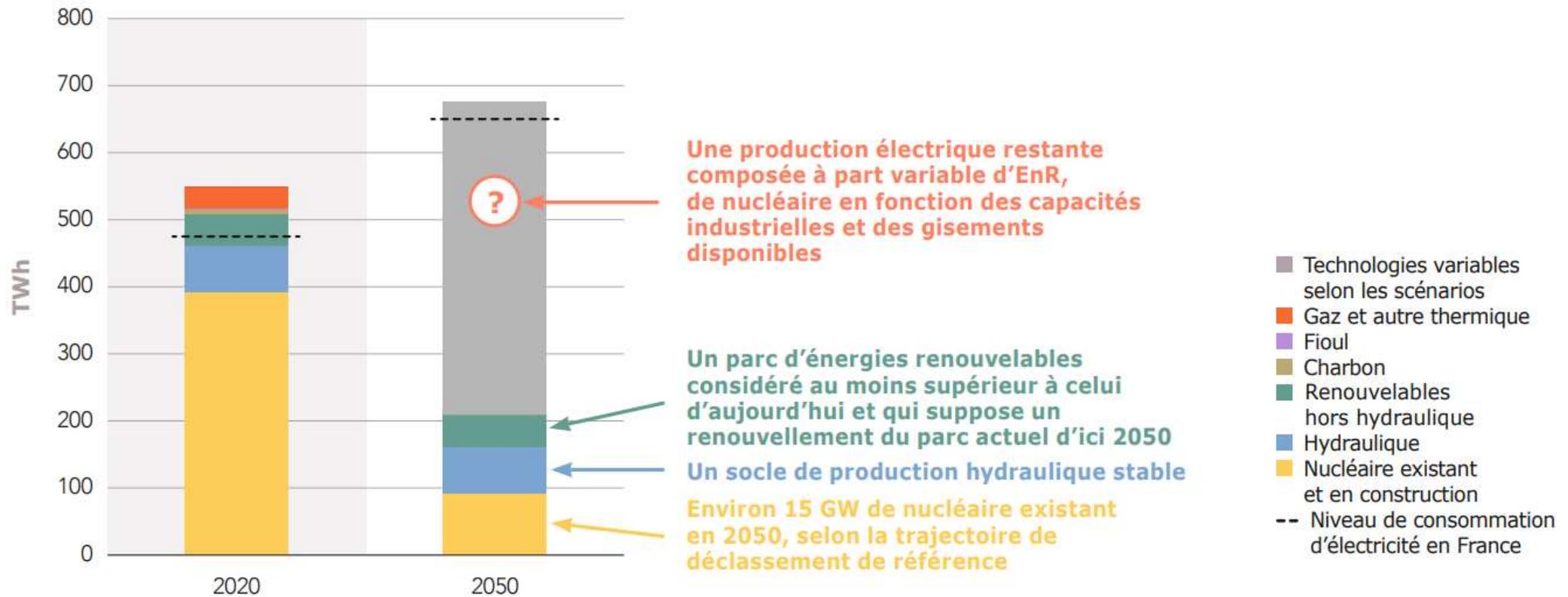
Des gisements supplémentaires sont accessibles en fonction des choix collectifs sur les modes de vie et d'organisation (évolution de l'organisation collective, développement d'offres sobres...)

# Un point commun : gérer le vieillissement du parc nucléaire



# Des scénarios prospectifs pour explorer le champ des possibles

**Figure 4.1** Perspectives d'évolution de la production d'électricité entre 2020 et 2050



# Six scénarios de mix électrique complétés par des variantes

## Deux familles de scénarios



Les nouveaux investissements portent **uniquement sur les énergies renouvelables**.  
Le **nouveau nucléaire** n'est pas envisagé.

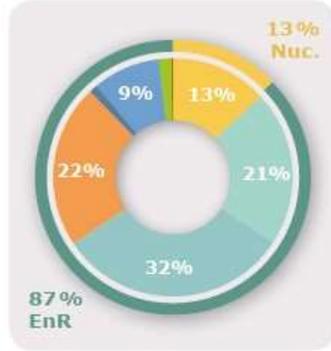
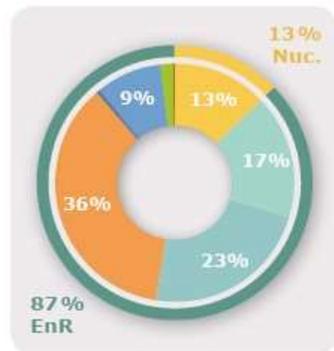


Prévoient une **combinaison d'énergies renouvelables** et de **nouveaux réacteurs nucléaires**

**M0**  
100 % EnR  
en 2050

**M1**  
EnR répartition  
diffuse

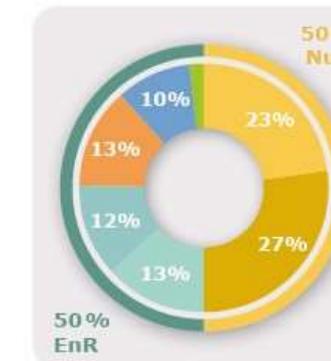
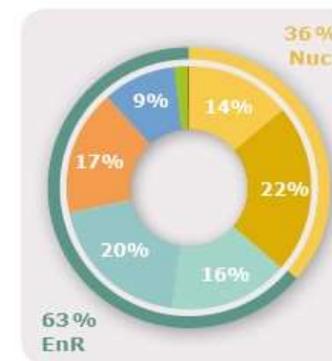
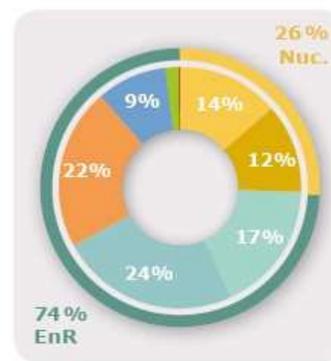
**M23**  
EnR grands parcs



**N1**  
EnR + nouveau  
nucléaire 1

**N2**  
EnR + nouveau  
nucléaire 2

**N03**  
EnR + nouveau  
nucléaire 3

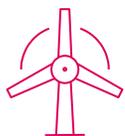


# Focus sur les scénarios M1, N1 et N03

.....



# Scénario M1 : vers 100% renouvelable avec une répartition diffuse

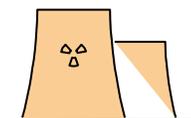


**Photovoltaïque** Très important  
**Éolien Terrestre** modéré

**Réparties de manière diffuse sur le territoire national**  
ce qui différencie ce scénario avec le scénario M23 qui prévoit la création de grands parcs

**Éolien en mer** : ambitieux mais plus limité que pour d'autres scénarios

**100%**

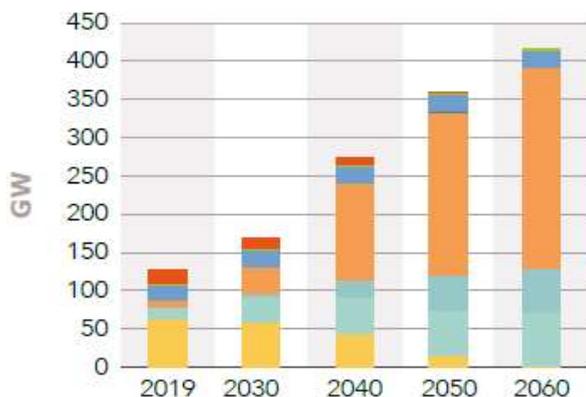


Sortie du nucléaire qui n'est pas immédiate : horizon 2060

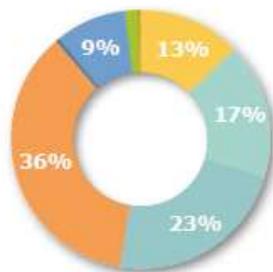
## Scénario M1 : Répartition diffuse

### Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



Bilan énergétique annuel en 2050



(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	16 GW / 91 TWh
Nouveau nucléaire	-
Éolien terrestre	59 GW / 119 TWh
Éolien en mer	45 GW / 162 TWh
Photovoltaïque	214 GW / 255 TWh
Énergies marines	1 GW / 3 TWh
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	0,5 GW / 0,5 TWh

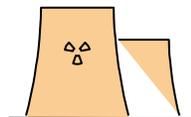
# Scénario N1 : énergies renouvelables + 2 EPR /5ans



Un nécessaire **développement soutenu des énergies renouvelables**

Justifié car le programme du nouveau nucléaire ne suffit pas à compenser la fermeture des centrales nucléaires existantes

**74%**



**Nouveau nucléaire : deux EPR tous les 5 ans**  
8 réacteurs d'ici 2050

Le développement **doit être engagé dès maintenant** pour permettre la mise en service de nouveau réacteurs en 2035

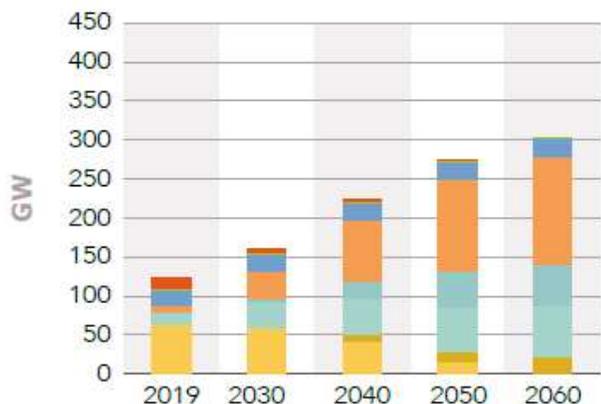
Des réacteurs construits par paire sur des sites existants

**26 %**

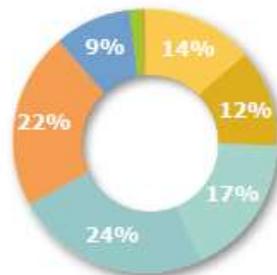
## Scénario N1 : Énergies renouvelables + nouveau nucléaire 1

### Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



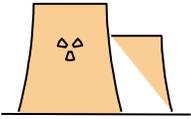
Bilan énergétique annuel en 2050



(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	16 GW / 92 TWh
Nouveau nucléaire	13 GW / 90 TWh
Éolien terrestre	58 GW / 117 TWh
Éolien en mer	45 GW / 160 TWh
Photovoltaïque	118 GW / 144 TWh
Énergies marines	-
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	0,5 GW / 0,5 TWh

# Scénario N03 : une part maximale de nucléaire (50%)



Une part du nucléaire durablement importante dans ce scénario fondé sur 3 piliers

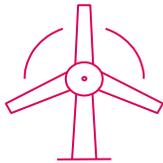
50%

Une **prolongation de la durée de vie** de tous les réacteurs actuels dans le respect des normes de sûreté

La prolongation de quelques **réacteurs au-delà de 60 ans** d'exploitation

Un **rythme de construction** des EPR2 poussé au maximum

La possibilité de **développer d'autres types de réacteurs** comme les SMR



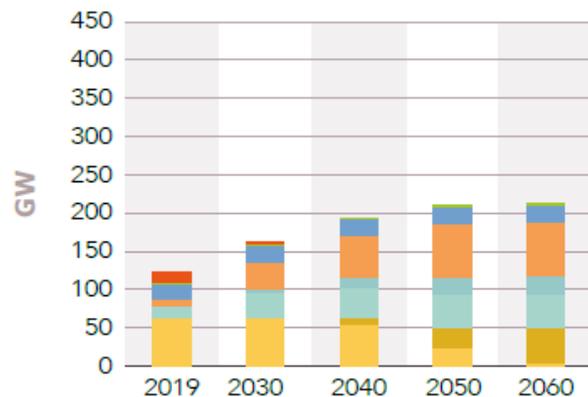
**Développement des énergies renouvelables** : un développement nécessaire mais à un rythme inférieur à celui de tous les autres scénarios

50%

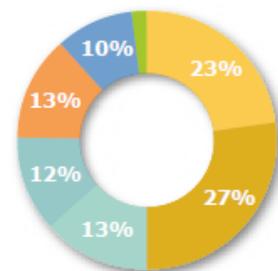
## Scénario N03 : Énergies renouvelables + nouveau nucléaire 3

### Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



Bilan énergétique annuel en 2050



(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	24 GW / 149 TWh
Nouveau nucléaire	27 GW / 189 TWh
Éolien terrestre	43 GW / 87 TWh
Éolien en mer	22 GW / 78 TWh
Photovoltaïque	70 GW / 86 TWh
Énergies marines	-
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	-

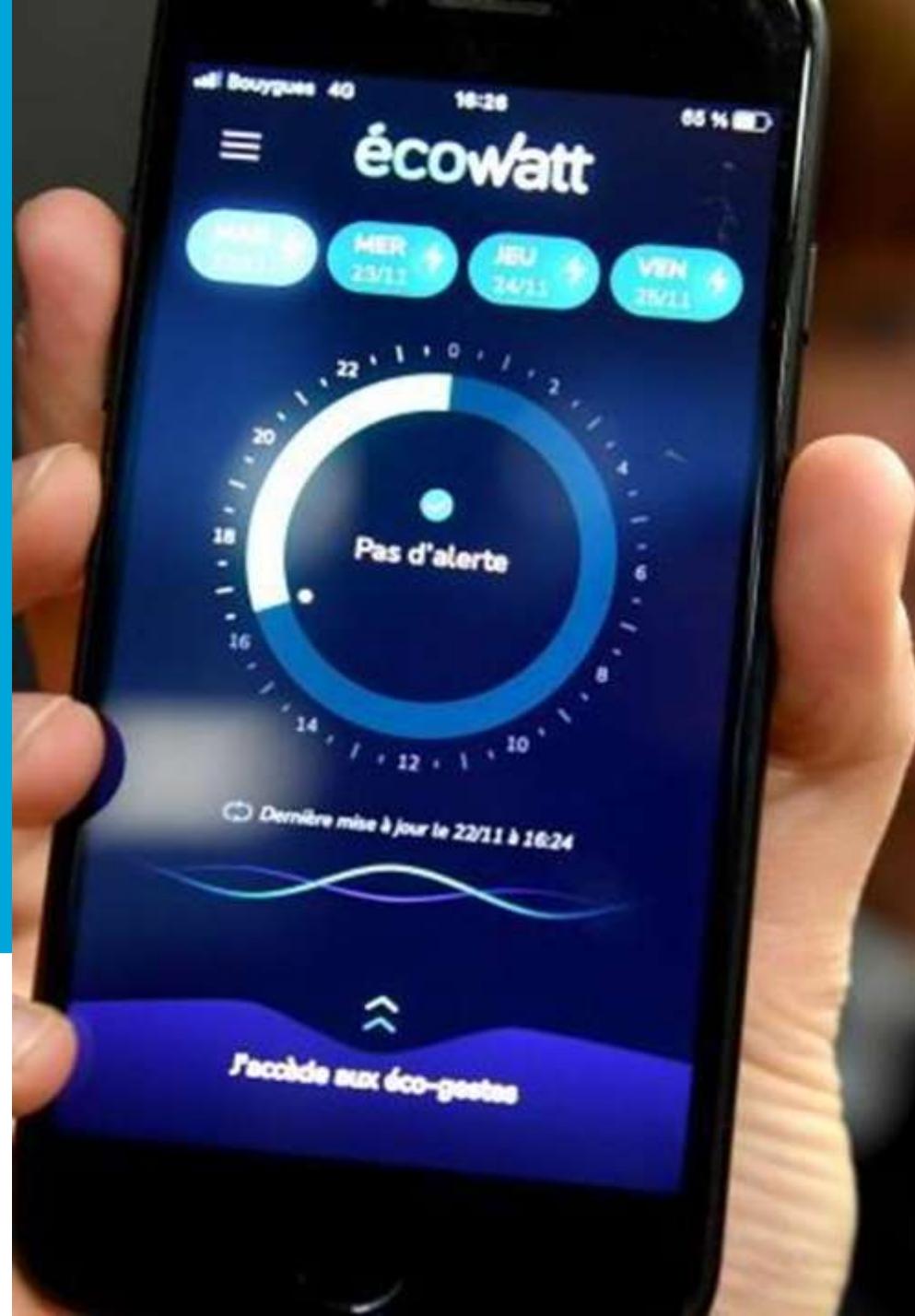
# La gestion de l'équilibre du réseau et le dimensionnement central des flexibilités

## 3

- A. Les principes généraux qui gouvernent la gestion du système électrique*
- B. Le dimensionnement des flexibilités par scénario*
- C. L'évolution nécessaire du réseau quel que soit le scénario*

# Les principes généraux qui gouvernent la gestion du système électrique

.....

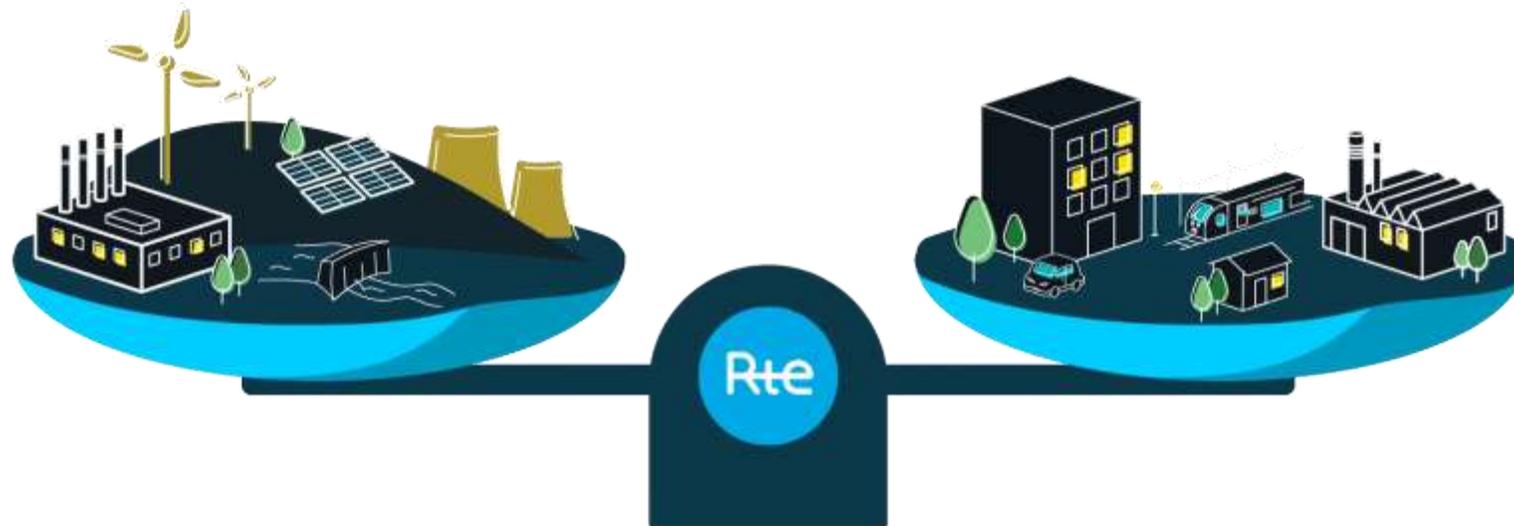


# Le nécessaire équilibre de la production et de la consommation

---

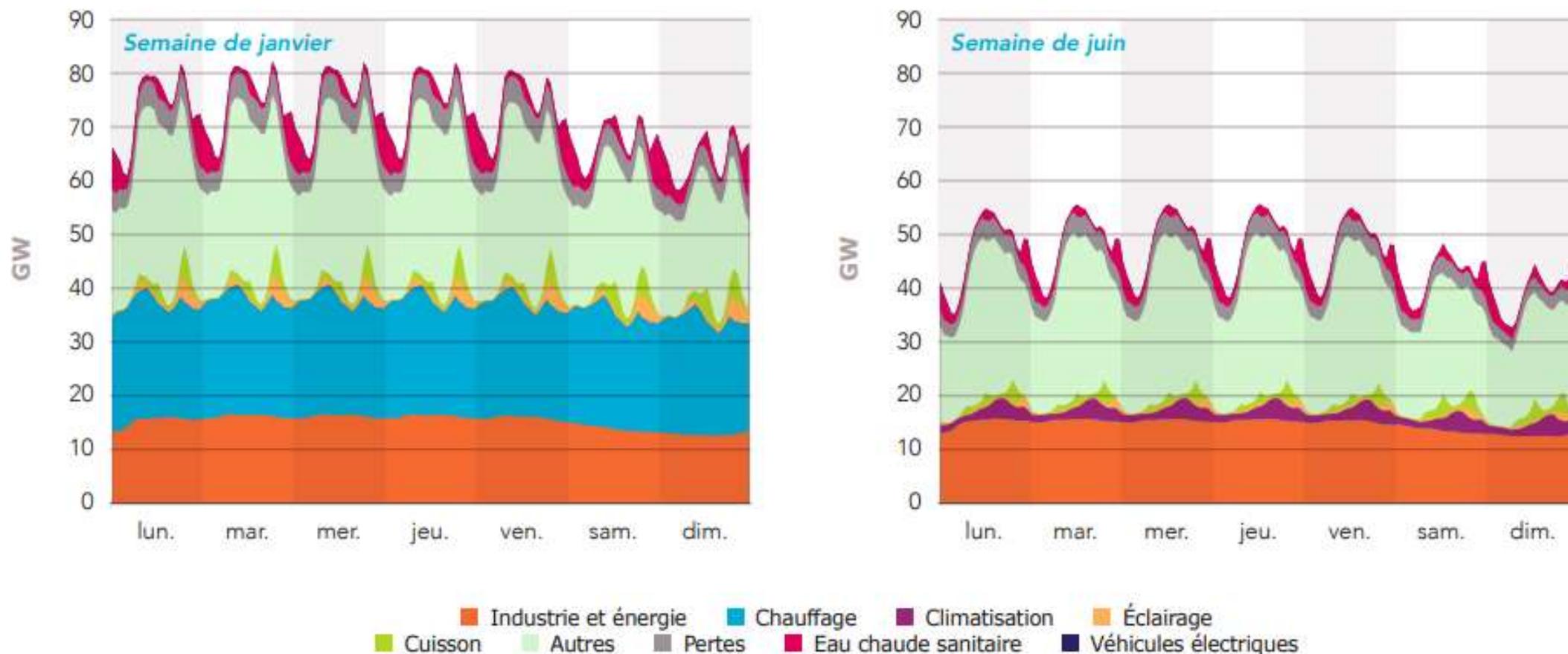
- Cet équilibre est nécessaire à chaque instant (50Hz)
  - 24h/24, 7j/7
  - Bon fonctionnement des centrales de production... et des horloges
- Le stockage de l'électricité consomme ou produit alternativement

Équilibre  
Production / Consommation



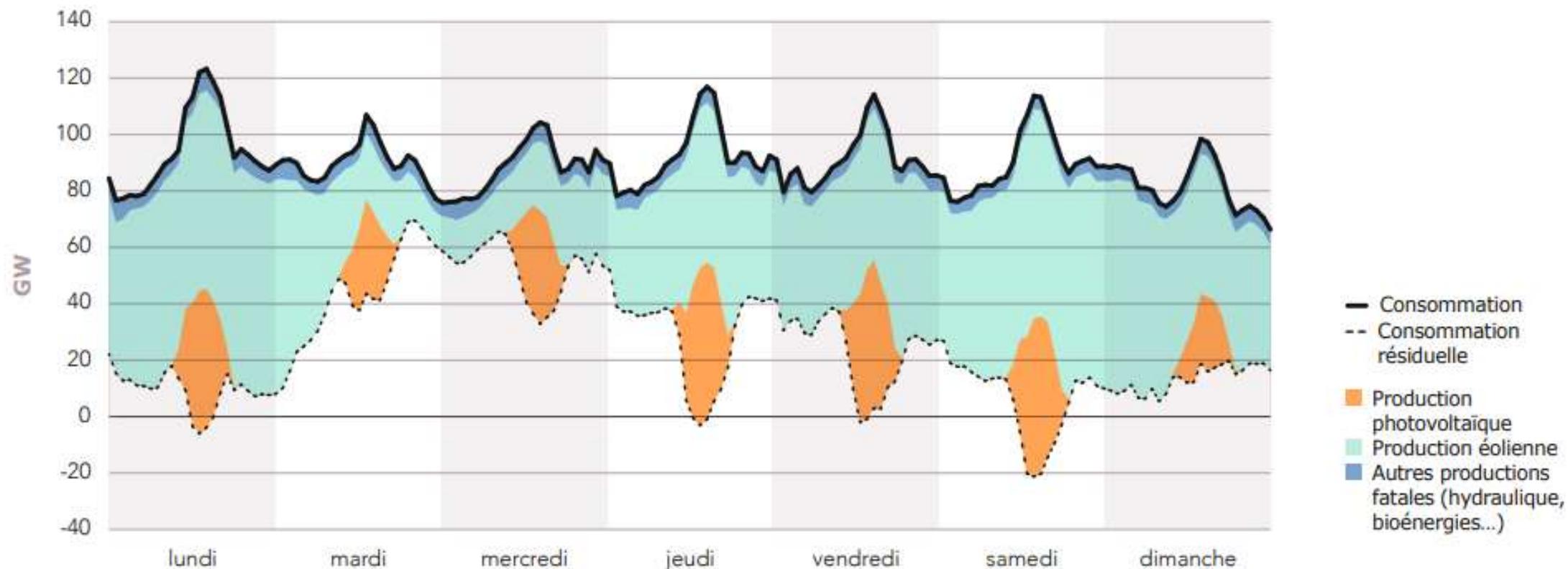
# Une consommation au profil quotidien et hebdomadaire

**Figure 3.35** Profil hebdomadaire de la consommation par usages aujourd'hui (à températures de référence)



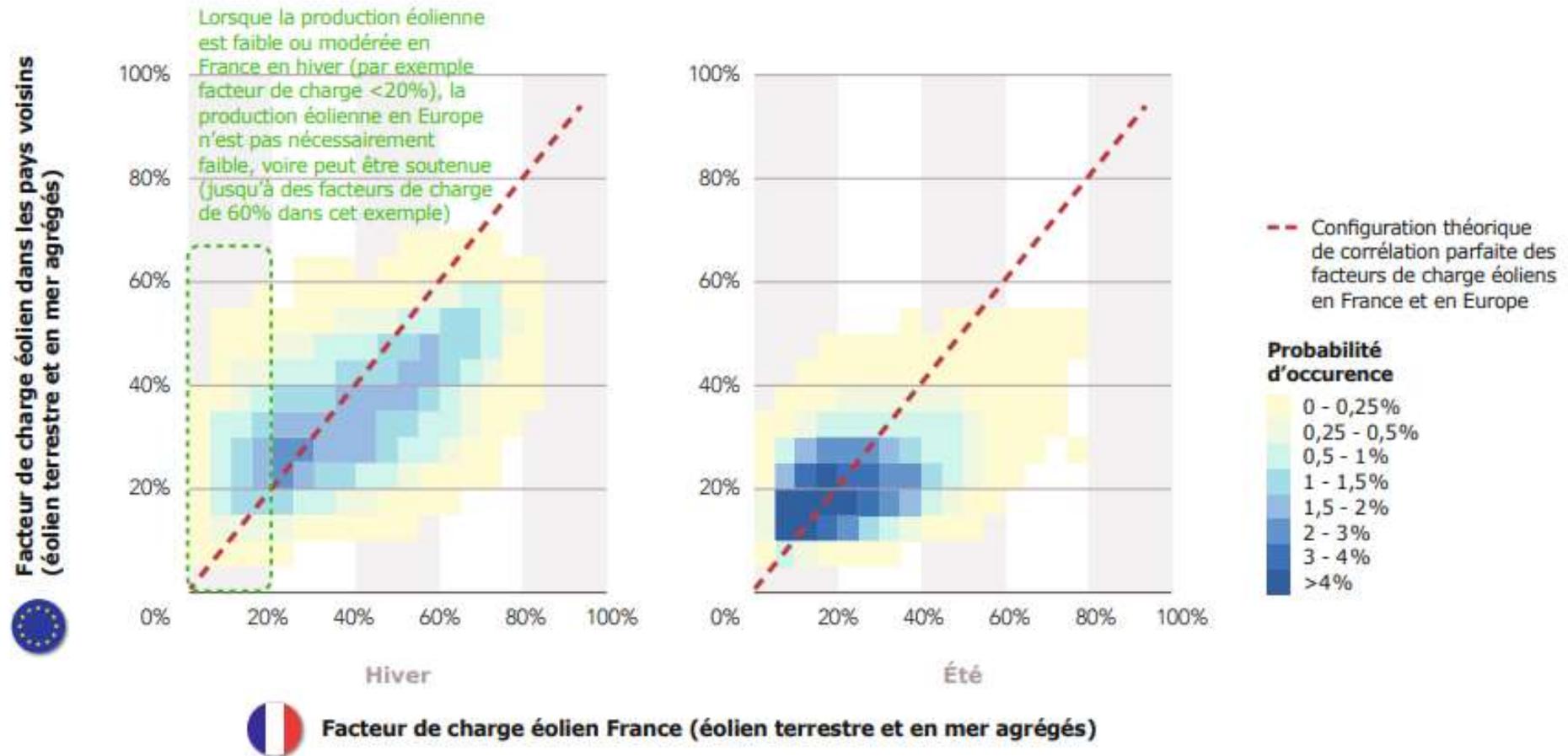
# Une consommation résiduelle plus volatile demain

**Figure 3.44** Écart entre consommation totale et consommation résiduelle



# Les capacités d'échange entre pays européens participent de la sûreté

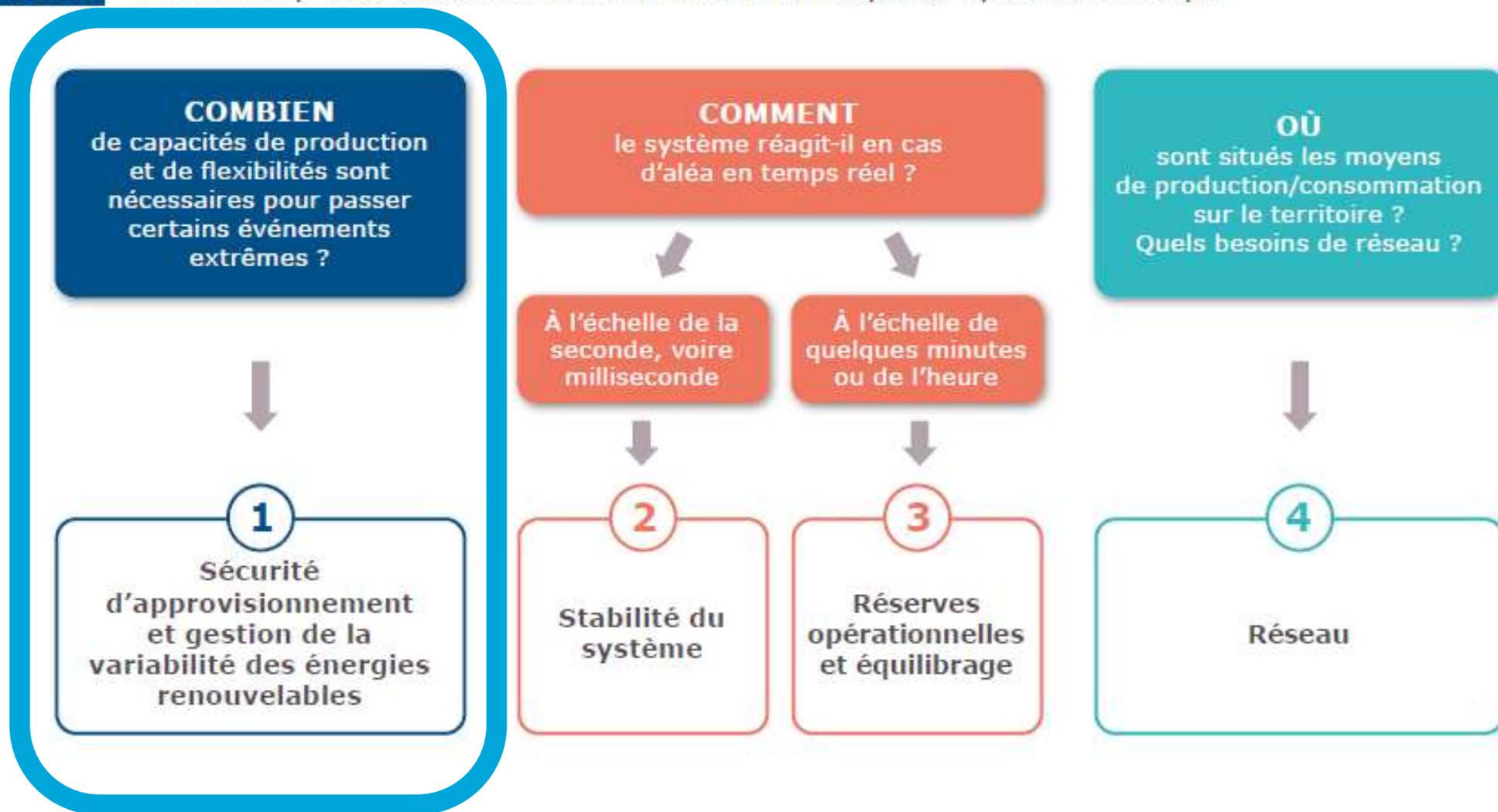
**Figure 7.10** Probabilité d'occurrence sur les facteurs de charge de l'éolien en France et dans les pays voisins



Le foisonnement de la consommation et de la production renouvelable variable est important à l'échelle européenne et réduit de l'ordre de 15% le besoin en flexibilités.

# Les différents enjeux du système électrique

**Figure 7.1** Problématiques associées au fonctionnement technique du système électrique



# Les scénarios de neutralité carbone nécessitent TOUS le développement de « flexibilités »

## Flexibilités - Besoin de capacité

Production /stockage / consommation pilotable nécessaire pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande en puissance à chaque instant

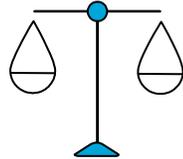


## Besoin en énergie

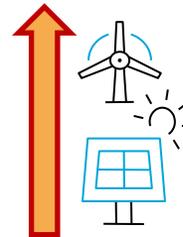
Quantités annuelles nécessaires pour couvrir la consommation



Variabilité de la demande



Variabilité de l'offre



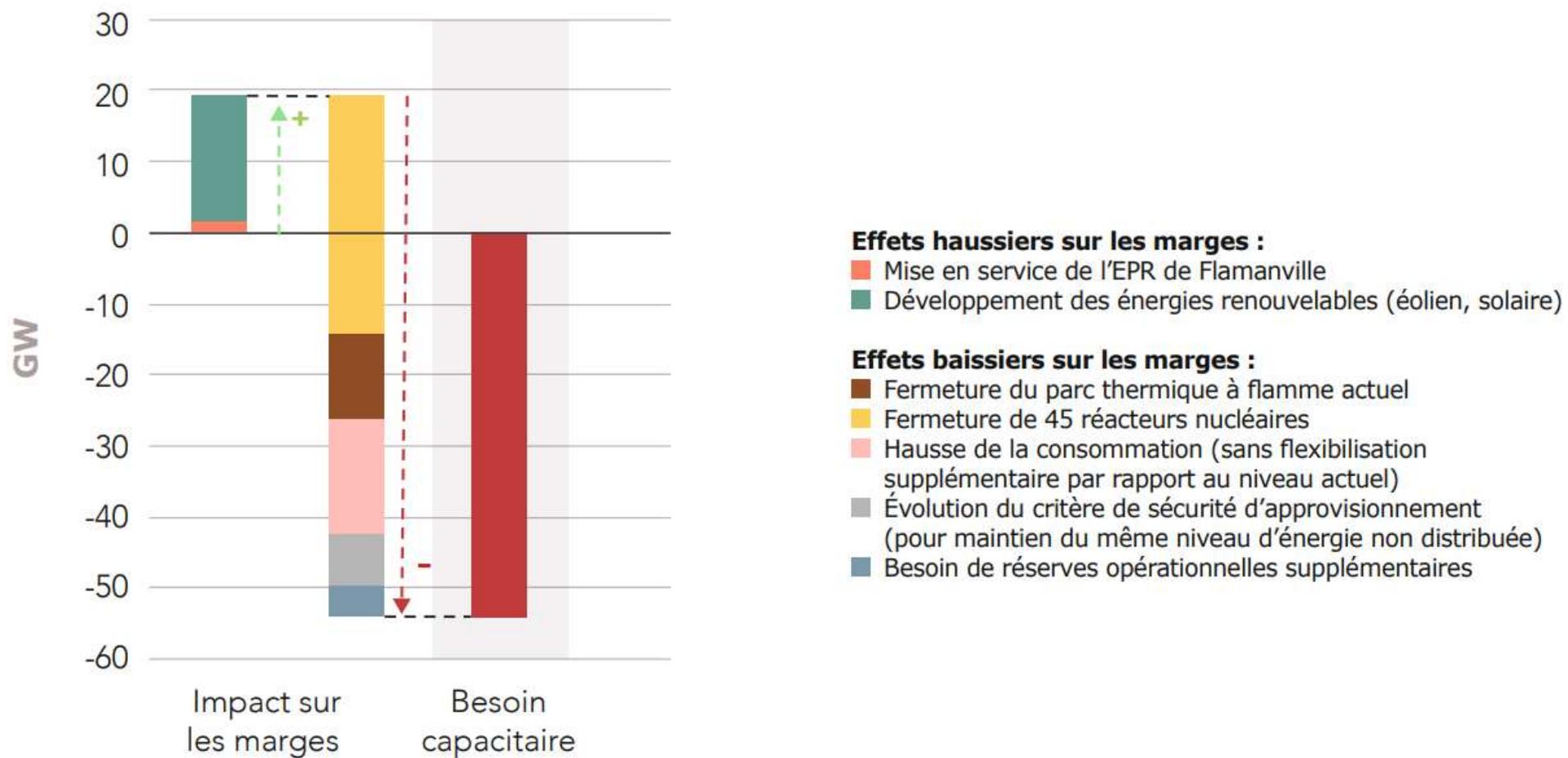
La demande n'est pas stable et peut varier fortement créant des pics et des creux de consommation

Va augmenter avec l'augmentation des énergies renouvelables dans le mix

Qui ne produisent pas en continu et dépendent des aléas météorologiques

# Un besoin en flexibilité qui dépend de l'avenir du nucléaire

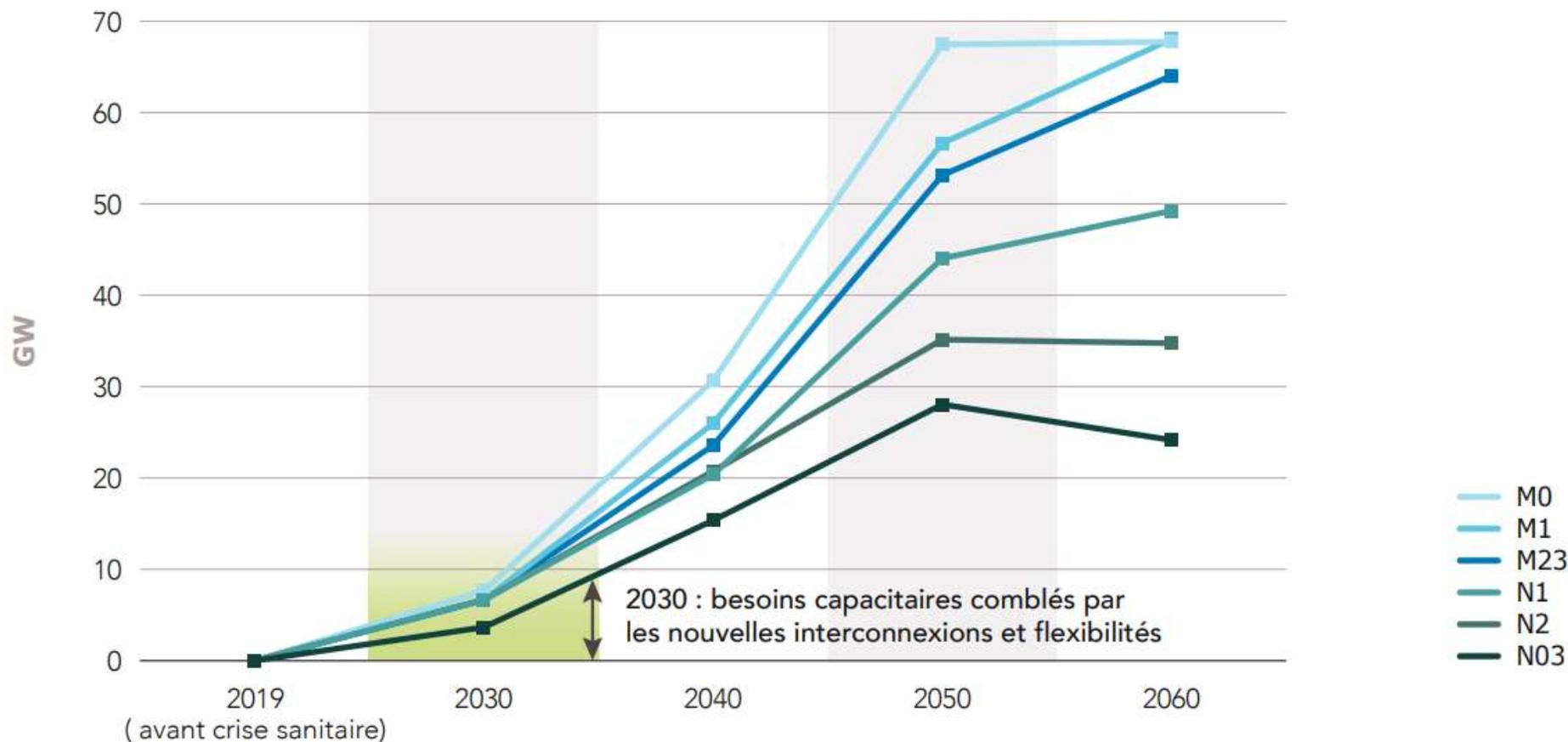
**Figure 7.6** Détail de l'évolution des besoins capacitaires dans le scénario M23 à l'horizon 2050<sup>5</sup>



# Entre 28 et 68 GW de besoins complémentaires en flexibilité

**Figure 7.5**

Besoins de nouvelles capacités pour assurer la sécurité d'approvisionnement aux différents horizons et dans les différents scénarios<sup>5</sup>



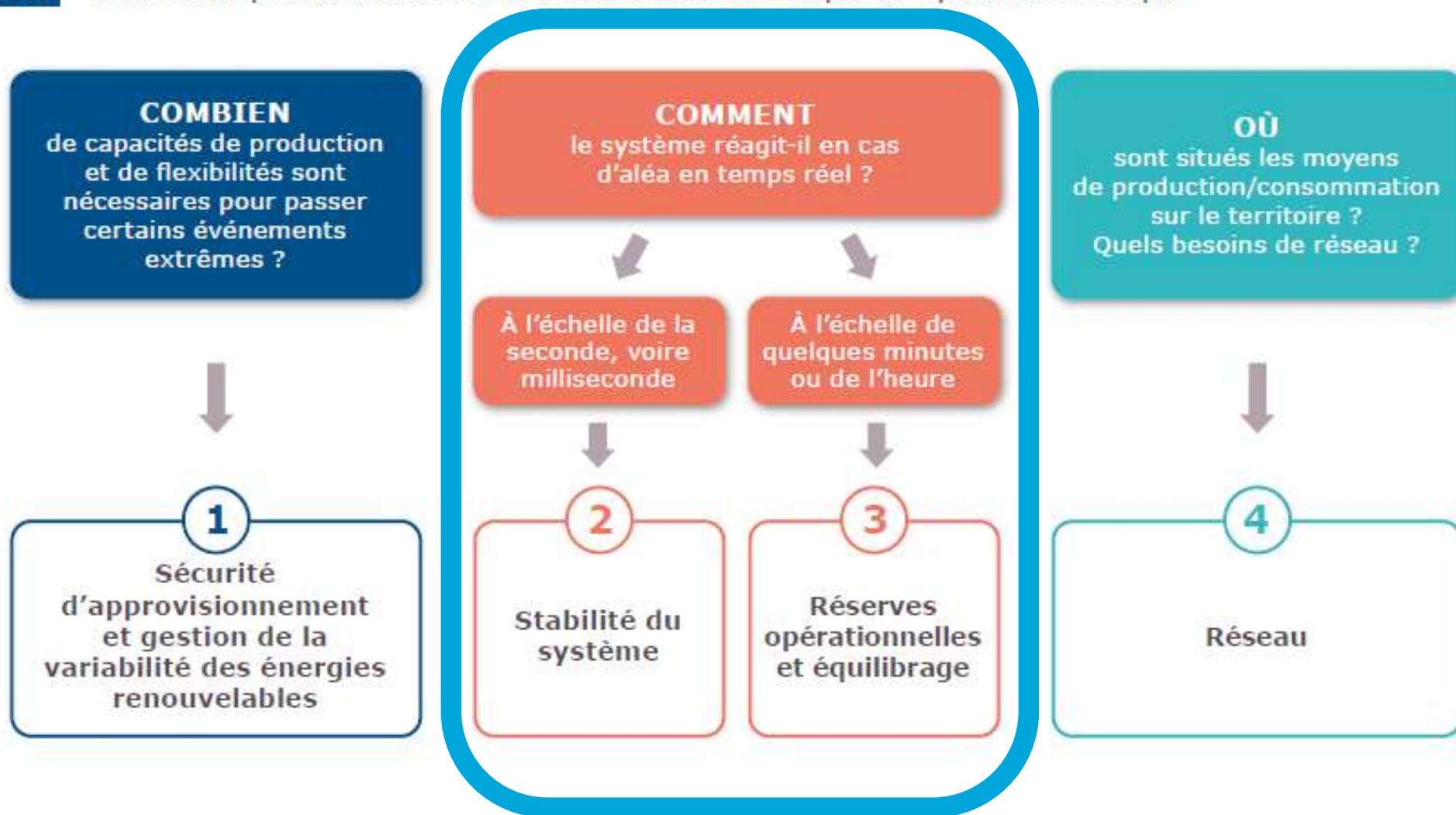
# Le dimensionnement des flexibilités par scénario

.....



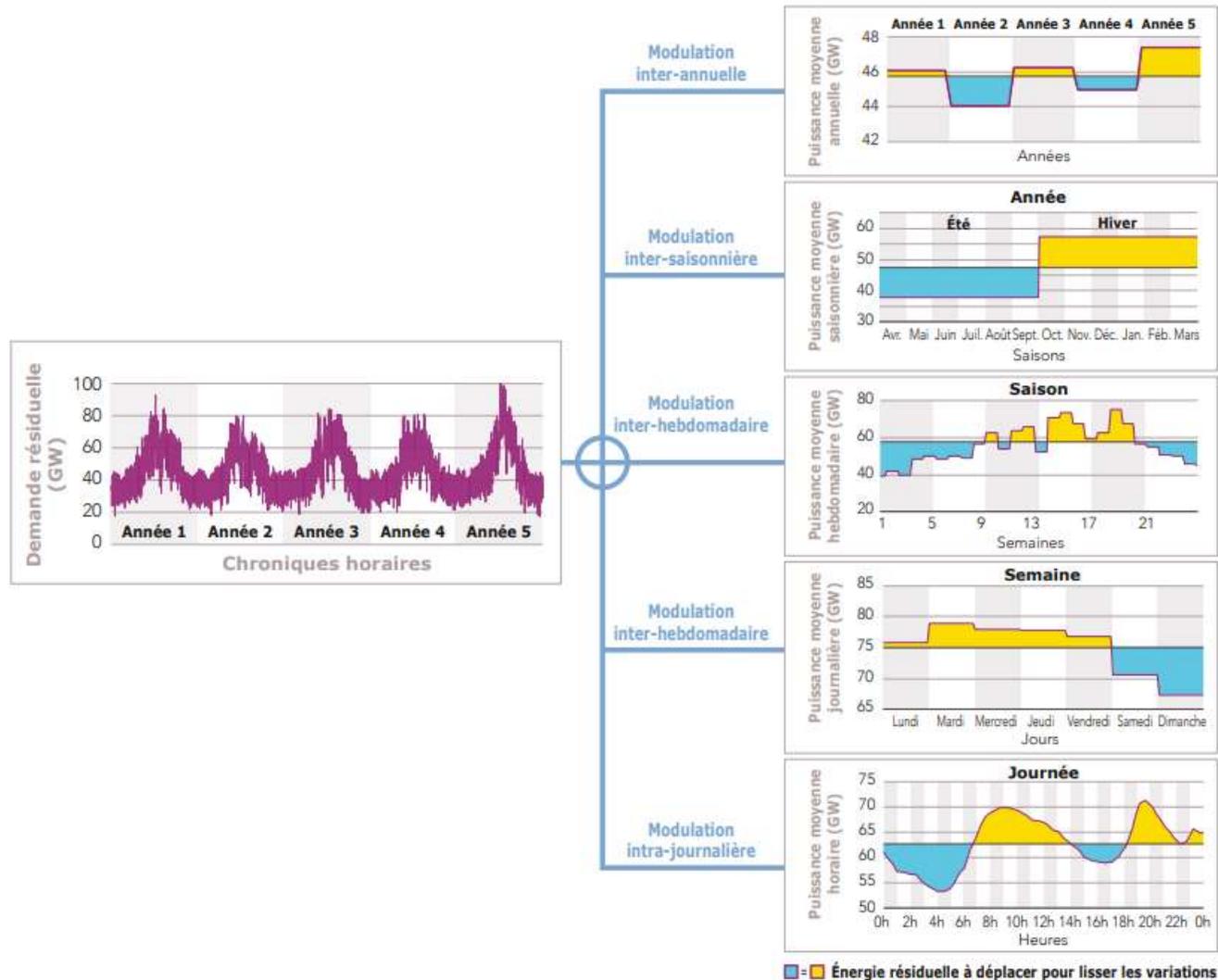
# Les différents enjeux du système électrique

**Figure 7.1** Problématiques associées au fonctionnement technique du système électrique



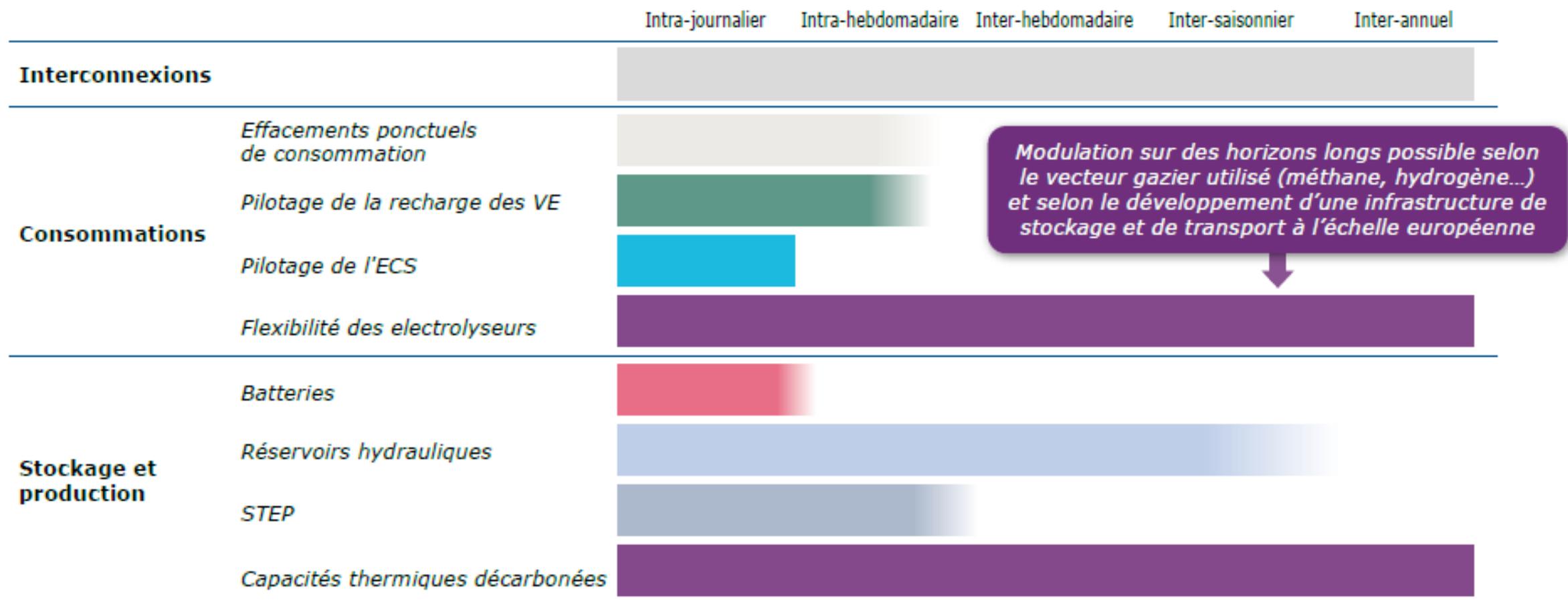
# Des besoins en flexibilité sur différents horizons

**Figure 7.7** Principes méthodologiques d'évaluation des besoins de modulation sur les différents horizons temporels



# Flexibilités et temporalités d'action

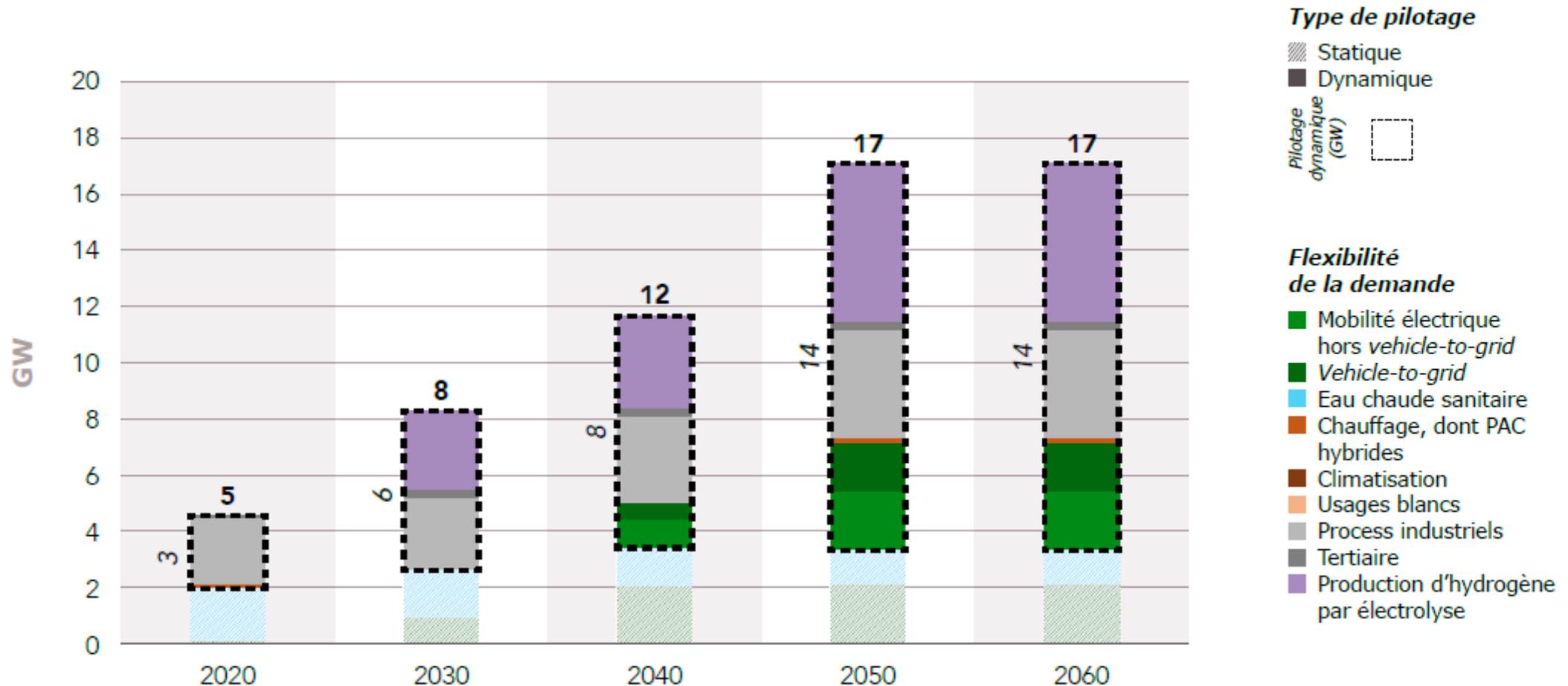
**Figure 7.9** Solutions de flexibilité et horizons temporels sur lesquelles elles agissent



# Une flexibilité de la consommation tirée par l'industrie

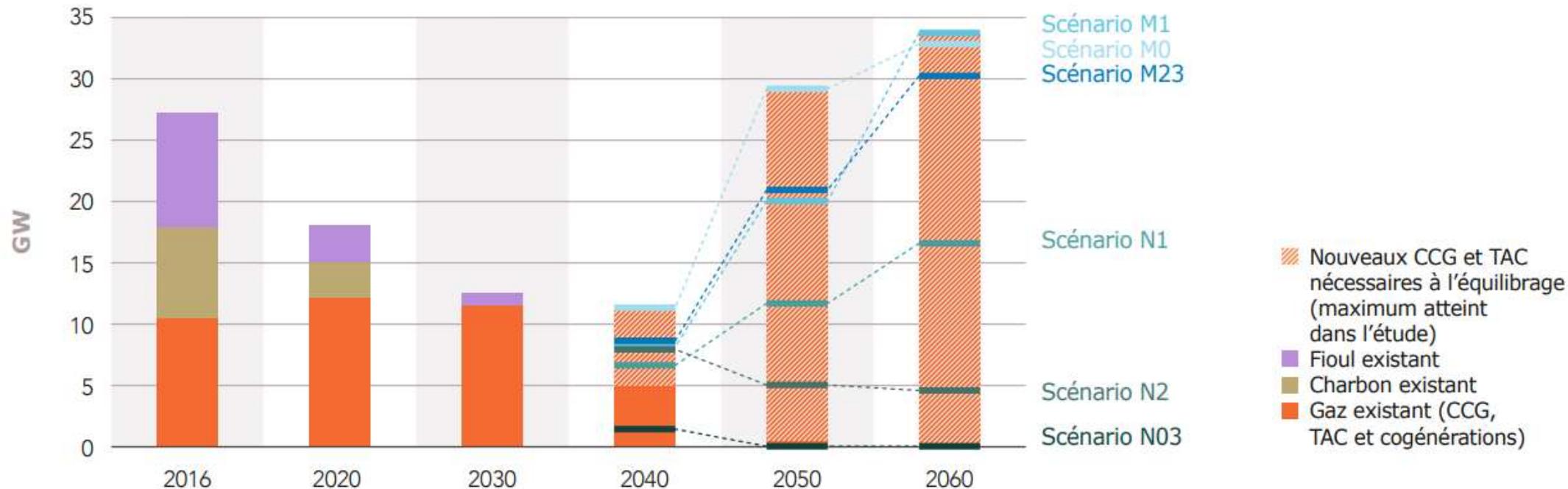
**Figure 7.23**

Évolution de la puissance moyenne effaçable de la demande d'électricité dans la configuration «flexibilité prudente» sur la demande d'électricité, de 2020 à 2060



# De nécessaires moyens thermiques à flamme... ou nucléaires

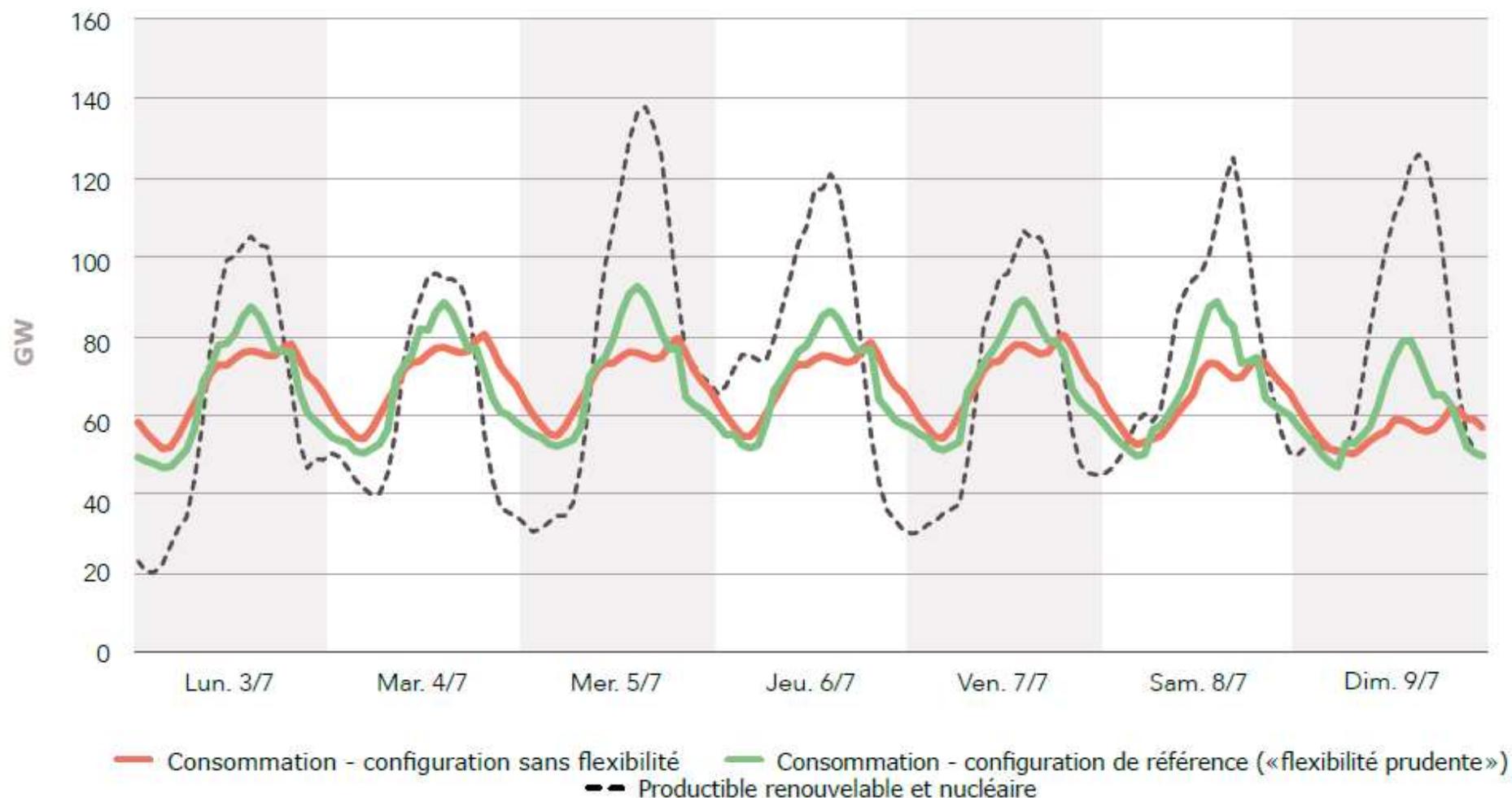
**Figure 4.28** Évolution des capacités thermiques installées entre 2012 et 2060 en considérant la trajectoire de consommation de référence



# Consommation résiduelle d'électricité

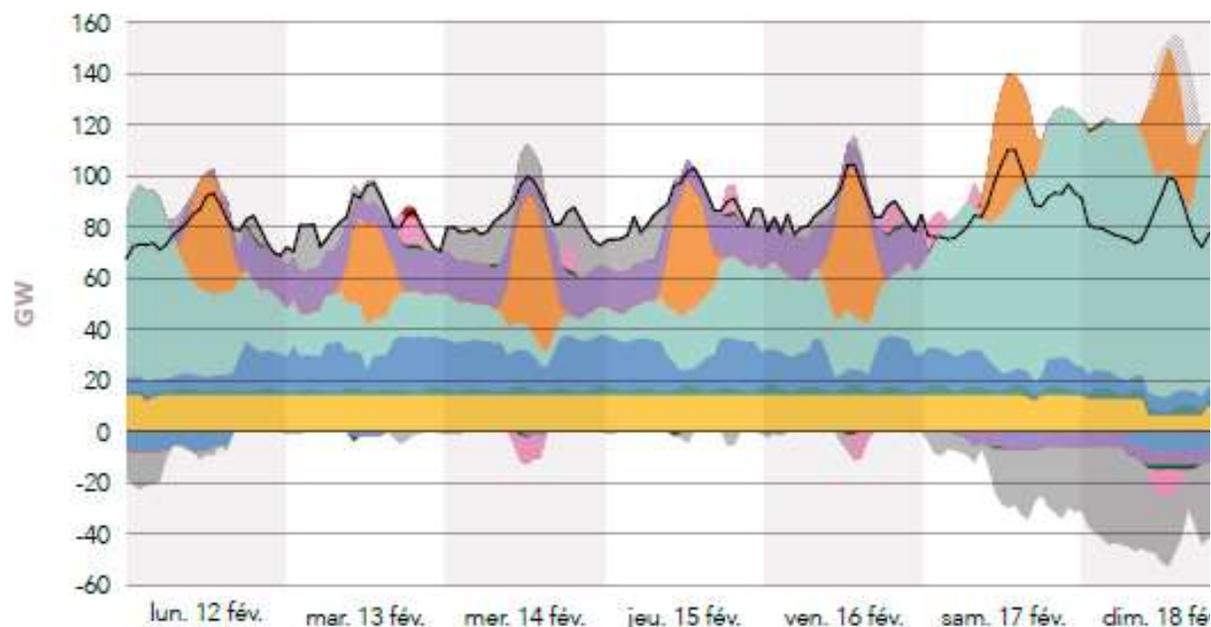
**Figure 7.27**

Consommation d'électricité sur la première semaine de juillet dans le scénario M23 à l'horizon 2050 (dans une configuration sans flexibilité et avec les leviers de flexibilité de la configuration de référence)

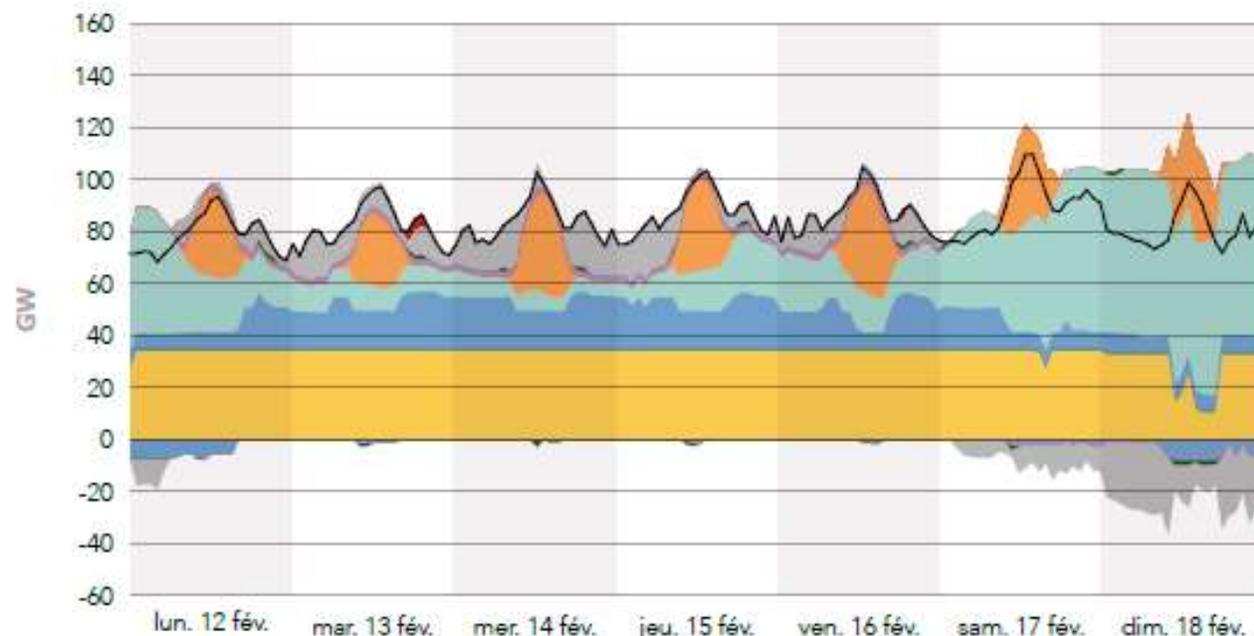


# L'équilibre du système dans les scénarios M et N

**Figure 7.34** Configuration avec peu de vent pendant la deuxième semaine de février, dans le scénario M23 en 2050



**Figure 7.35** Configuration avec peu de vent pendant la deuxième semaine de février, dans le scénario N2 en 2050



- ▨ Écrêtement EnR
- Effacements
- Imports
- Injection batteries
- Injection VE
- Thermique CCG/TAC Hydrogène (injection power-to-gas-to-power)
- Thermique CCG biométhane

- Solaire
- Éolien
- Hydraulique
- Autres productions fatales (déchets, biomasse, biogaz, hydroliennes)
- Nucléaire

- Pompage
- Soutirage power-to-gas-to-power
- Soutirage V2G
- Soutirage batteries
- Exports
- Consommation

# Les 4 leviers de la décarbonation de la France

Des besoins d'électricité qui augmentent  
dans tous les secteurs pour assurer  
la sortie des énergies fossiles  
et réindustrialiser la France

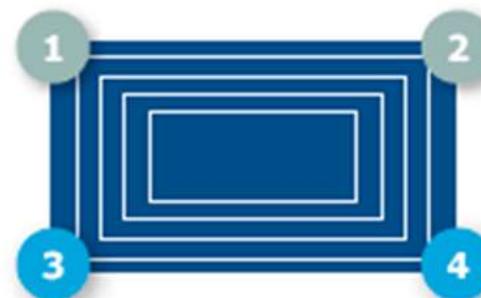


Quatre leviers essentiels pour couvrir ces besoins

- Encore quelques degrés de liberté dans le choix politiques et solutions

**Efficacité énergétique**  
*Amélioration de la performance  
des procédés, équipements  
et bâtiments*

**Sobriété**  
*Baisse de la consommation reposant  
sur une évolution des modes de vie  
(à l'échelle individuelle et collective)*



**Nucléaire**  
*Prolongation des réacteurs et  
maximisation du productible*

**Renouvelables**  
*Accélération du rythme  
de développement*

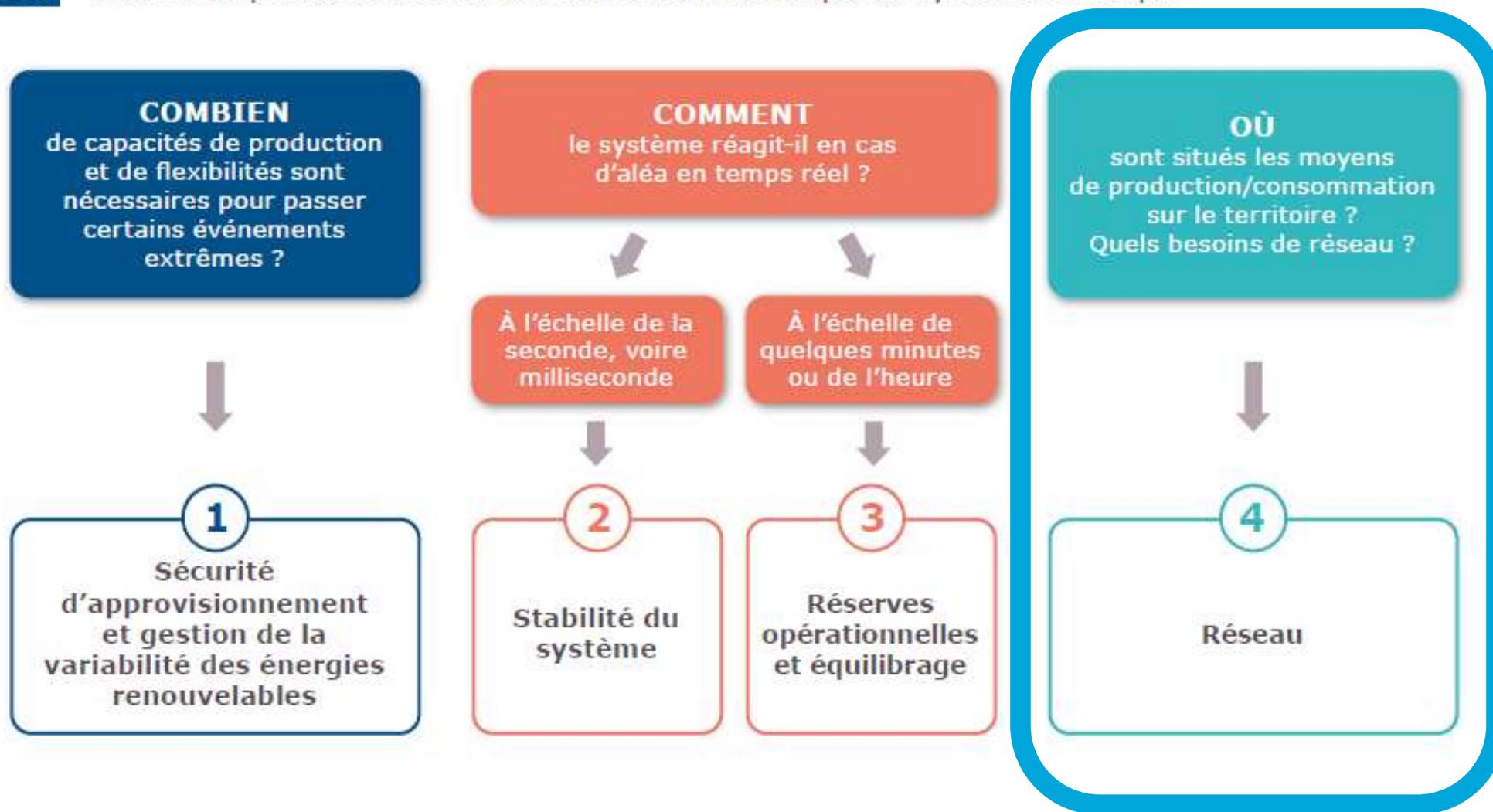
# L'évolution nécessaire du réseau quel que soit le scénario

.....



# Les différents enjeux du système électrique

**Figure 7.1** Problématiques associées au fonctionnement technique du système électrique



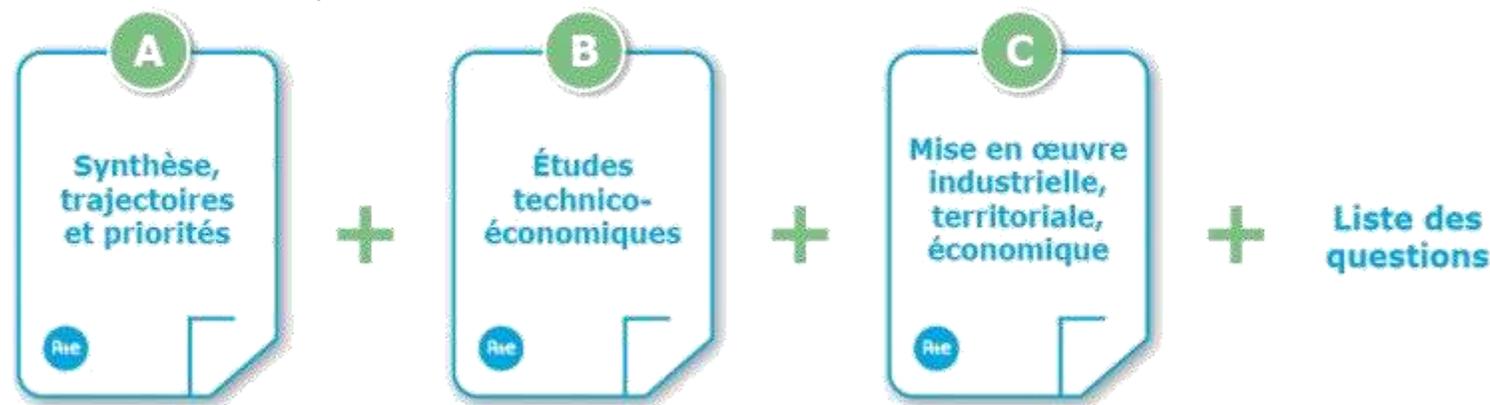
# Des besoins de raccordement historiques

## Perspectives de raccordement à 2035-2040 sur le réseau de transport d'électricité

	<b>EnR terrestres</b> 	<b>Éolien en mer</b> 	<b>Réacteurs EPR2</b> 	<b>Industriels</b> 	<b>Datacenters</b> 	<b>Stockeurs</b> 
<b>Localisation</b>	Répartis sur tout le territoire	Répartis sur les différentes façades	Penly et Gravelines (puis Bugey et à définir au-delà de 2040)	Concentration dans quelques zones/sites	À proximité de centres urbains (IDF, PACA)	Répartis sur tout le territoire
<b>Niveau de tension majoritaire</b>	HTB1-2	HTB3	HTB3	HTB2-3	HTB2	HTB1-2
<b>Perspectives d'ici 2035-2040 (scénario d'atteinte des objectifs publics)</b>	+70 à 100 GW	+18 à 25 GW	+6,5 GW	+13 à +15 GW	+3 à 5 GW	+ plusieurs GW

# Le schéma décennal de développement du réseau

- Garantir que le réseau public de transport d'électricité est adapté aux objectifs de politique énergétique fixés par l'État et que son développement ne constitue pas un frein à l'atteinte de ces objectifs.
- La nouvelle édition du SDDR doit tirer les conséquences des nouvelles orientations de politique énergétique, et proposer une stratégie réseau séquencée dans le temps, chiffrée sur le plan économique et évaluée sur le plan environnemental.
- **Consultation publique**, ouverte de 14 mars 2024, porte sur trois documents :



- **Votre contribution est légitime et bienvenue** : [rte-concerte-bp@rte-france.com](mailto:rte-concerte-bp@rte-france.com)
- **Date limite de réponse** : 30 avril 2024 inclus

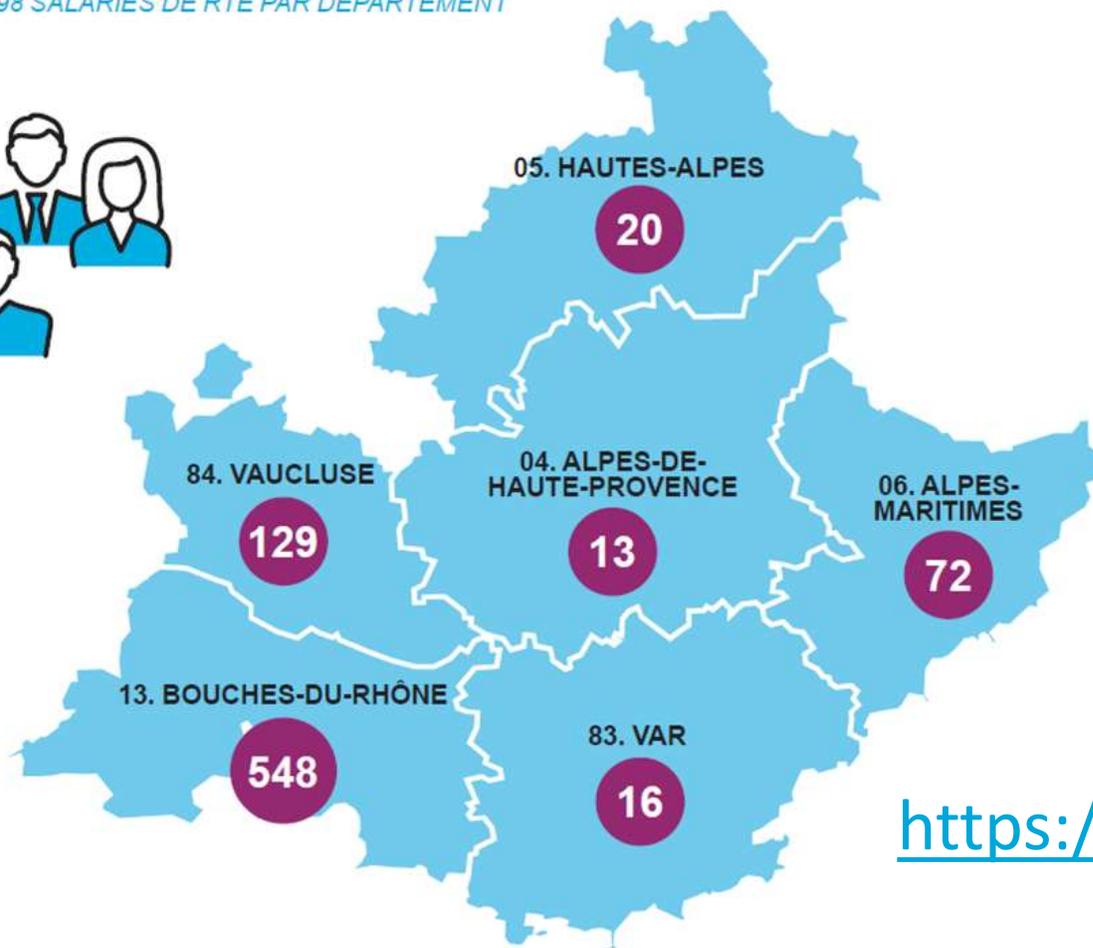


Le réseau  
de transport  
d'électricité

# Merci

# L'emploi à RTE en région PACA

RÉPARTITION DES 798 SALARIÉS DE RTE PAR DÉPARTEMENT  
(hors CDD, interim)



En termes d'emplois directs :

**36** nouveaux étudiants ont été accueillis en alternance en 2023.

En 2023, **21%** de nos recrutements sont issus de l'alternance.



En 2024, RTE prévoit le recrutement de **60 CDI** sur la région.

<https://www.rte-france.com/carrieres>

# RTE en France – Les chiffres clés

## LE RÉSEAU RTE



**105 816 km**

de lignes dont 7 054 km  
de liaisons souterraines



**2 828 postes**

dont 10 nouveaux en 2022



**231 km** de nouvelles

lignes souterraines en 2022

## RTE EN 2022



**4 926 M€**

de chiffre d'affaires



**485 M€**

de résultat net

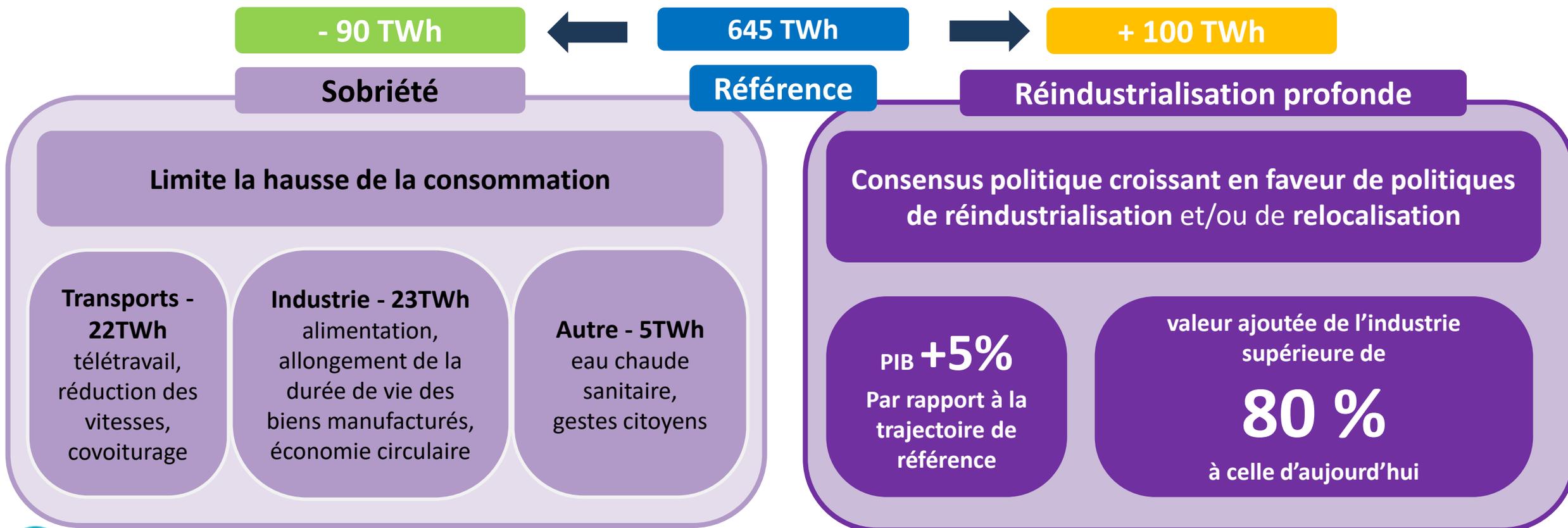


**9 586** salariés et

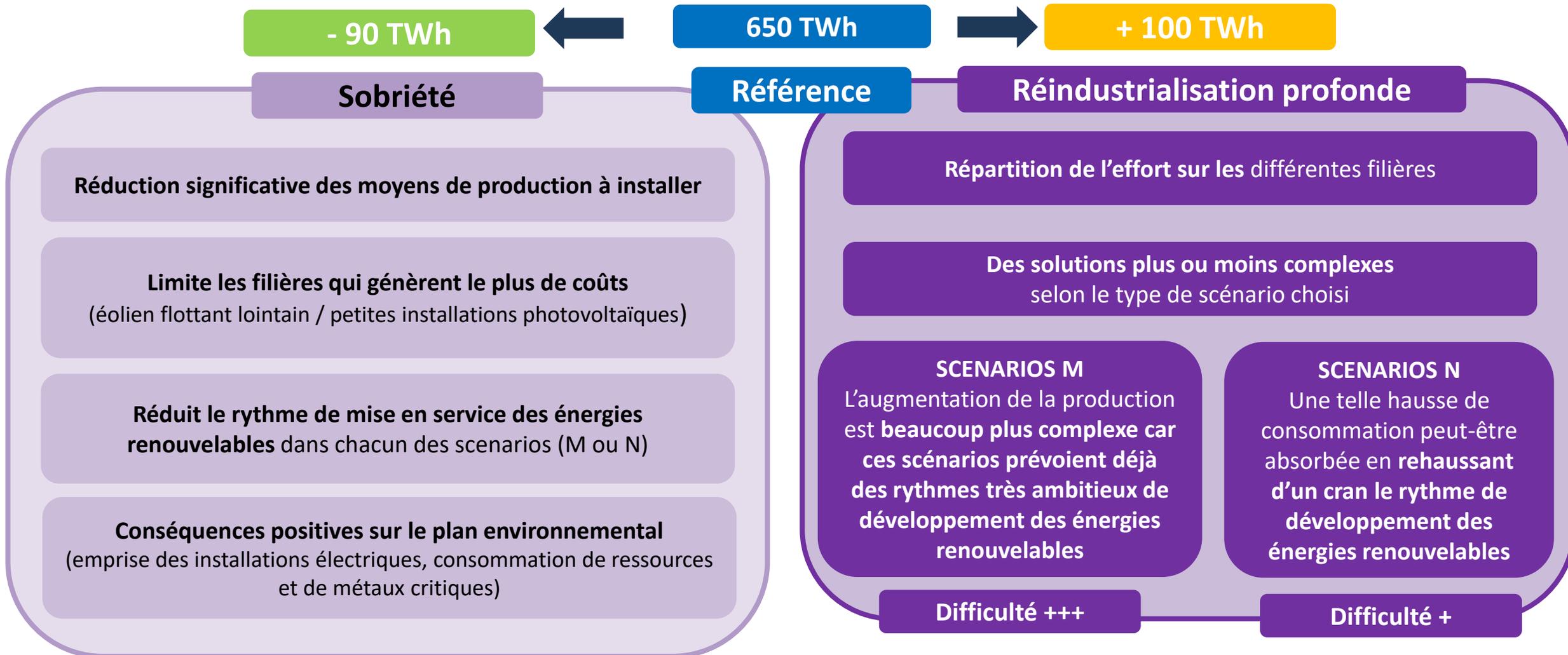
**470** alternants

# Trois perspectives de consommations en 2050

Point commun : augmentation de la consommation d'électricité (450 TWh aujourd'hui)

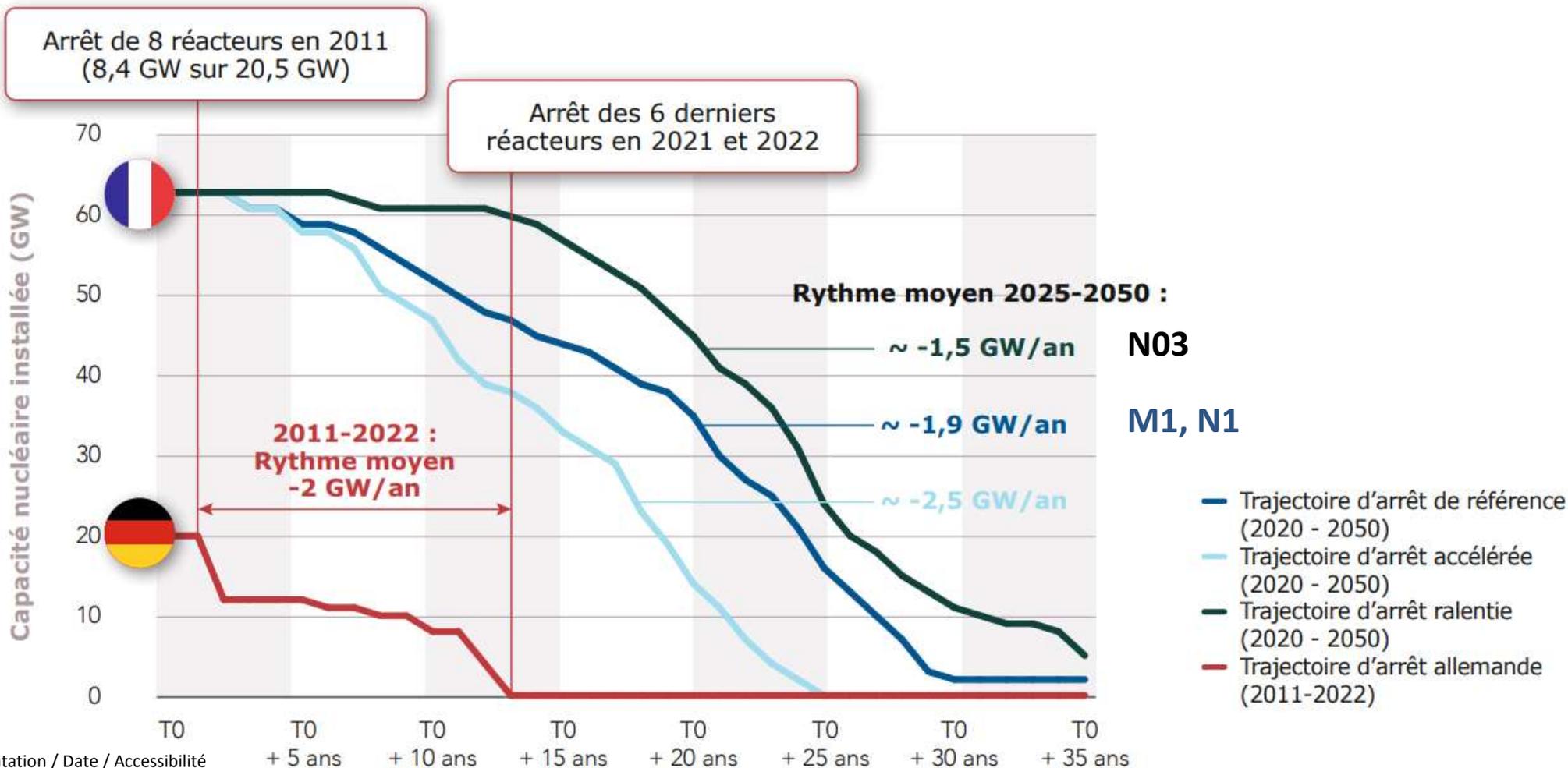


# Qui appellent des actions divergentes



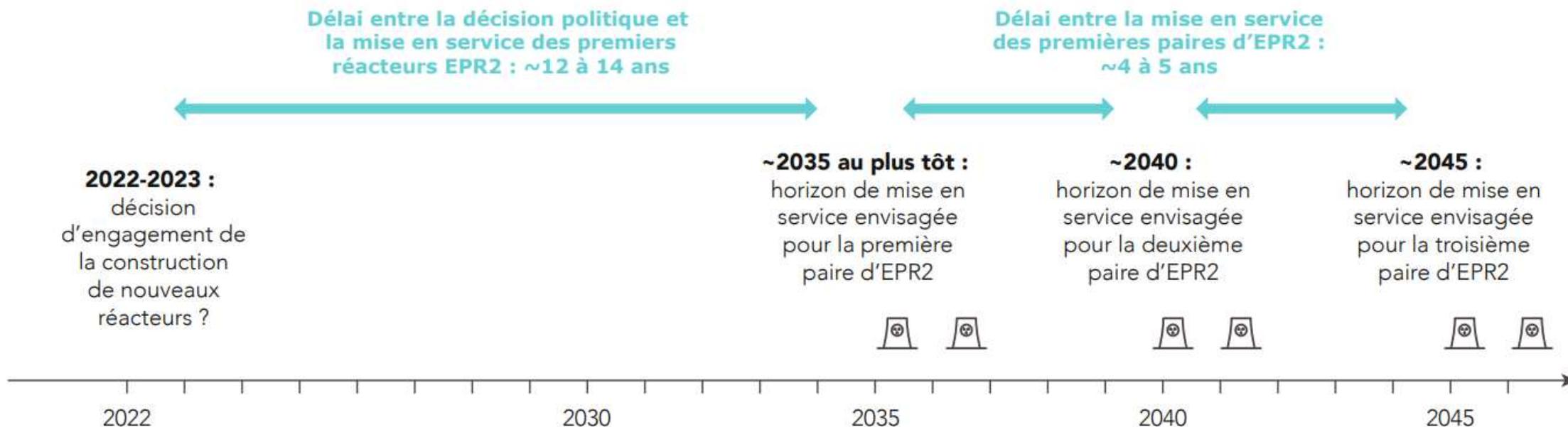
# Scénarios de fermeture du parc nucléaire existant

**Figure 4.4** Comparaison des trajectoires d'arrêt des réacteurs nucléaires proposée en France (2025-2060) et réalisée en Allemagne (2011-2022)



# Délais de développement du nouveau nucléaire

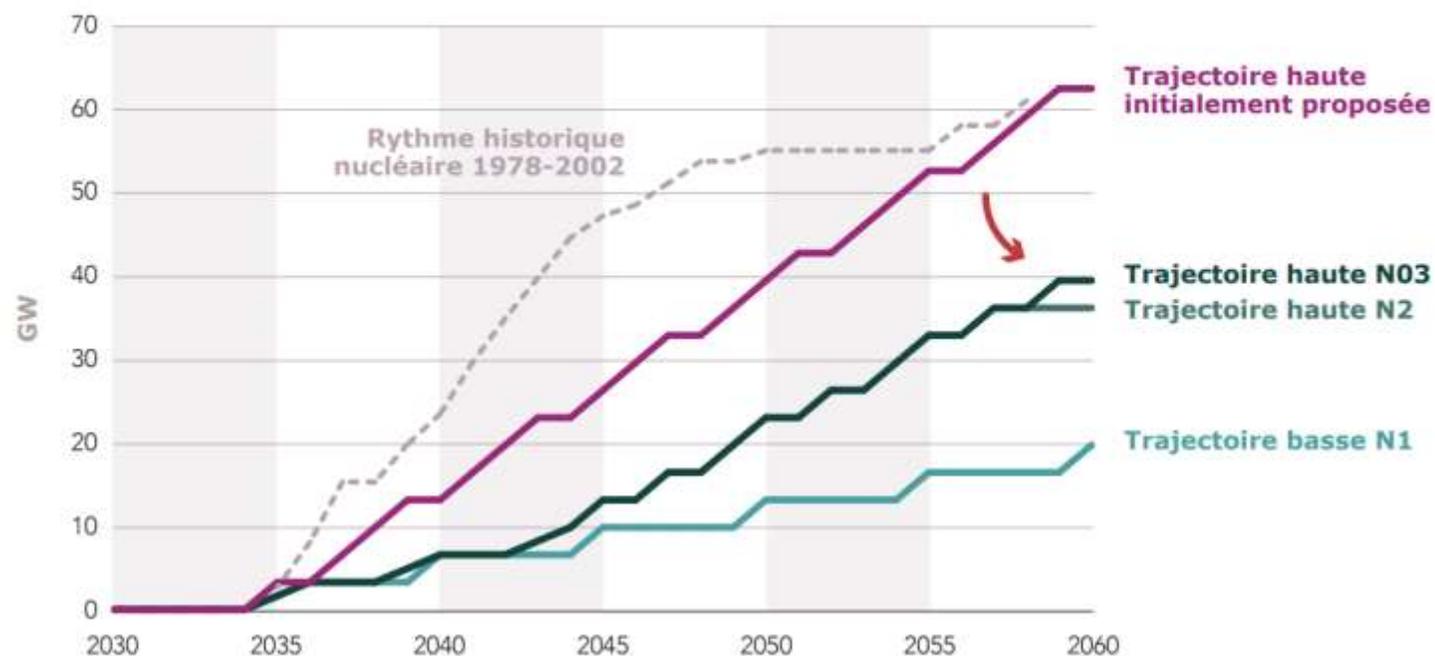
**Figure 4.7** Programme « nouveau nucléaire France » et délais estimés entre les premières mises en service des EPR2



Le rythme de construction résultant de ces propositions industrielles (un à deux réacteurs par an au maximum à partir de 2045) ressort nettement en-dessous de celui du programme nucléaire historique (contraintes de supply chain internationale), qui a vu trois à quatre réacteurs mis en service chaque année en moyenne, entre la fin des années 1970 et le début des années 1990.

# Développement du nouveau nucléaire : 1 à 2 /an après 2045

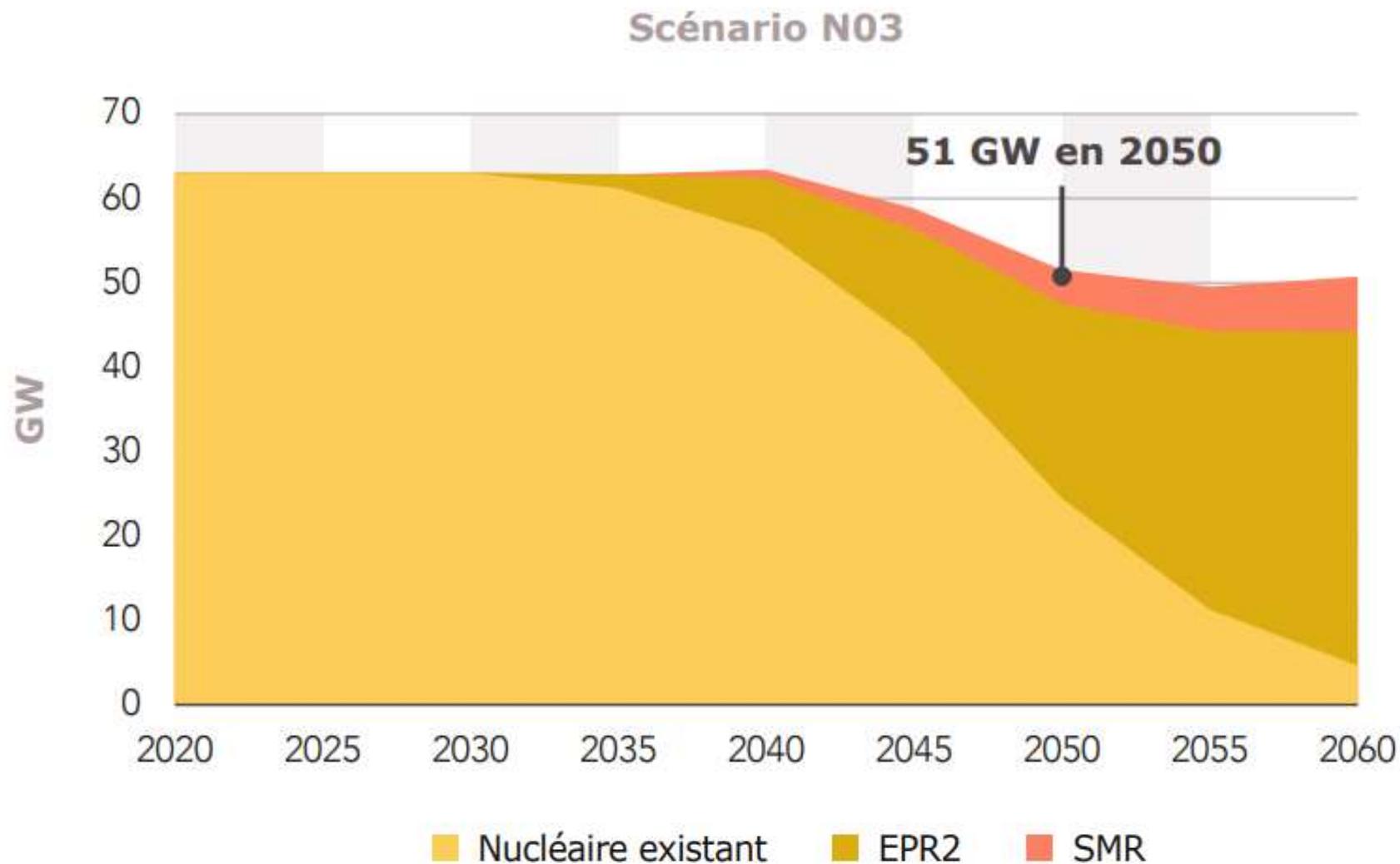
Figure 4.8 Trajectoires de développement de nouvelles tranches nucléaires (nouveaux EPR2)



Le rythme de construction résultant des consultations industrielles ressort nettement en-dessous de celui du programme nucléaire historique, qui a vu trois à quatre réacteurs mis en service chaque année en moyenne, entre la fin des années 1970 et le début des années 1990.

Les acteurs industriels ont indiqué que les contraintes de supply chain rendaient difficilement envisageable d'atteindre un tel rythme. Celui-ci ne serait possible qu'en recourant à des programmes nucléaires coordonnés avec le Royaume-Uni, la République tchèque et la Pologne notamment, soit en Asie.

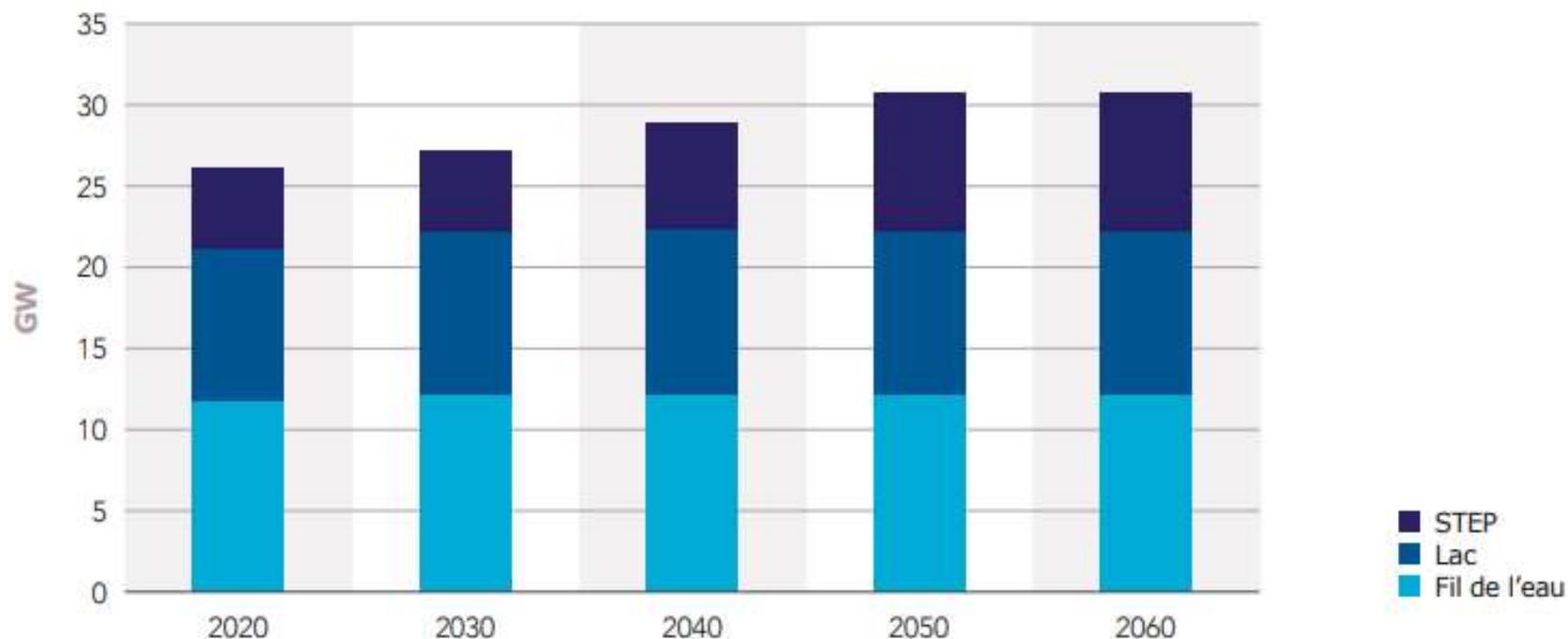
# Scénario maximal du nouveau nucléaire : 23 GW EPR2 en 2050



# Un potentiel hydraulique déjà largement exploité

**Figure 4.13**

Capacités hydrauliques installées en France en 2020 et projetées à 2060

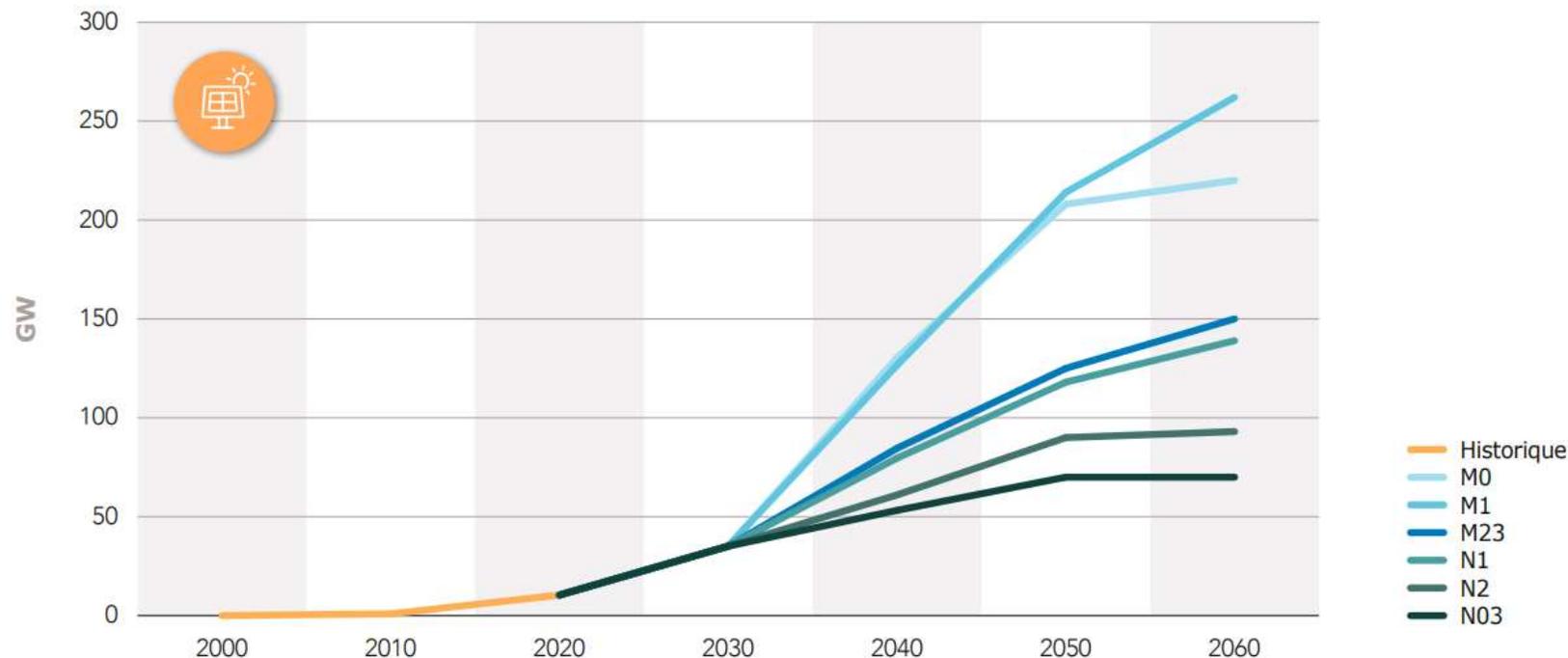


La PPE envisage ainsi la possibilité de mettre en service jusqu'à 1,5 GW de nouvelles STEP entre 2030 et 2035. Dans l'étude de RTE, un potentiel total de l'ordre de 3 GW de STEP supplémentaires entre 2020 et 2050 est considéré et intégré aux scénarios.

# Le photovoltaïque doit accélérer dans tous les scénarios

**Figure 4.15**

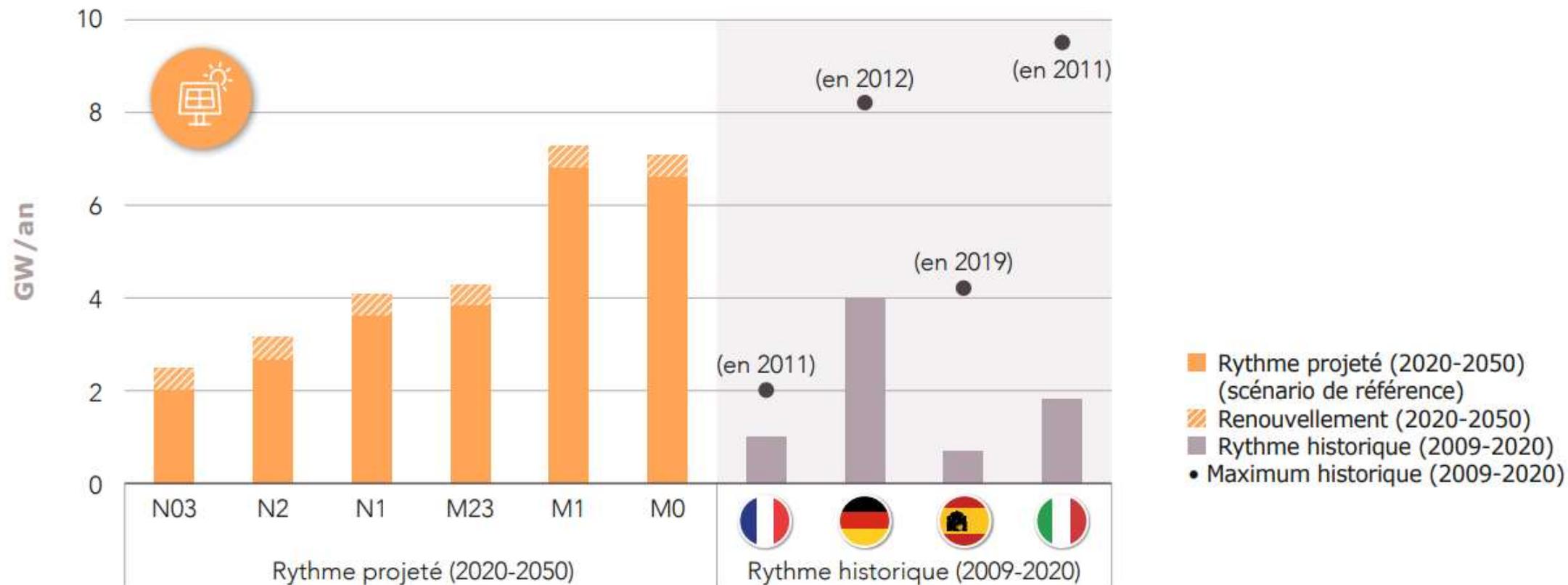
Évolution des capacités photovoltaïques en France depuis 2000 et projetées à 2060 dans les scénarios de mix adaptés à la trajectoire de consommation de référence



Avec près de **35 GW d'installations photovoltaïques en toiture résidentielle à l'horizon 2050** (consommation de référence), le **scénario M1** représente ainsi huit millions de maisons individuelles (soit une maison individuelle sur deux) qui pourraient être en mesure de consommer directement leur production photovoltaïque.

# Une croissance du photovoltaïque déjà observée ailleurs en Europe

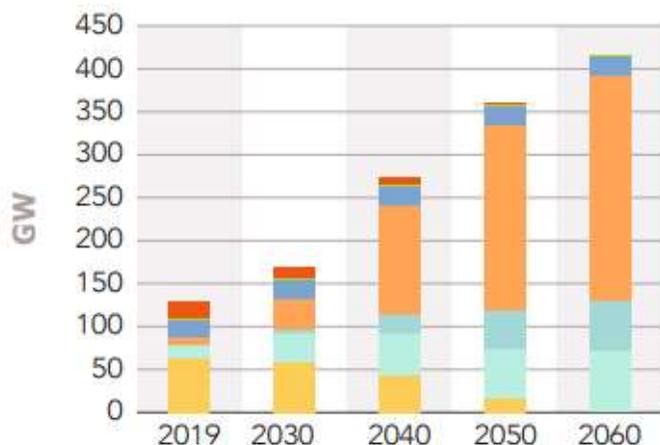
**Figure 4.20** Rythmes moyens de développement historiques et projetés (scénario de référence) du solaire



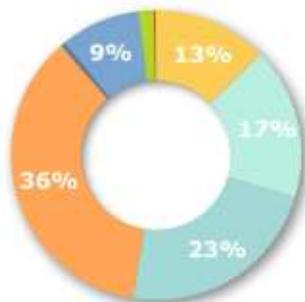
# Scénario M1 : Répartition diffuse

## Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



Bilan énergétique annuel en 2050

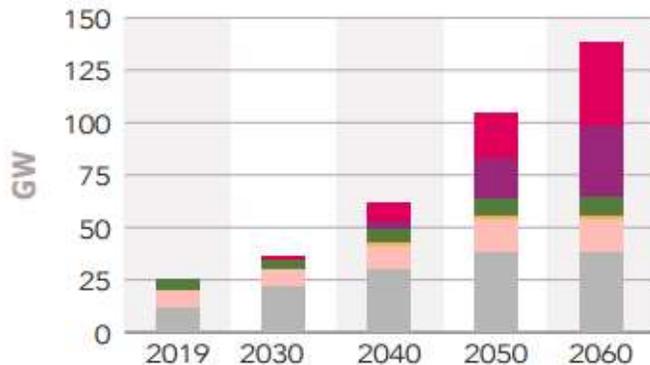


(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	16 GW / 91 TWh
Nouveau nucléaire	-
Éolien terrestre	59 GW / 119 TWh
Éolien en mer	45 GW / 162 TWh
Photovoltaïque	214 GW / 255 TWh
Énergies marines	1 GW / 3 TWh
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	0,5 GW / 0,5 TWh

## Moyens de flexibilité

Capacités installées par filière



(capacités installées ou puissances moyennes disponibles)

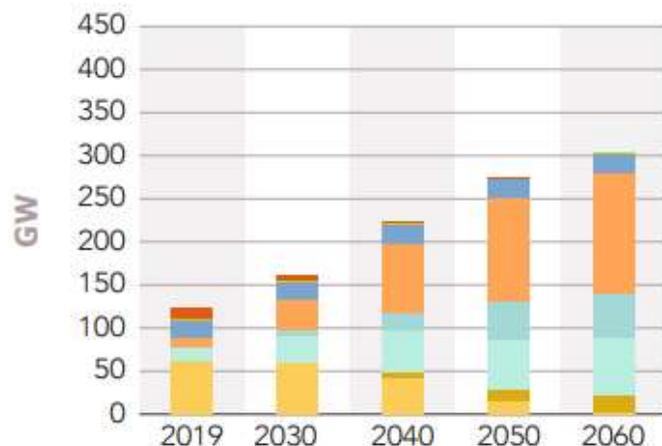
Filière	2050
Capacité d'import (interconnexions)	39 GW
Flexibilités de la demande (hors V2G)	17 GW
Vehicle-to-grid	1,7 GW (1,1 million, soit 3% du parc total de VE)
STEP	8 GW
Nouveau thermique décarboné	20 GW
Batteries	21 GW

\* Le combustible des moyens thermiques existants est d'origine fossile en 2021. Il est amené à évoluer pour être exclusivement décarboné en 2050.

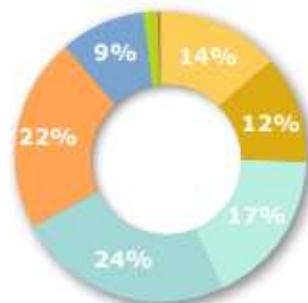
# Scénario N1 : Énergies renouvelables + nouveau nucléaire 1

## Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



Bilan énergétique annuel en 2050

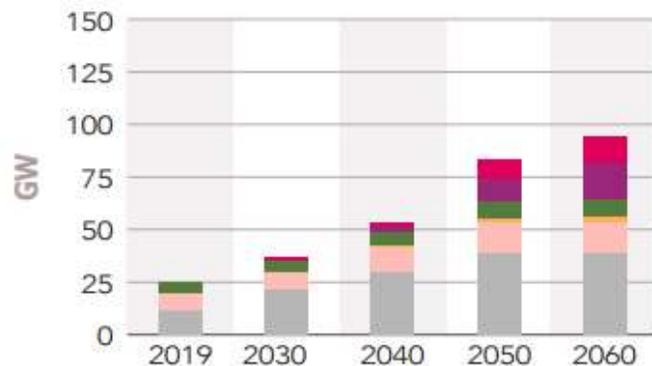


(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	16 GW / 92 TWh
Nouveau nucléaire	13 GW / 90 TWh
Éolien terrestre	58 GW / 117 TWh
Éolien en mer	45 GW / 160 TWh
Photovoltaïque	118 GW / 144 TWh
Énergies marines	-
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	0,5 GW / 0,5 TWh

## Moyens de flexibilité

Capacités installées par filière



(capacités installées ou puissances moyennes disponibles)

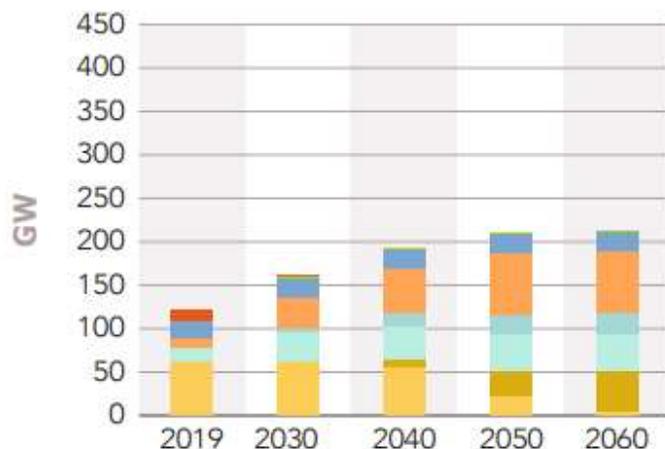
Filière	2050
Capacité d'import (interconnexions)	39 GW
Flexibilités de la demande (hors V2G)	15 GW
Vehicle-to-grid	1,7 GW (1,1 million, soit 3% du parc total de VE)
STEP	8 GW
Nouveau thermique décarboné	11 GW
Batteries	9 GW

\* Le combustible des moyens thermiques existants est d'origine fossile en 2021. Il est amené à évoluer pour être exclusivement décarboné en 2050.

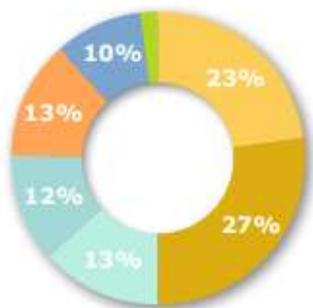
# Scénario N03 : Énergies renouvelables + nouveau nucléaire 3

## Sources de production d'électricité

Capacités installées par filière



Bilan énergétique annuel en 2050

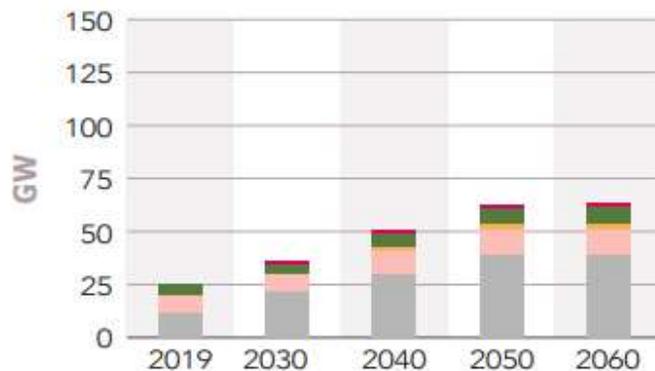


(capacités installées/production)

Filière	2050
Nucléaire existant	24 GW / 149 TWh
Nouveau nucléaire	27 GW / 189 TWh
Éolien terrestre	43 GW / 87 TWh
Éolien en mer	22 GW / 78 TWh
Photovoltaïque	70 GW / 86 TWh
Énergies marines	-
Hydraulique (hors STEP)	22 GW / 63 TWh
Bioénergies	2 GW / 12 TWh
Thermique existant*	-

## Moyens de flexibilité

Capacités installées par filière



(capacités installées ou puissances moyennes disponibles)

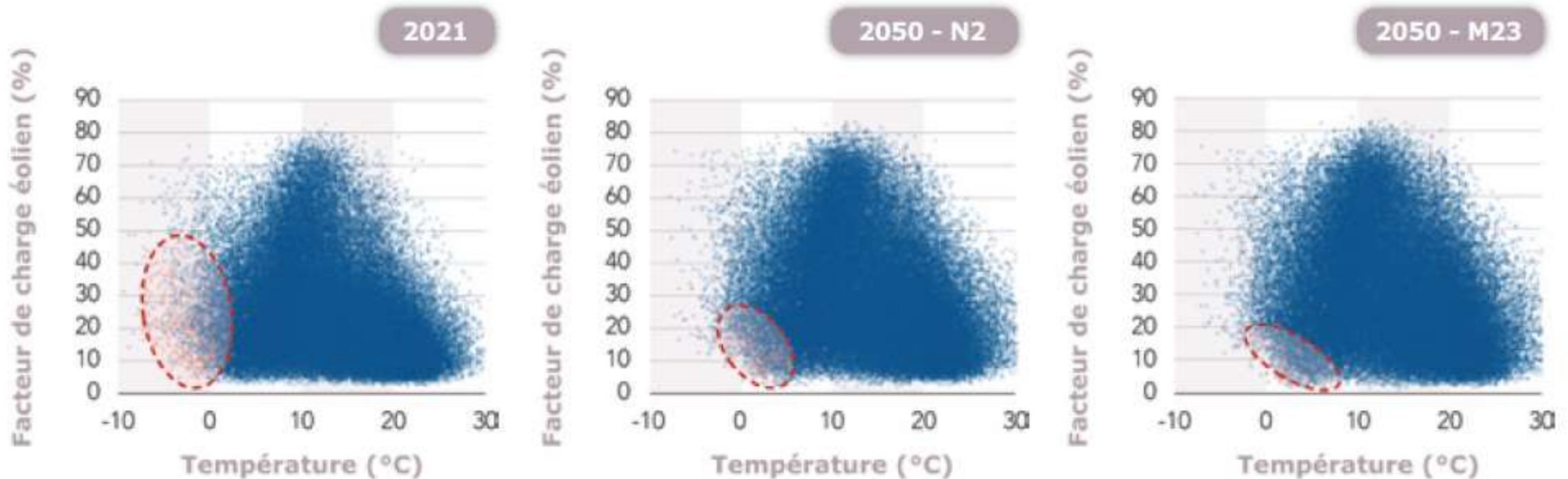
Filière	2050
Capacité d'import (interconnexions)	39 GW
Flexibilités de la demande (hors V2G)	13 GW
Vehicle-to-grid	1,7 GW (1,1 million, soit 3% du parc total de VE)
STEP	8 GW
Nouveau thermique décarboné	-
Batteries	1 GW

\* Le combustible des moyens thermiques existants est d'origine fossile en 2021. Il est amené à évoluer pour être exclusivement décarboné en 2050.

# Identification des situations impliquant un risque pour l'équilibre offre / demande

**Figure 7.53**

Distribution des niveaux de facteurs de charge éoliens (terrestre et en mer) et de la température à la maille journalière en France dans le système actuel, en 2050 dans N2 et dans M23 et identification des situations impliquant un risque pour l'équilibre offre-demande

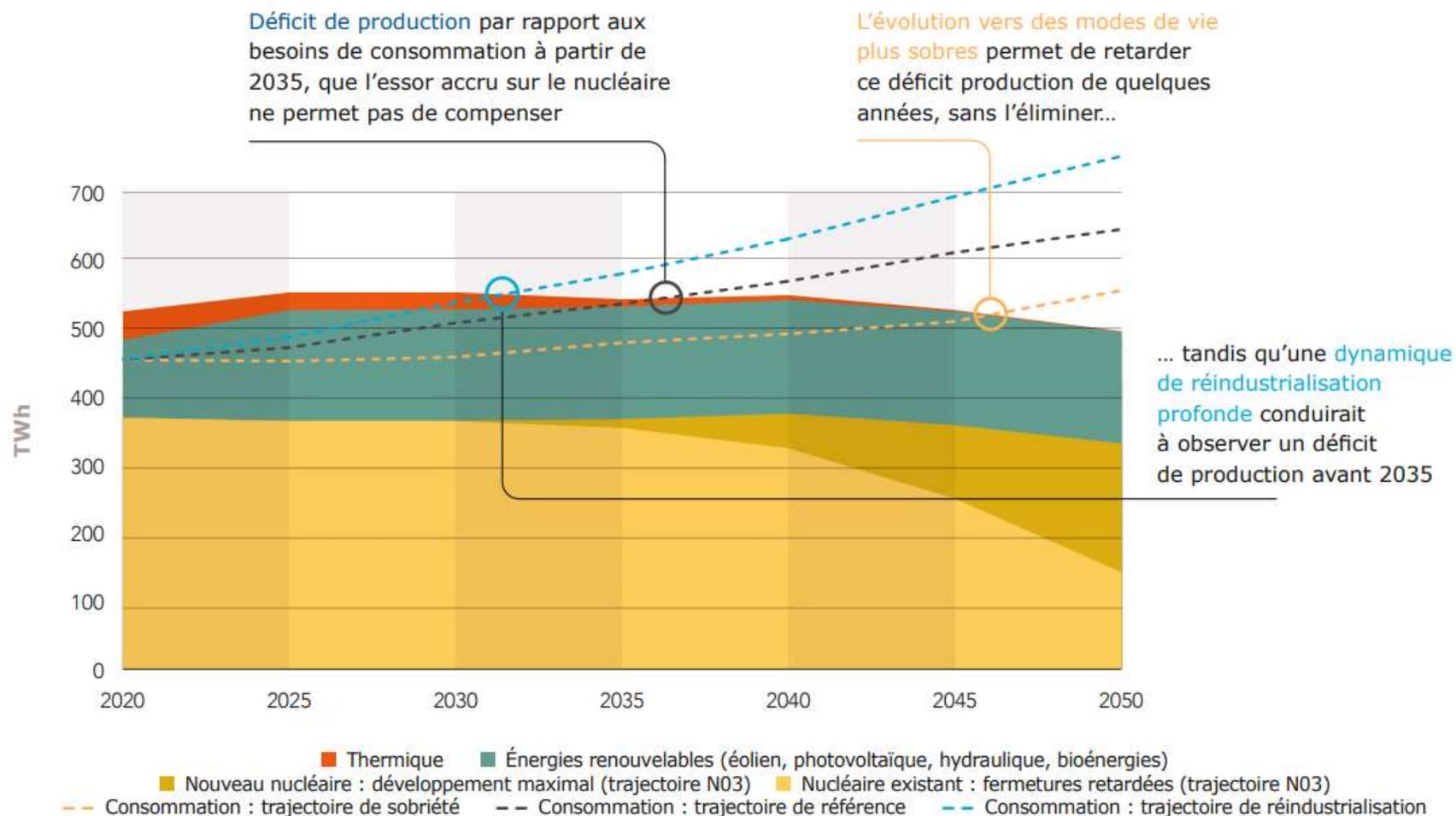


**Configurations modélisées :**

- n'impliquant pas de risque pour l'équilibre offre-demande
- impliquant un risque pour l'équilibre offre-demande

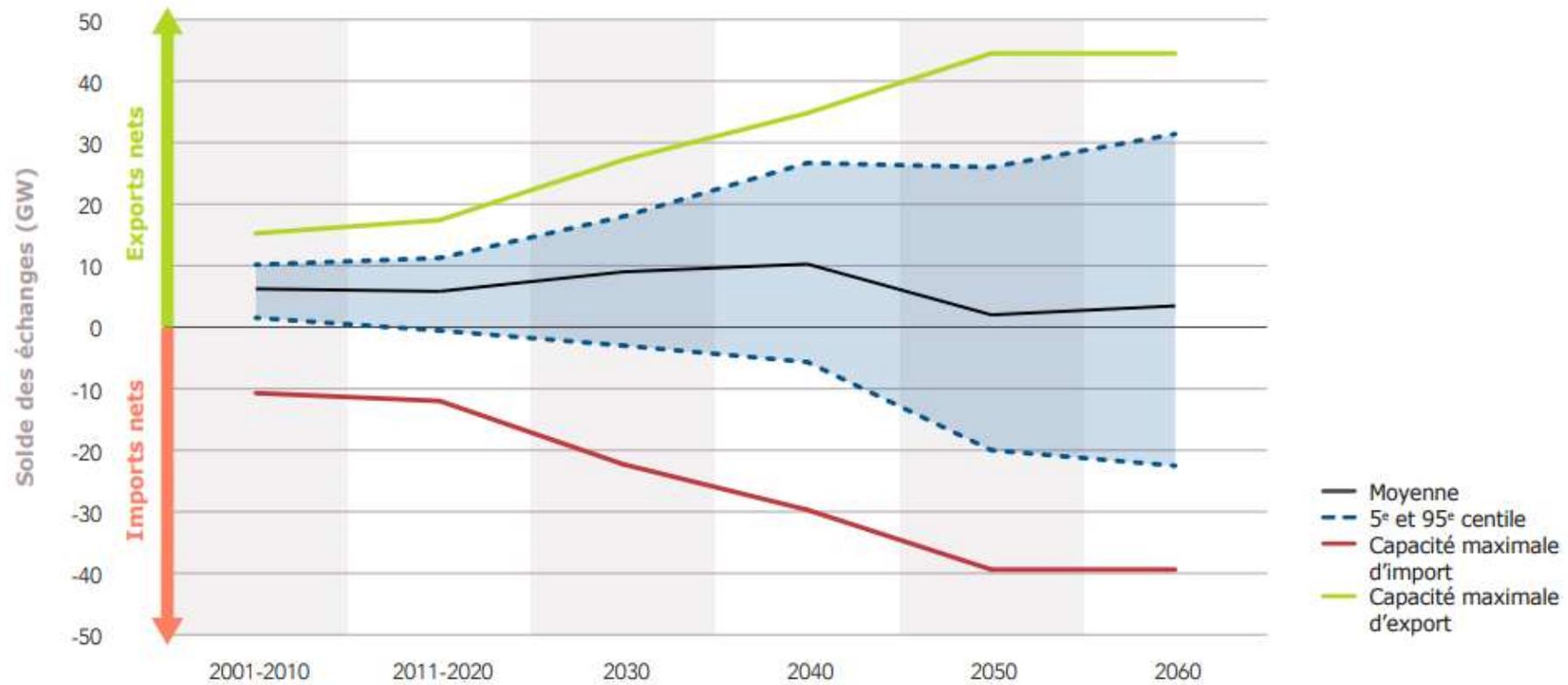
# La sécurité d'alimentation repose sur tous les leviers

**Figure 5.15** Évolution de la production et de la consommation d'électricité dans une configuration de moratoire sur les énergies renouvelables et d'effort maximal sur le nucléaire



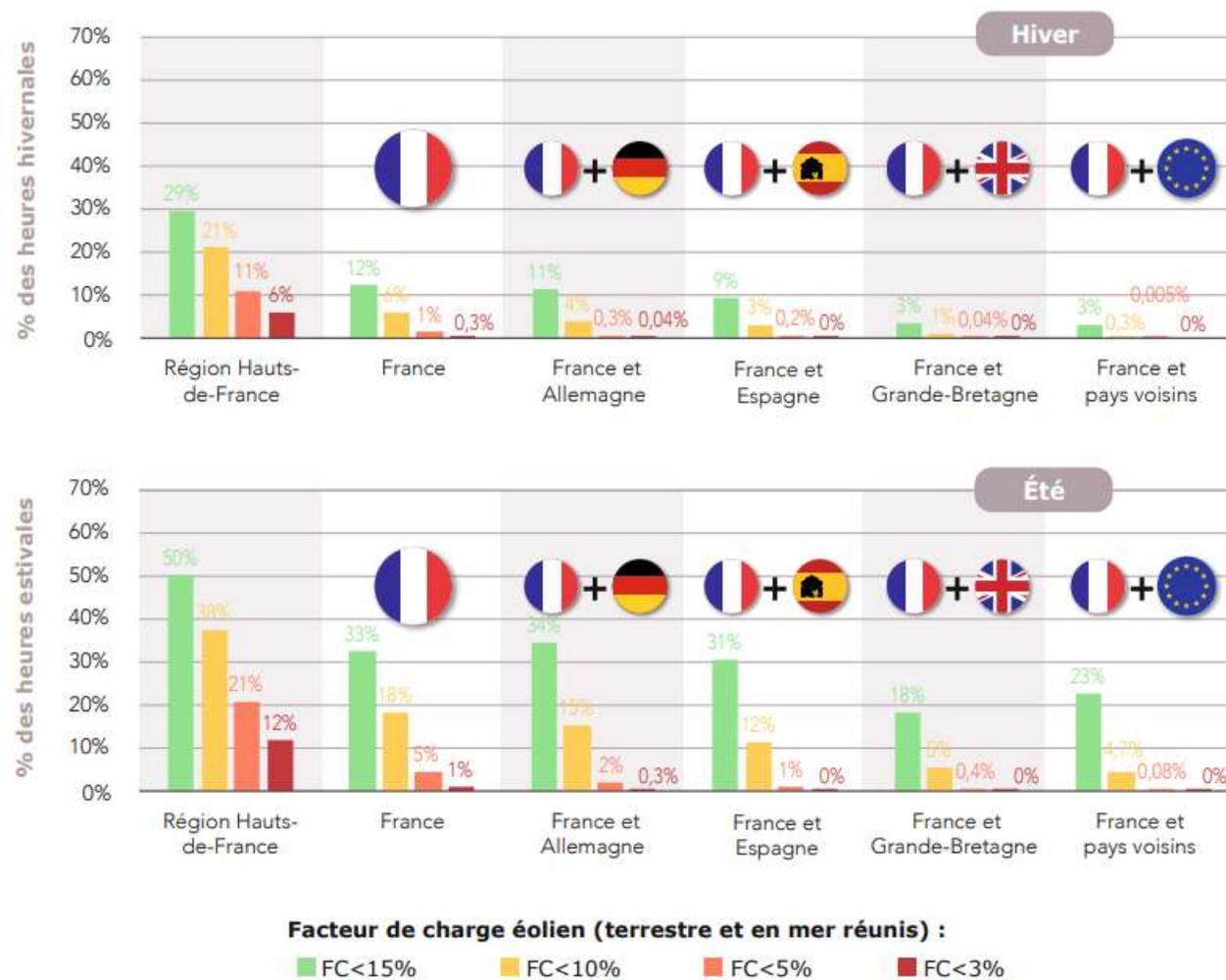
# Des épisodes importateurs plus nombreux dans tous les scénarios

**Figure 7.20** Évolution de la moyenne et des 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> centiles du solde exportateur horaire de la France



# En absence de vent en France, des possibilités d'imports existent la plupart du temps

**Figure 8.25** Pourcentage des heures hivernales et estivales avec un faible facteur de charge éolien, à différents périmètres géographiques, dans M23-2050, pour l'hiver (en haut) et l'été (en bas)

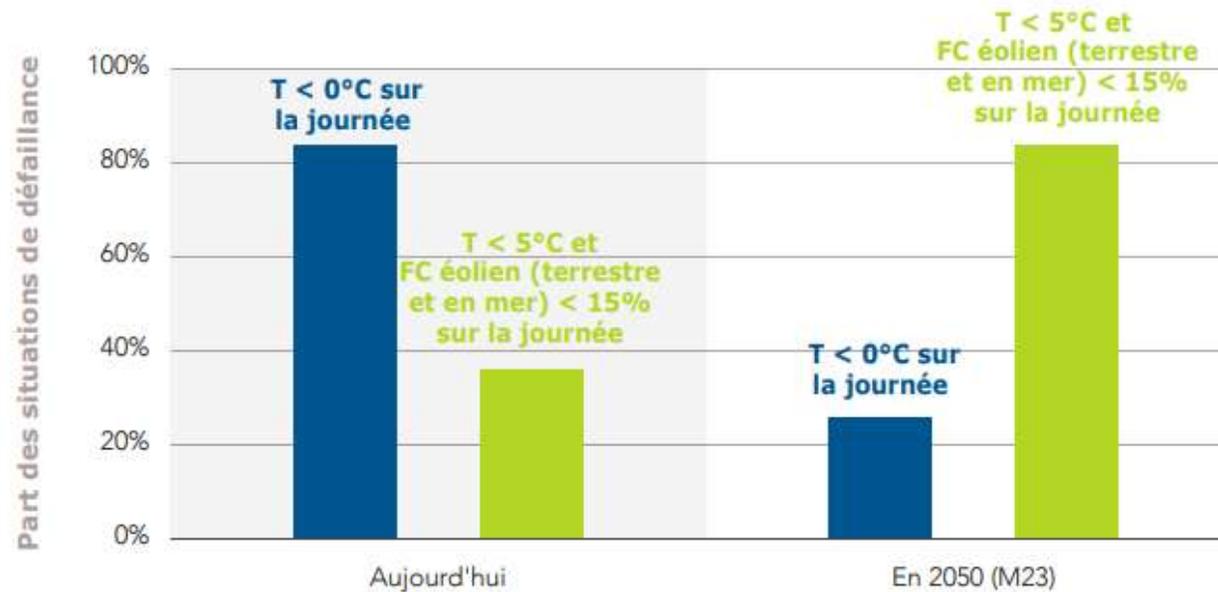


# Le système sera plus sensible aux conditions de vent et non plus essentiellement à la température

**Figure 8.19**

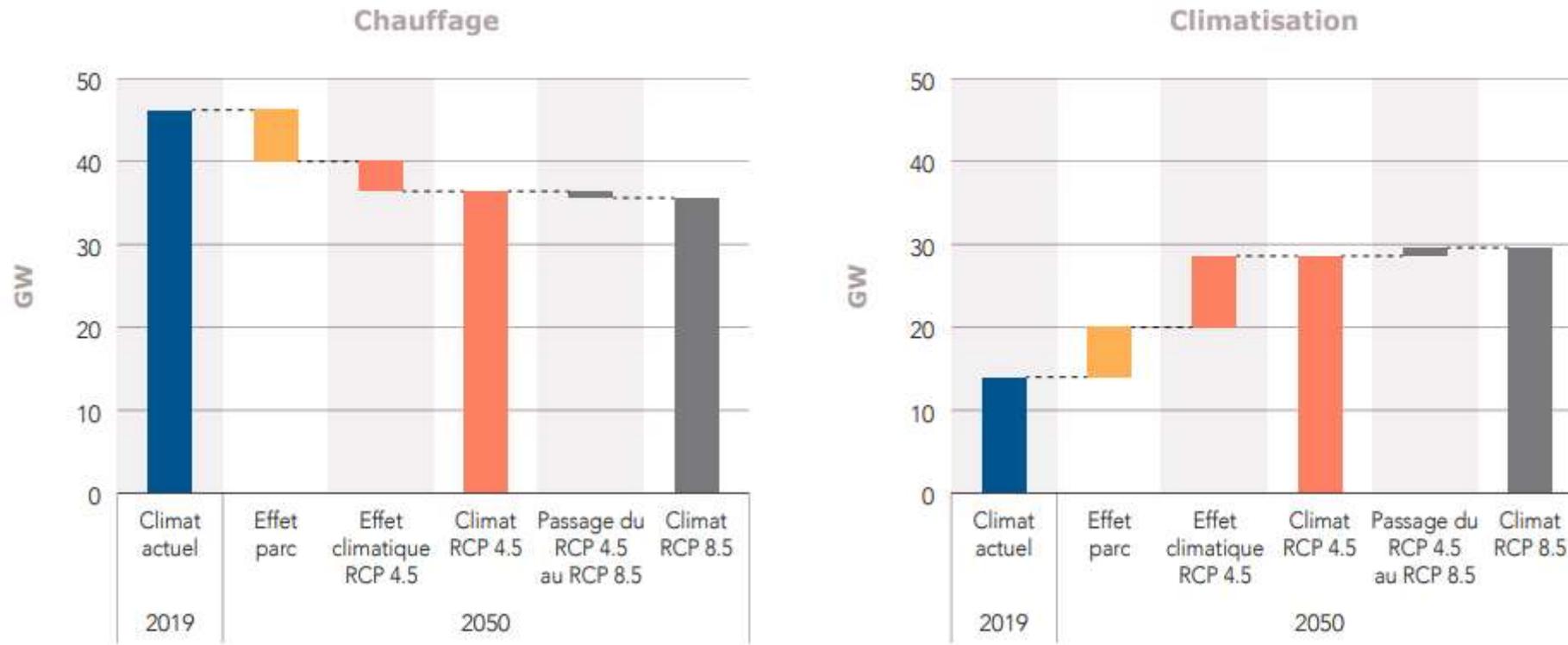
Caractérisation des conditions climatiques communes aux épisodes de défaillance, en 2021 et en 2050 dans le scénario M23

L'essentiel du risque sur la sécurité d'approvisionnement est aujourd'hui concentré sur les vagues de froid. À l'horizon 2050, il interviendra principalement lors de périodes combinant températures faibles et absence de vent (et moins pendant les périodes de froid extrême).



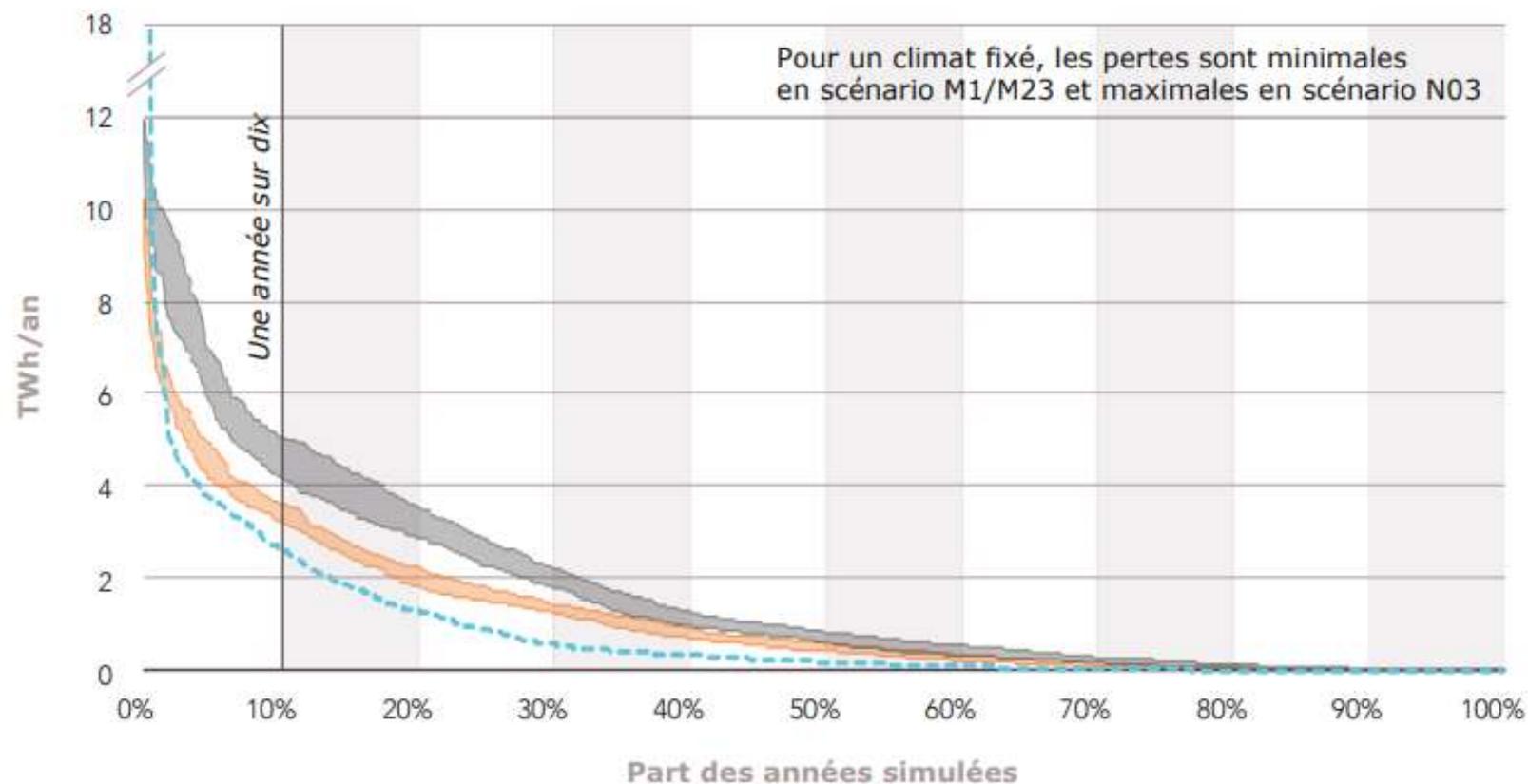
# L'impact climatique sur la consommation pour la climatisation est plus fort que l'impact de sa démocratisation

**Figure 8.10** Décomposition de l'évolution de la pointe à une chance sur dix de la consommation de chauffage et de climatisation entre 2019 et 2050



# Baisse de production nucléaire en canicule et sécheresse

**Figure 8.16** Monotones des pertes de production annuelle (TWh) du nucléaire pour cause de canicule et/ou sécheresse à l'horizon 2050

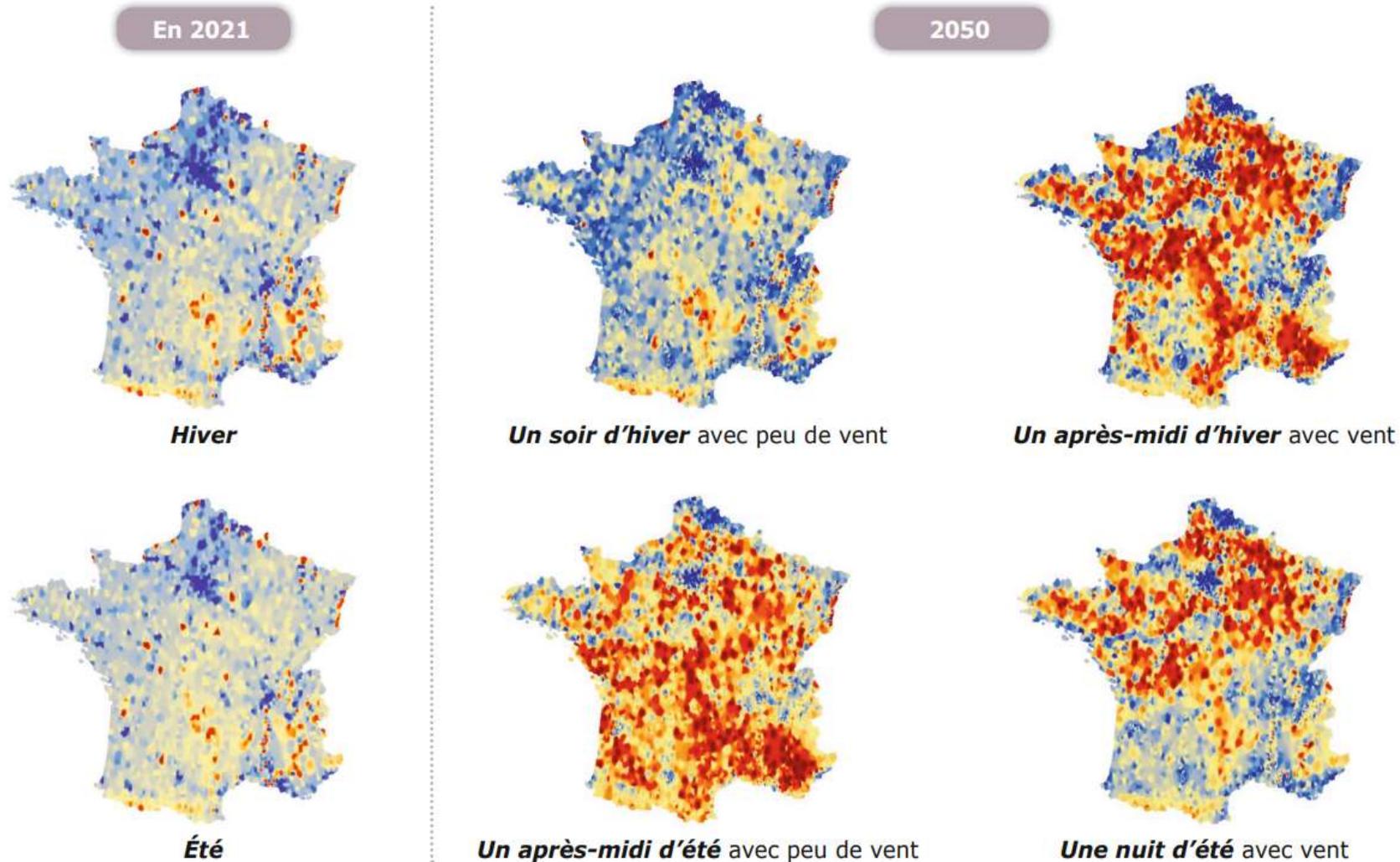


— Pour le parc actuel (61,4 GW) en climat 2000

Pour les scénarios à 2050 (hors M0, 15,5 à 51,6 GW)  
— en climat 2050 RCP 4.5  
— en climat 2050 RCP 8.5

# Le réseau doit permettre l'acheminement de la production d'où qu'elle vienne

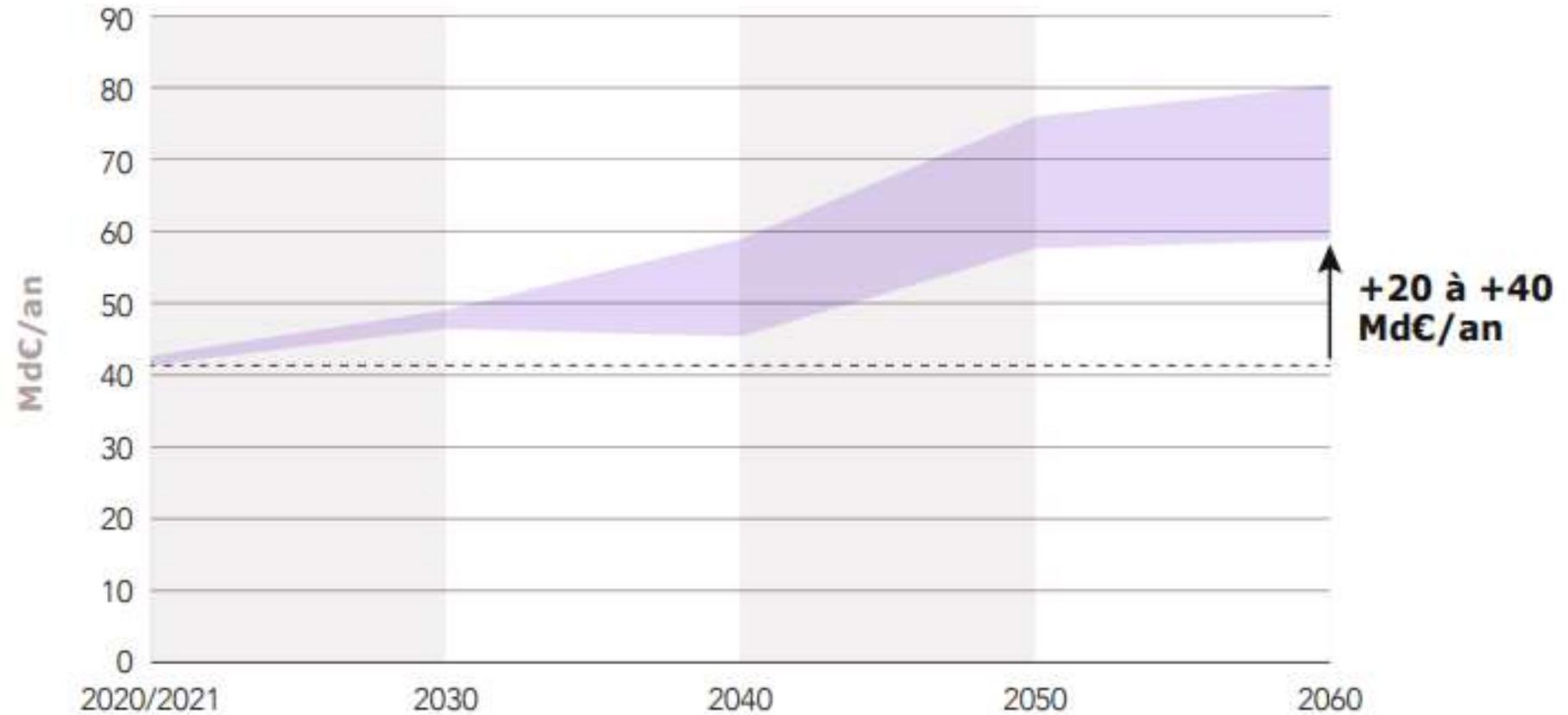
**Figure 10.6** Illustration de la variabilité temporelle de la production et de la consommation d'électricité, en 2021 et 2050. Le rouge indique un solde producteur, le bleu un solde consommateur



# L'augmentation de la place de l'électricité dans le mix énergétique se traduit par des coûts totaux du système électrique en nette hausse

**Figure 11.25**

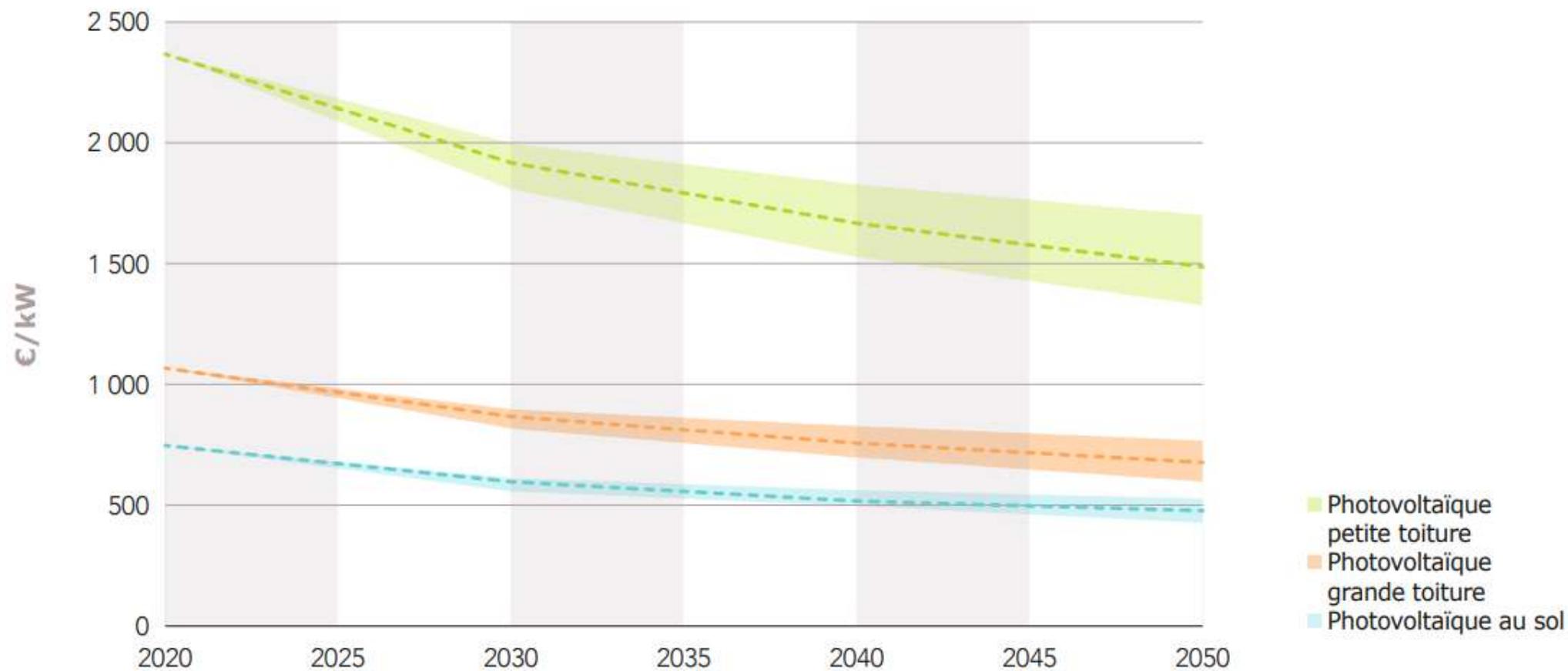
Évolution du coût complet du système électrique, avec les hypothèses de coût de référence (l'aire représente l'ensemble des scénarios de mix considérés)



# Photovoltaïque et économie d'échelle

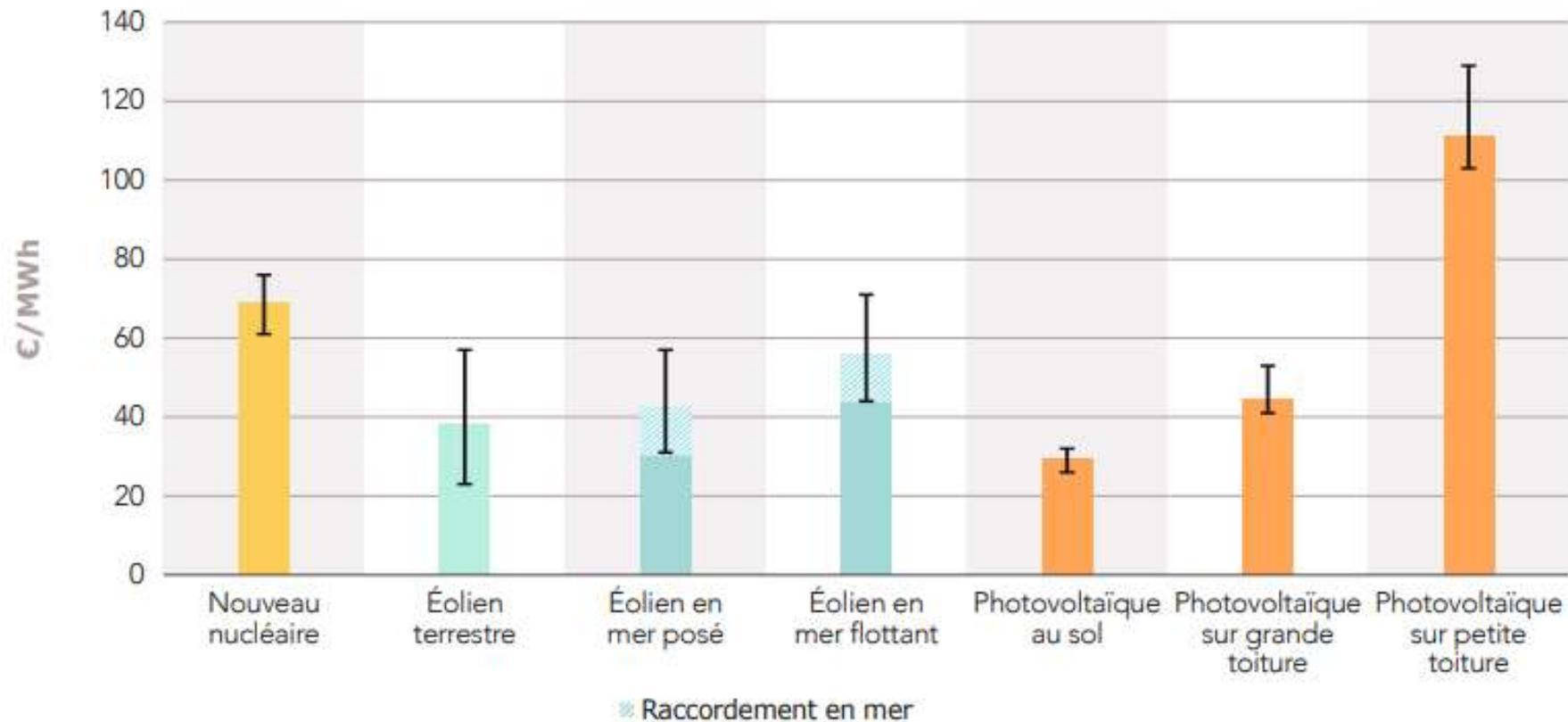
**Figure 11.9**

Évolution des coûts d'investissement en photovoltaïque à l'horizon 2050 (hors raccordement)



# Compétitivité de la plupart des EnR par rapport au nucléaire sur le seul poste du coût brut de production

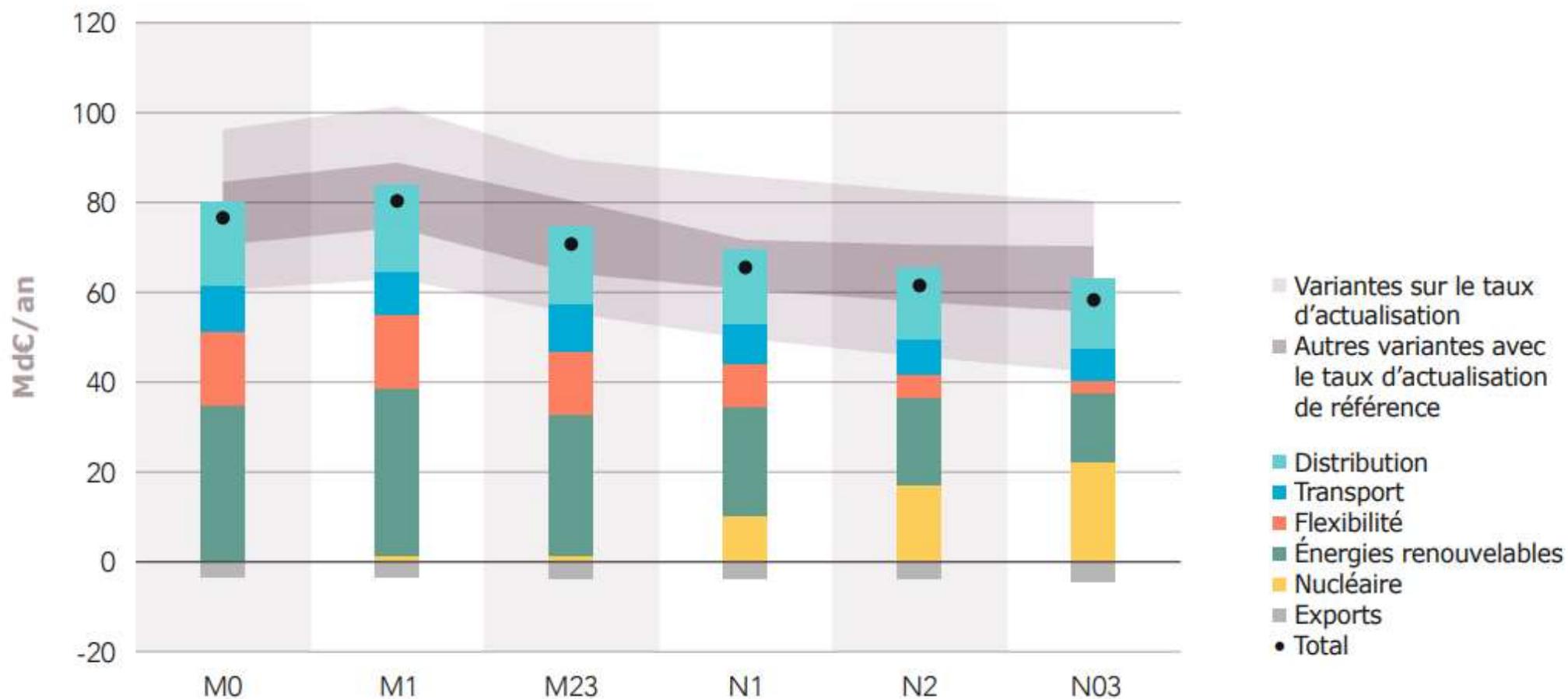
**Figure 11.13** Coût des principales filières de production rapporté à l'énergie produite pour des installations mises en service à l'horizon 2050



Coûts de production (dont coût de raccordement pour l'éolien en mer), variantes sur les hypothèses de coûts d'investissement et d'opération et maintenance, avec taux d'actualisation fixe à 4% pour toutes les technologies

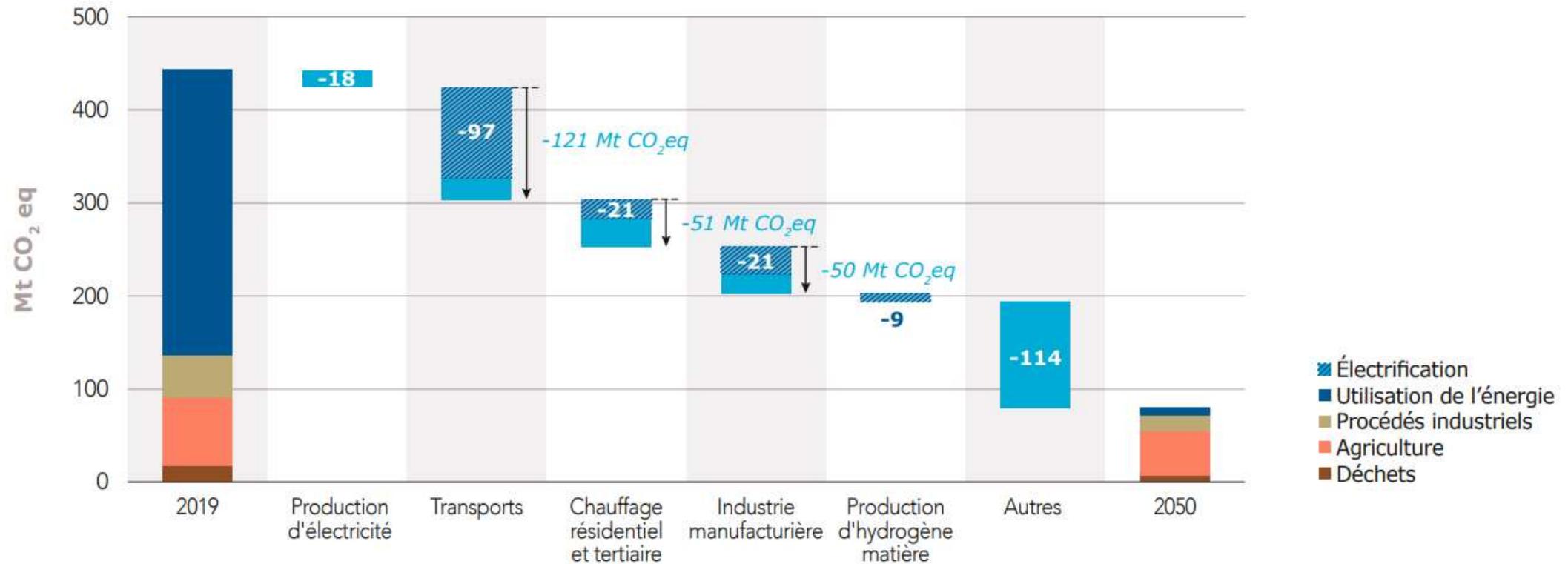
# Les scénarios nucléaires économisent réseaux et flexibilité

**Figure 11.33** Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



# Les transferts d'usages vers l'électricité représentent plus de 50% des baisses d'émissions liées à l'énergie projetées à l'horizon 2050

**Figure 12.14** Évolution des émissions de gaz à effet de serre territoriales de la France et contribution du système électrique à la décarbonation de l'économie à l'horizon 2050



NB : la catégorie «Autres» regroupe la baisse des émissions liées à l'agriculture, au traitement des déchets, aux procédés industriels et le reste des émissions liées à l'énergie dans le secteur du bâtiment (équipements domestiques, cuisson, etc.) et le secteur de la construction

# Un réseau hérité des précédentes transitions énergétiques

