



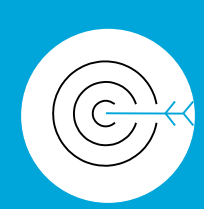
Le réseau  
de transport  
d'électricité

# Futurs énergétiques 2050

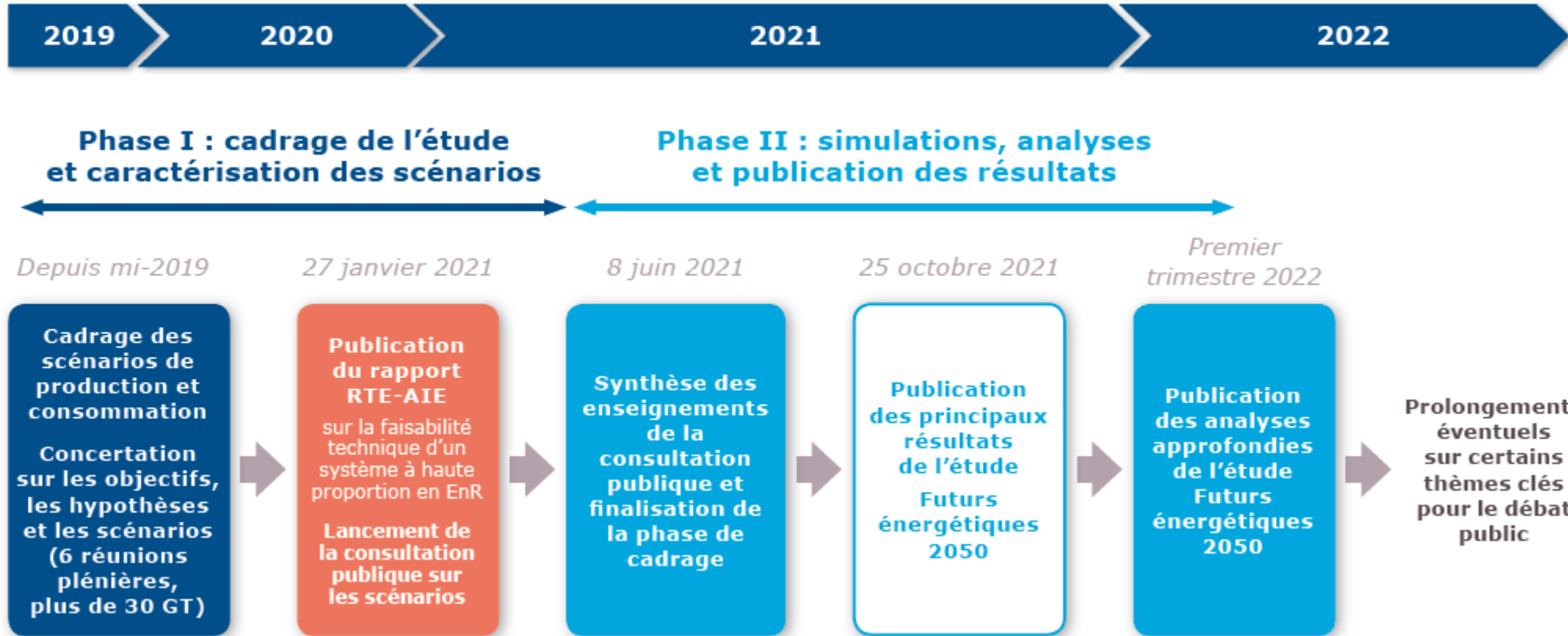
---

Collège de France

19 janvier 2022

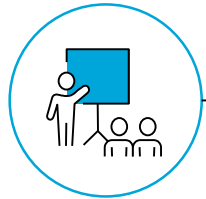


# Futurs énergétiques 2050 : une étude dans la continuité des missions de service public de RTE





# Un dispositif de concertation inédit



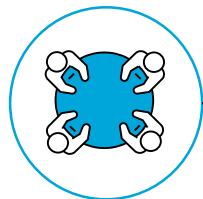
**7** réunions plénières



**9** groupes de travail



**120** organisations représentées



**40** réunions techniques



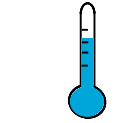
**1500** pages de documents de cadrage produits pendant la concertation



**4000** réponses reçues à la consultation publique



# Les grands paramètres de l'étude



## Evolution du climat

Trajectoires climatiques

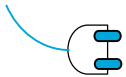
Aléas climatiques extrêmes



## Cadrage macro-économique

PIB

Démographie



## Evolution de la consommation d'électricité

Part de l'industrie

Sobriété et modes de vie

Efficacité énergétique

Electrification des usages

Recours à l'hydrogène



## Production d'électricité

Arrêts des réacteurs nucléaires existants

Développement du nouveau nucléaire

Production d'énergies renouvelables



## Moyens de flexibilités

Développement des interconnexions

Flexibilités de la demande

Compétitivité des solutions de flexibilités



## Contexte européen

Variantes sur l'évolution des mix des pays voisins



## Composantes du chiffrage économique

Coûts unitaires des actifs de production

Taux d'actualisation

Coût du capital

## Référence

**RCP 4.5**  
GIEC

+ 1,3 %/an  
A partir de 2030

69 M hbts  
En 2050

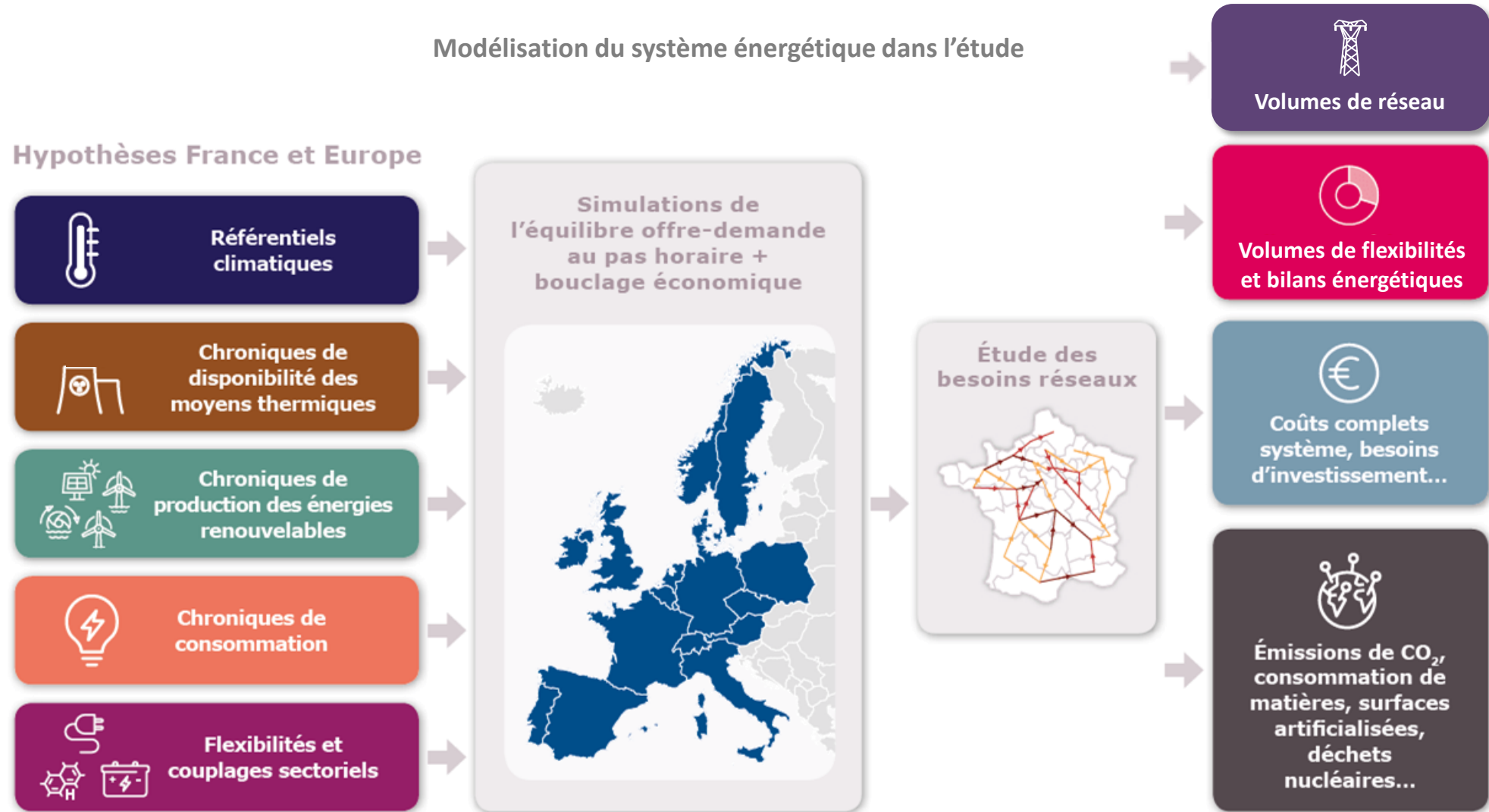
Industrie manufacturière  
10% du PIB

Dépend de chaque scénario

39 GW d'interconnexions

Transition réussie dans les pays voisins

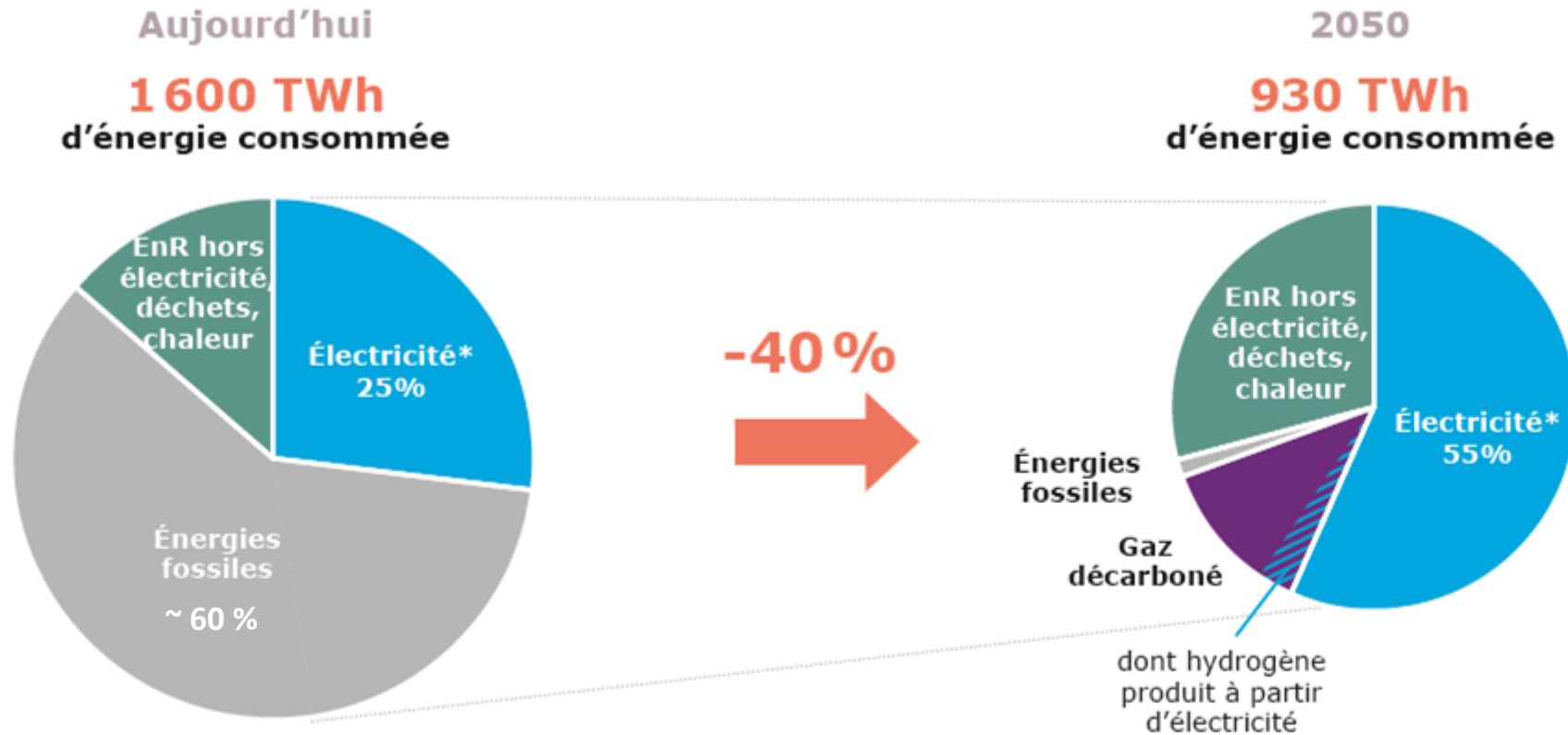
Coût du capital  
4% [1 – 7%]





# L'univers de l'étude : la SNBC pour sortir des énergies fossiles

## Consommation d'énergie finale en France (SNBC)

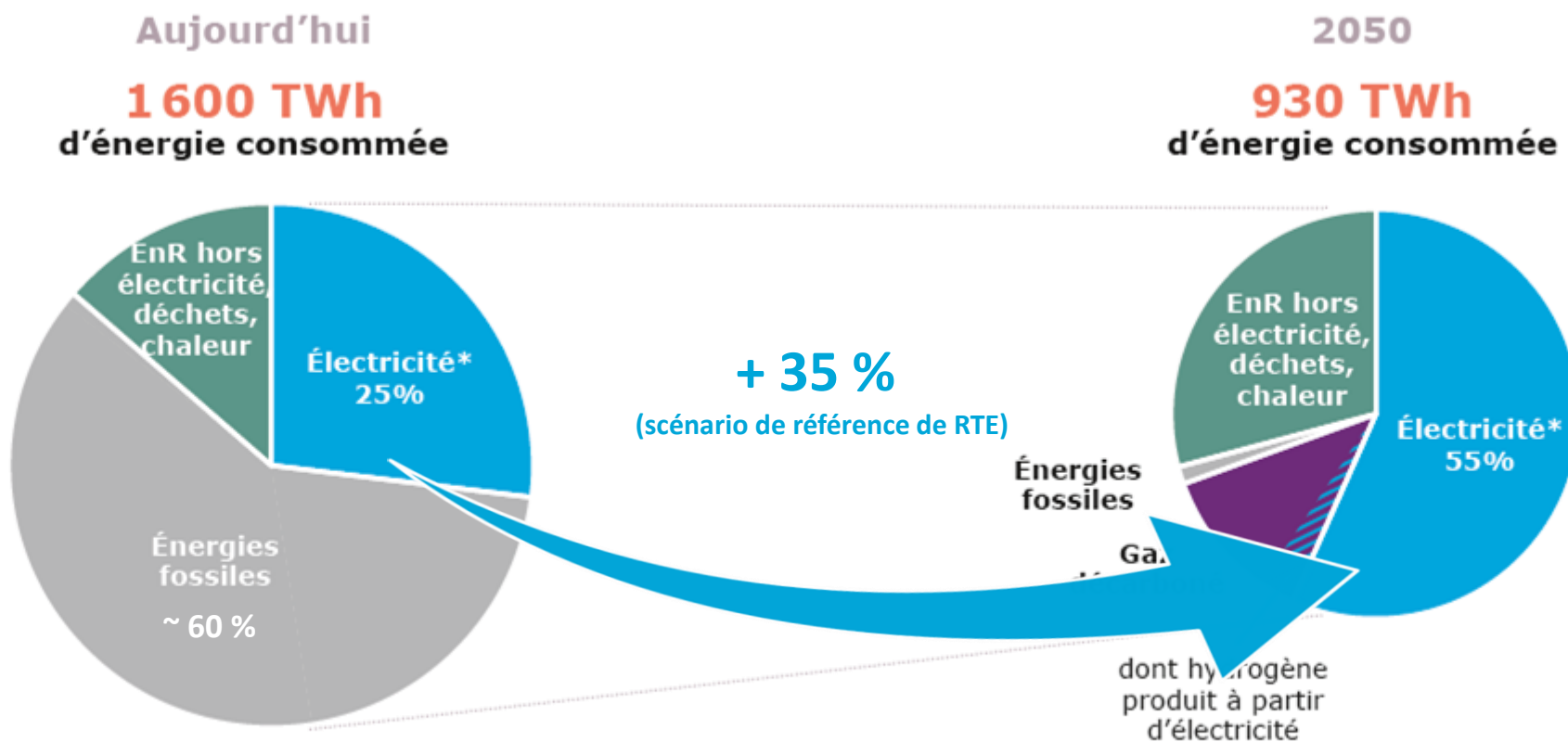


\* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)  
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh



# Premier défi : augmenter la production d'électricité décarbonée

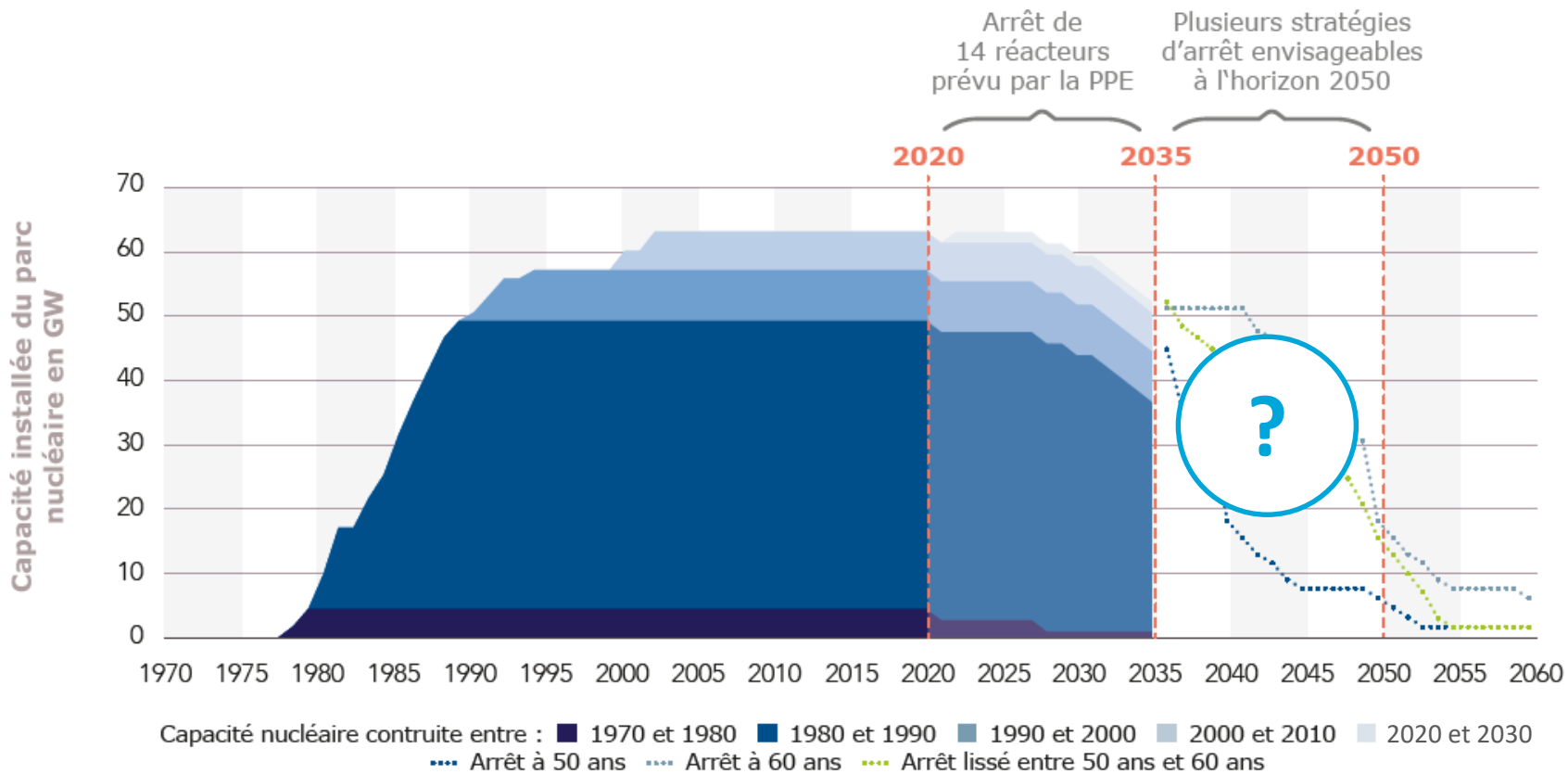
## Consommation d'énergie finale en France (SNBC)



\* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)  
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh



# Second défi : remplacer le parc nucléaire de seconde génération



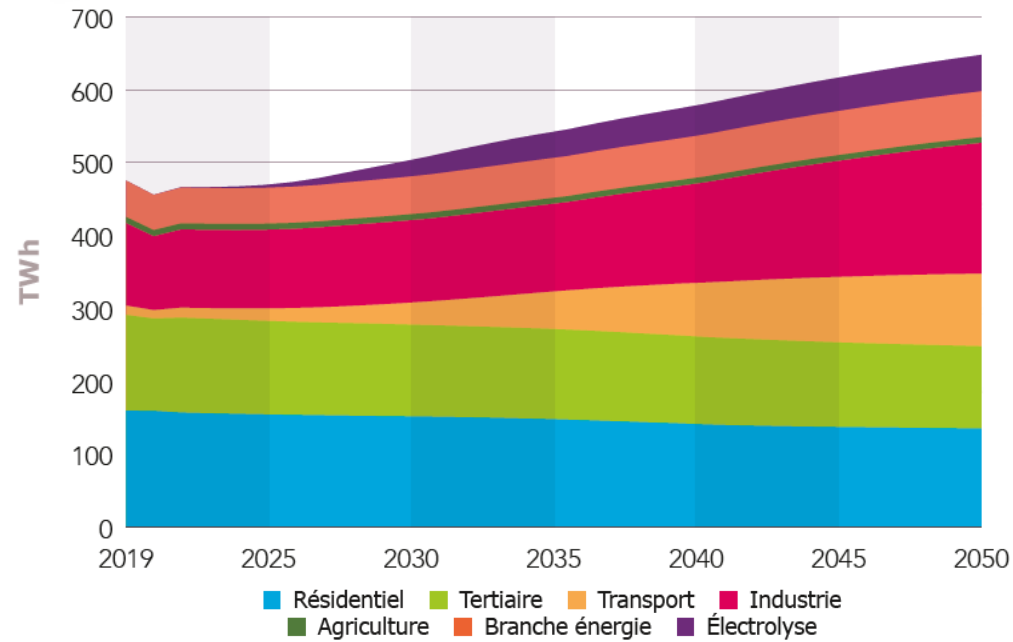


# La consommation

.....

*Futurs énergétiques 2050*

## 1 Trajectoire de référence 645 TWh

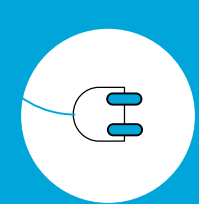


## 2 Scénario sobriété 555 TWh

- Habitat
- Déplacements
- Industrie
- Travail

## 3 Scénario de réindustrialisation profonde 755 TWh

Part de l'industrie manufacturière dans le PIB à 12-13%



**1**

**Agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre les objectifs climatiques**

**2**

**La consommation d'énergie va baisser mais celle d'électricité va augmenter pour se substituer aux énergies fossiles**

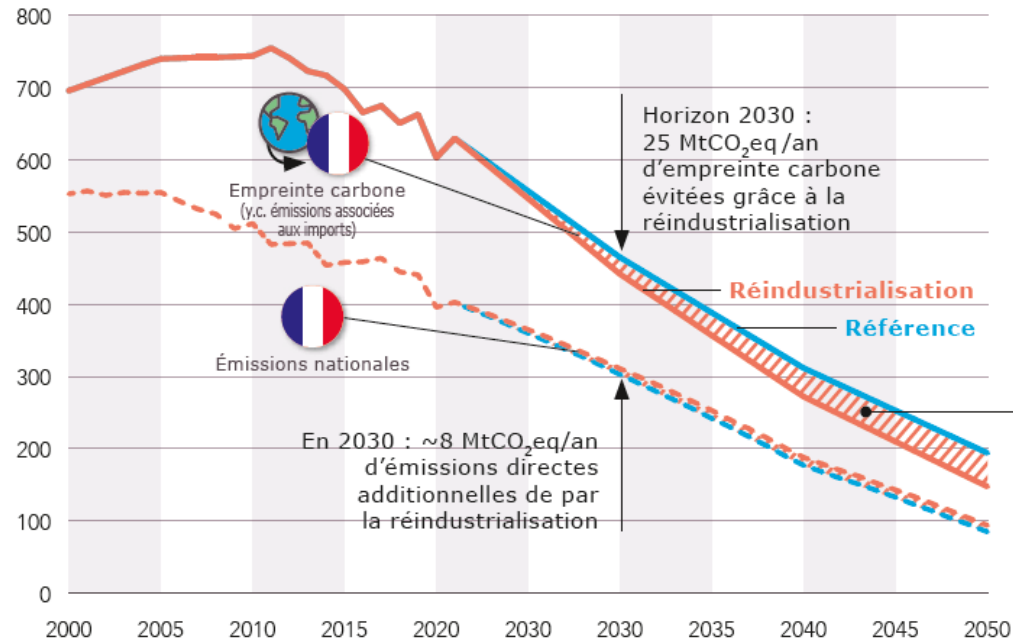
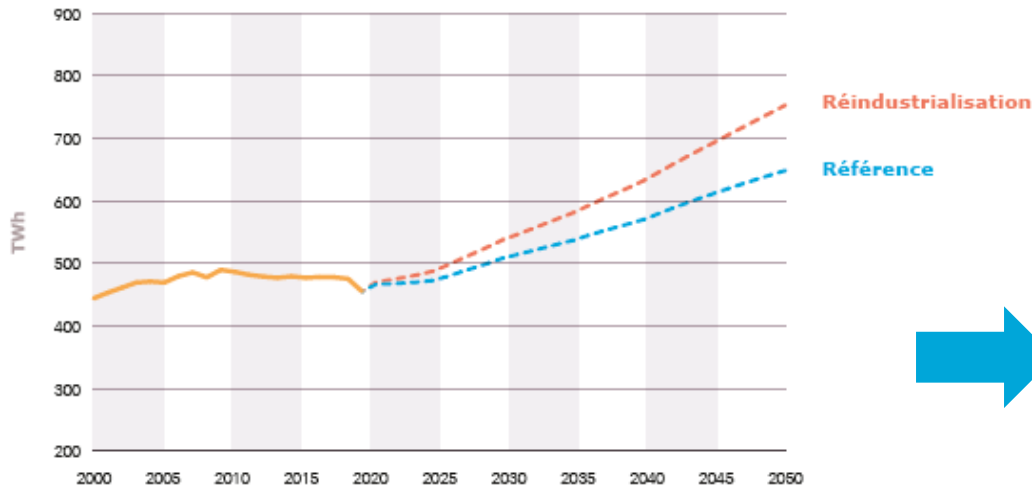


# Augmentation de la consommation d'électricité en France mais réduction de l'empreinte carbone du pays

## Effets du scénario de réindustrialisation profonde sur les émissions territoriales et l'empreinte carbone de la France



Projection de la consommation d'électricité en France avec ou sans réindustrialisation profonde

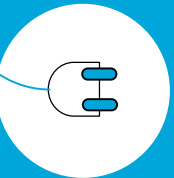


900 MtCO<sub>2</sub>eq évitées sur la trajectoire 2020-2050

Division par 6 des émissions de CO<sub>2</sub> produites sur le sol français

- Le scénario « réindustrialisation profonde » permet d'économiser 900 MtCO<sub>2</sub>eq en empreinte carbone sur la trajectoire d'ici à 2050 (25 MtCO<sub>2</sub>eq/an à l'horizon 2030, 40 MtCO<sub>2</sub>eq/an à l'horizon 2040)
- L'effet sur les émissions nationales est en revanche très légèrement haussier

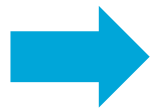
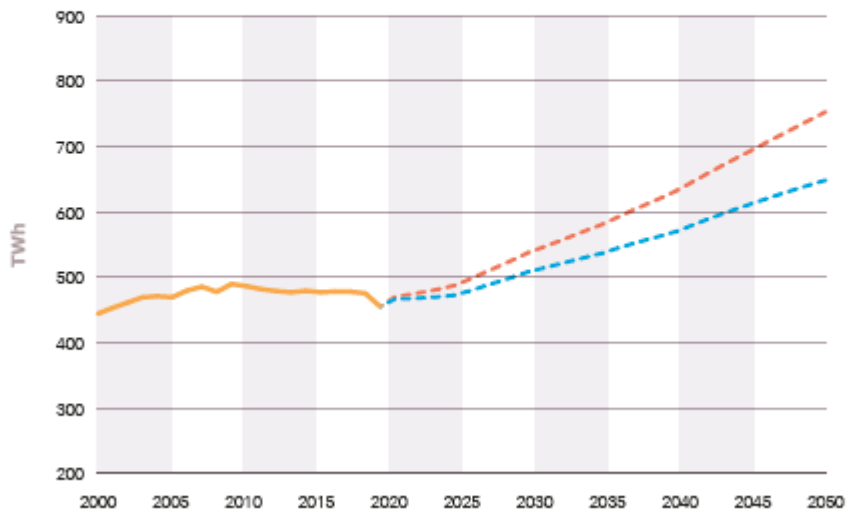




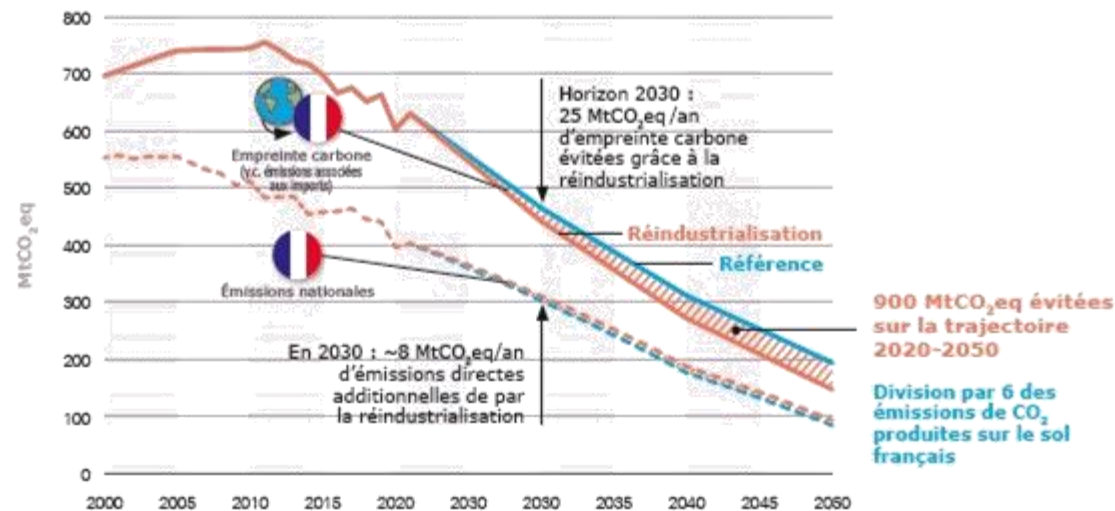
## Enseignement n°3 Effets d'une réindustrialisation profonde sur la consommation d'électricité en France et sur l'empreinte carbone

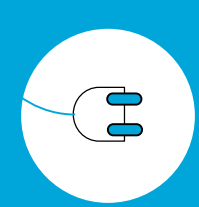


Projection de la consommation d'électricité en France avec ou sans réindustrialisation profonde



Effets du scénario de réindustrialisation profonde sur les émissions territoriales et l'empreinte carbone de la France





1

Agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre les objectifs climatiques

2

La consommation d'énergie va baisser mais celle d'électricité va augmenter pour se substituer aux énergies fossiles

3

**Accélérer la réindustrialisation du pays, en électrifiant les procédés, augmente la consommation d'électricité mais réduit l'empreinte carbone de la France**

# La transformation du mix

.....

*Futurs énergétiques 2050*





**M0**  
100 % EnR  
en 2050

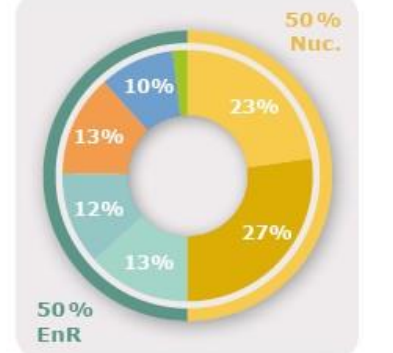
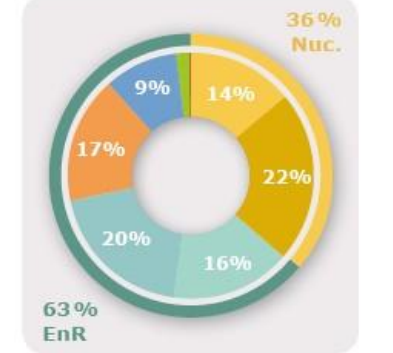
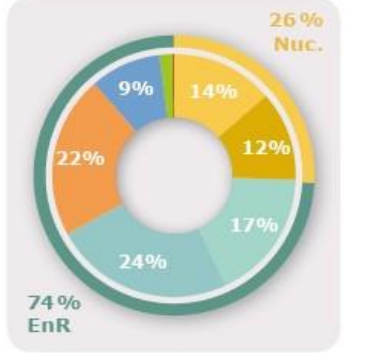
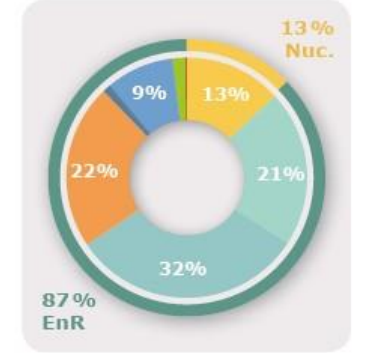
**M1**  
EnR répartition  
diffuse

**M23**  
EnR grands parcs

**N1**  
EnR + nouveau  
nucléaire 1

**N2**  
EnR + nouveau  
nucléaire 2

**N03**  
EnR + nouveau  
nucléaire 3



### Les scénarios « M »

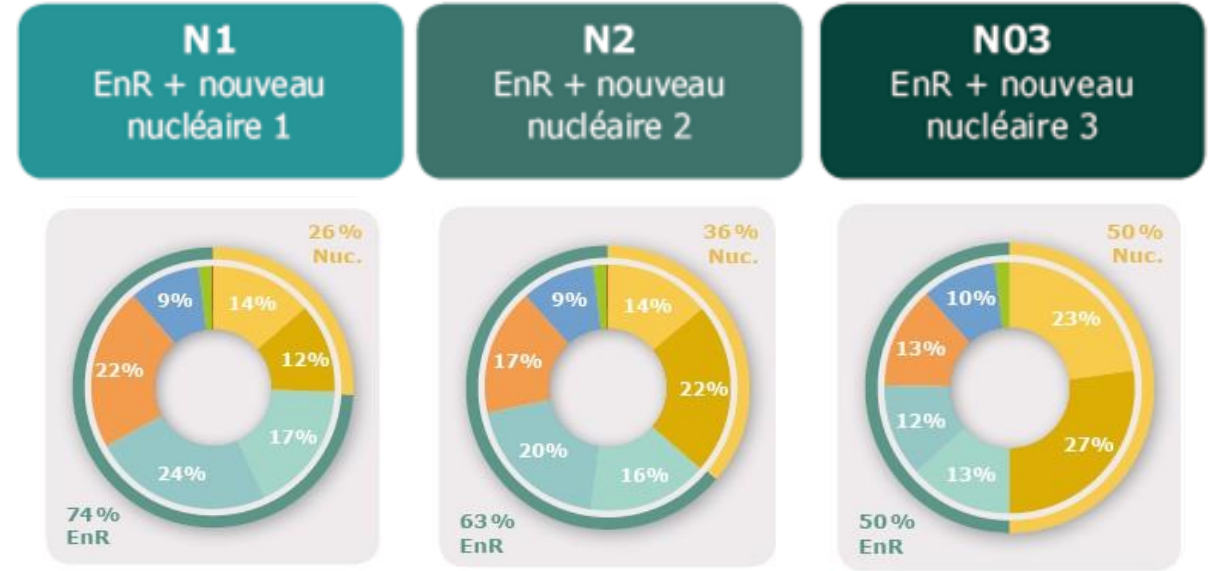
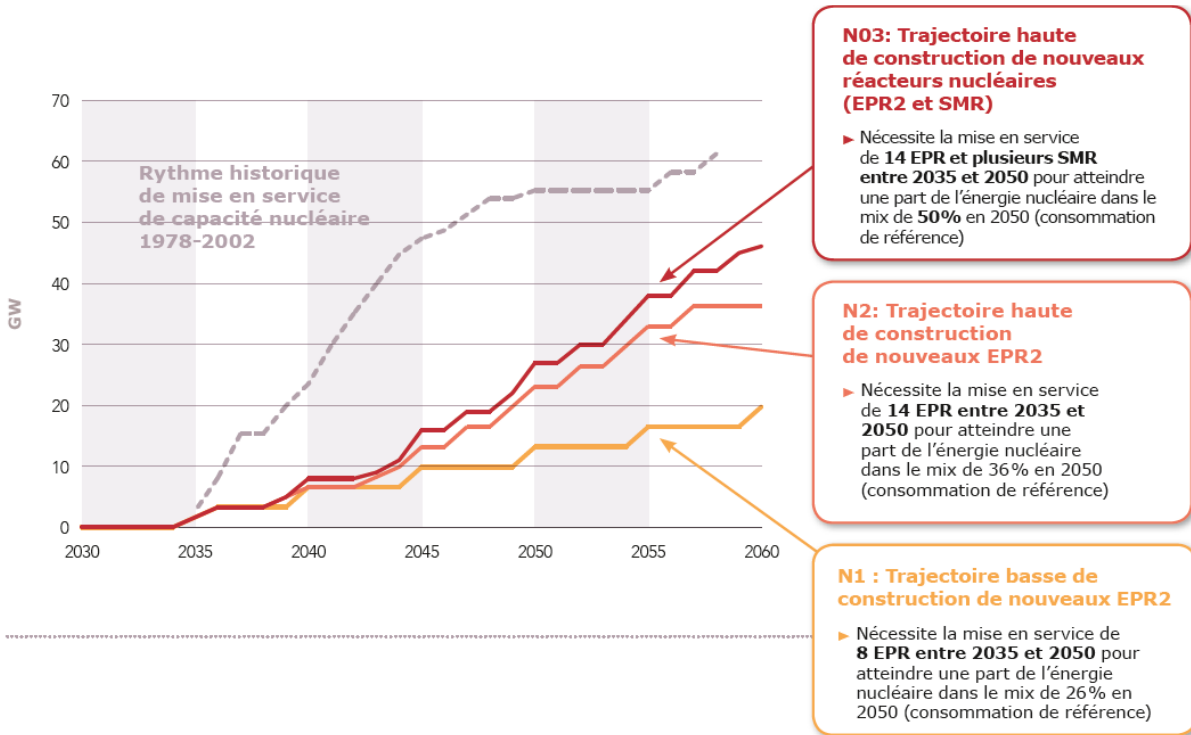
Sans nouveau nucléaire, atteinte du 100% renouvelable en 2050 ou 2060

### Les scénarios « N » Avec nouveau nucléaire

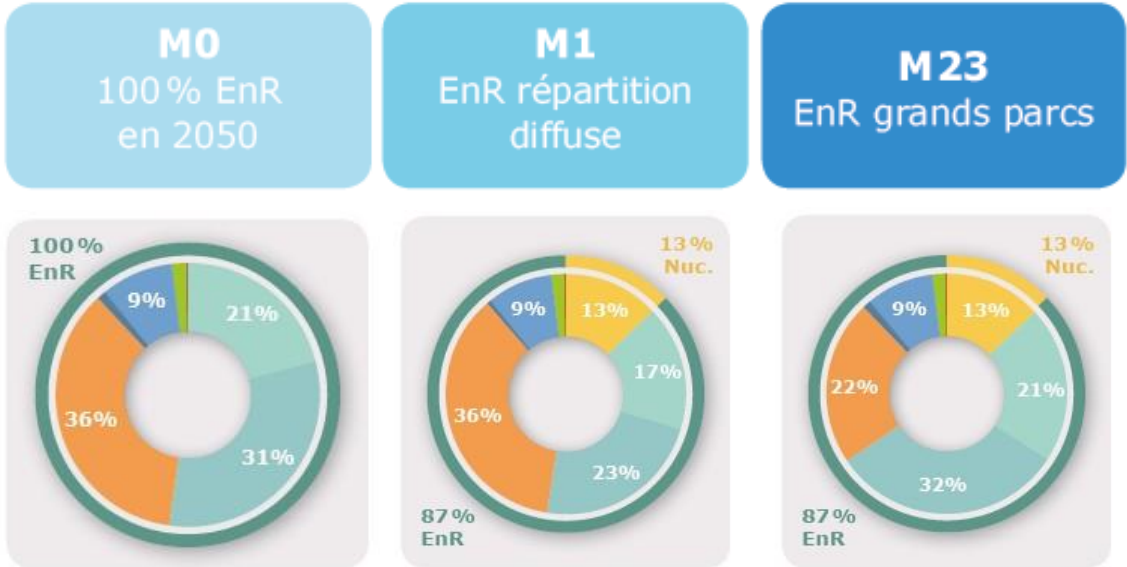




## Trajectoires de développement de nouveaux réacteurs nucléaires envisagés dans l'étude



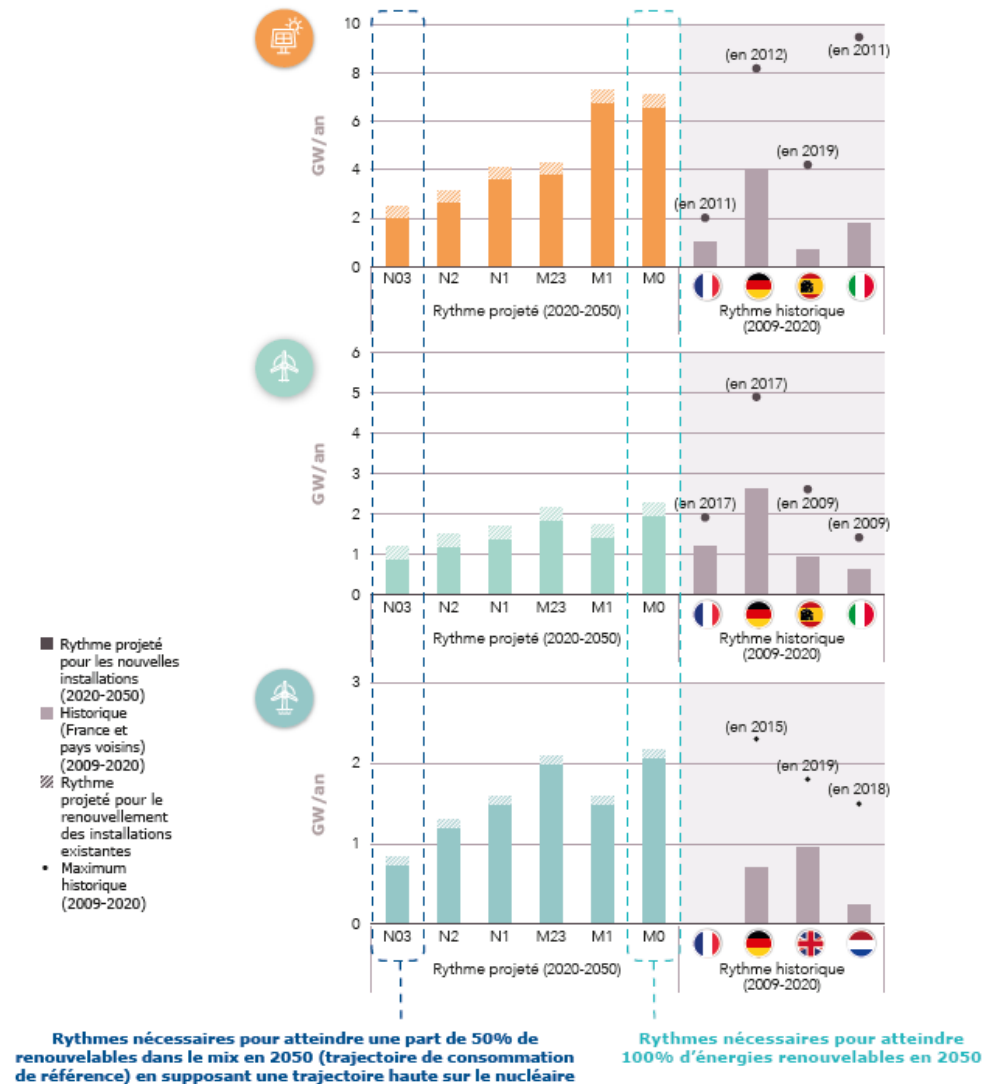
## Les scénarios « N » Avec nouveau nucléaire



## Les scénarios « M »

**Sans nouveau nucléaire, atteinte du 100% renouvelable en 2050 ou 2060**

## Rythmes nécessaires de développement des énergies renouvelables





4

**Atteindre la neutralité carbone en 2050 est impossible sans un développement significatif des énergies renouvelables**

5

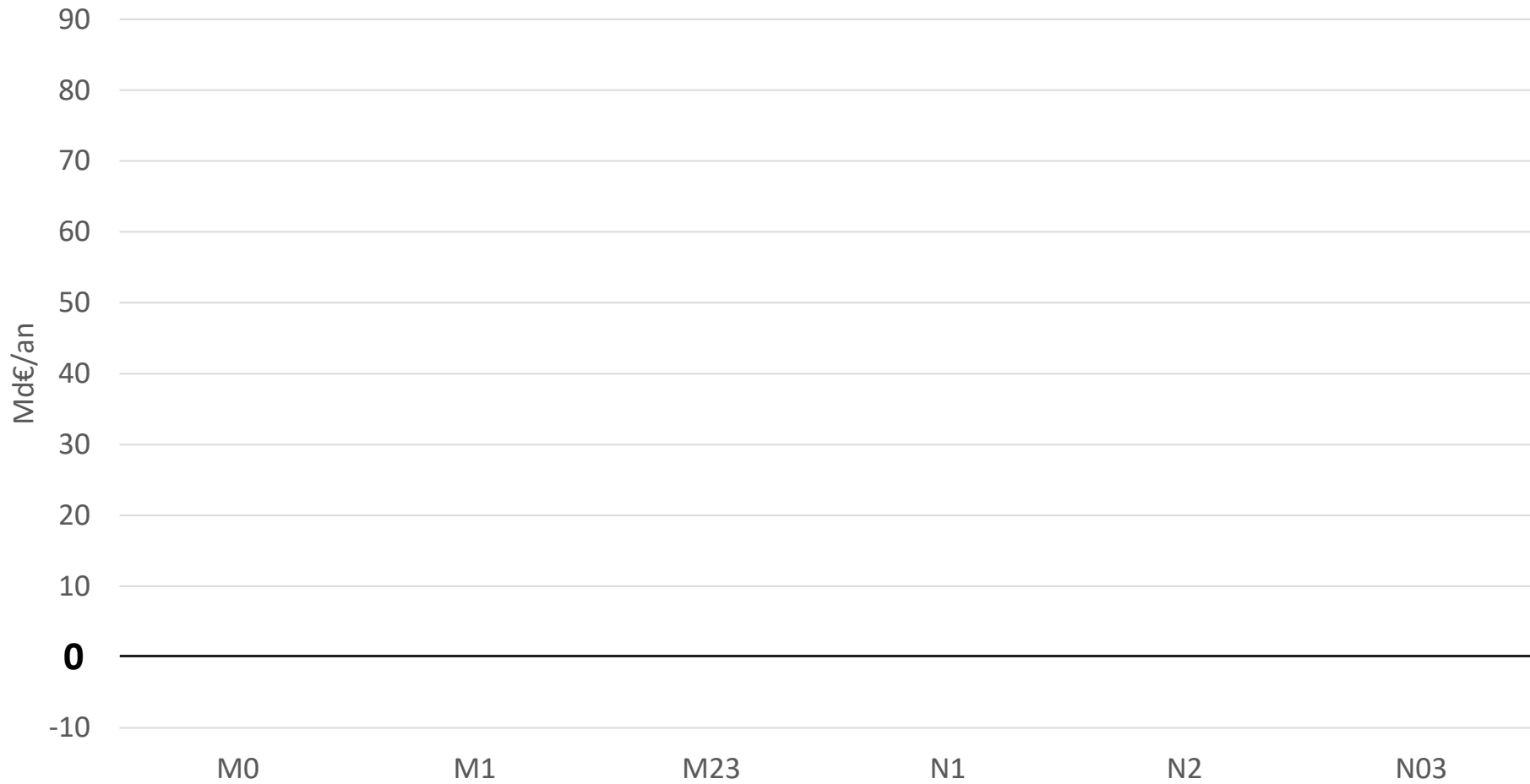
**Se passer de nouveaux réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables plus rapides que ceux des pays européens les plus dynamiques**

# Economie

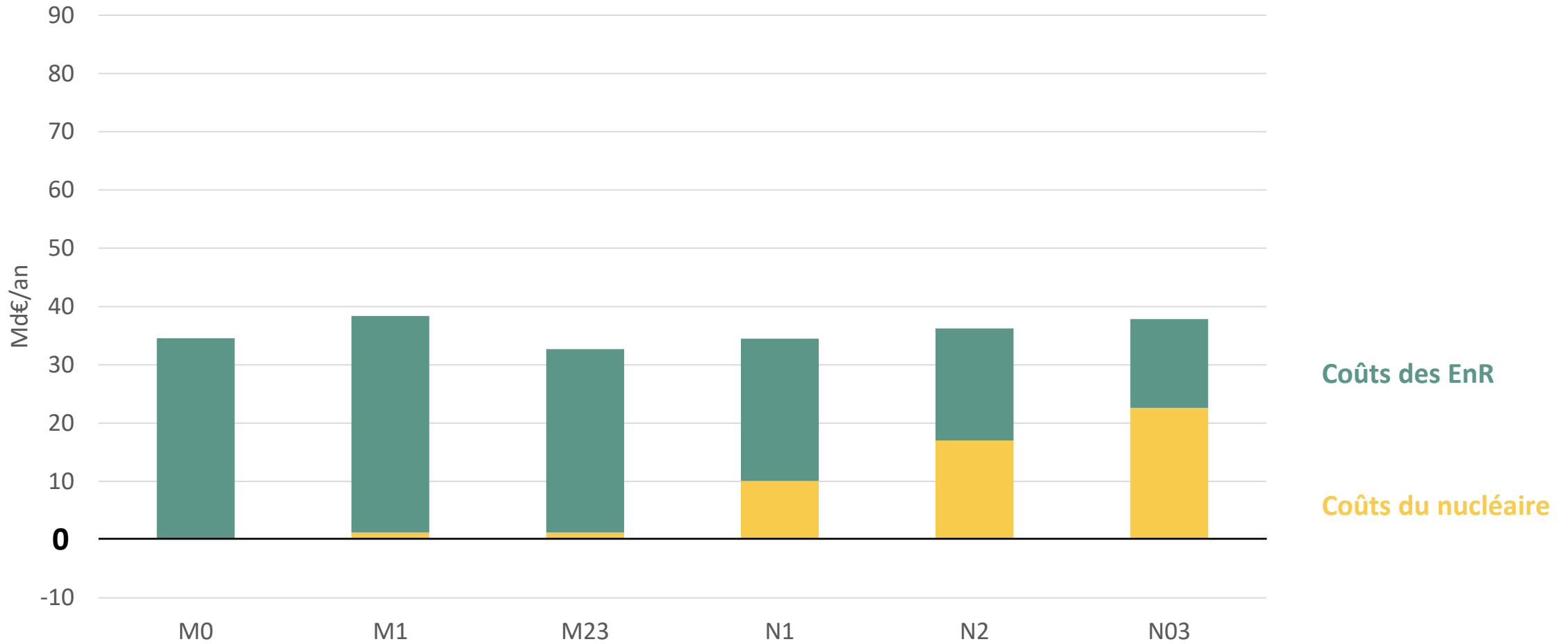
.....

*Futurs énergétiques 2050 - principaux enseignements*

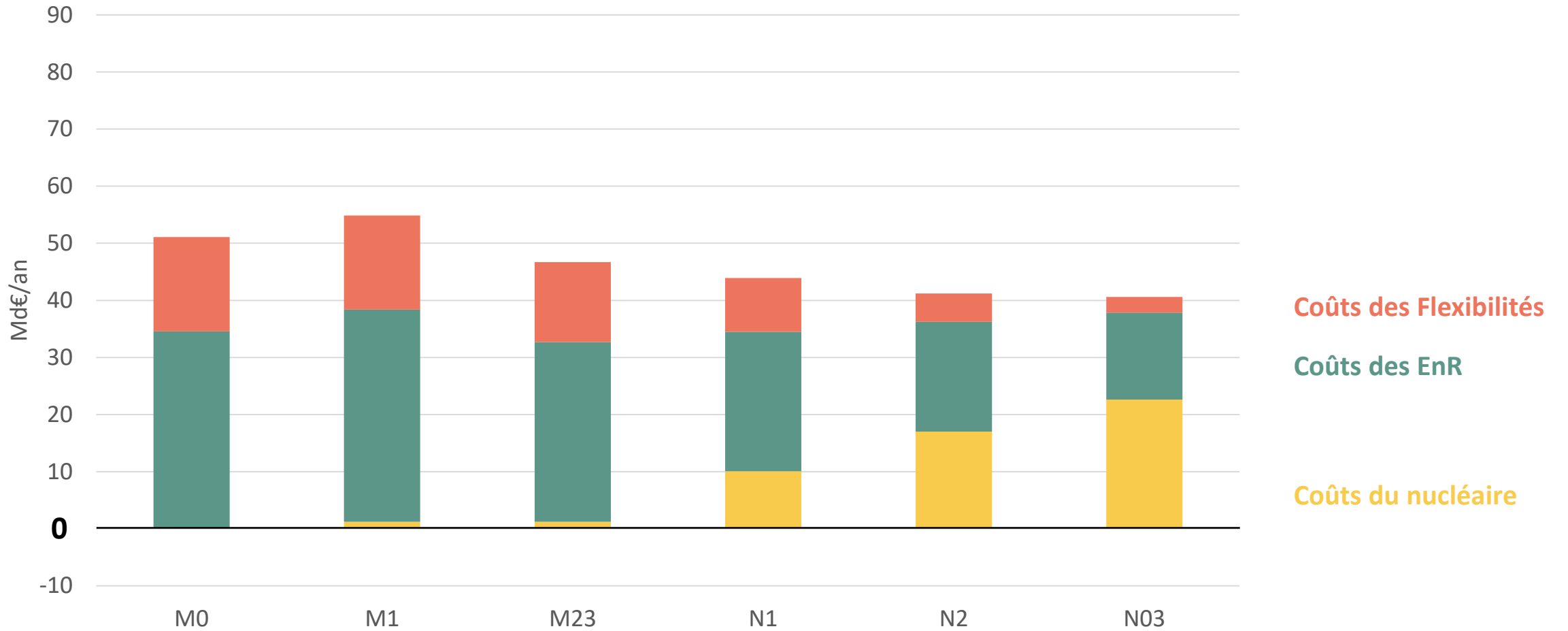
## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



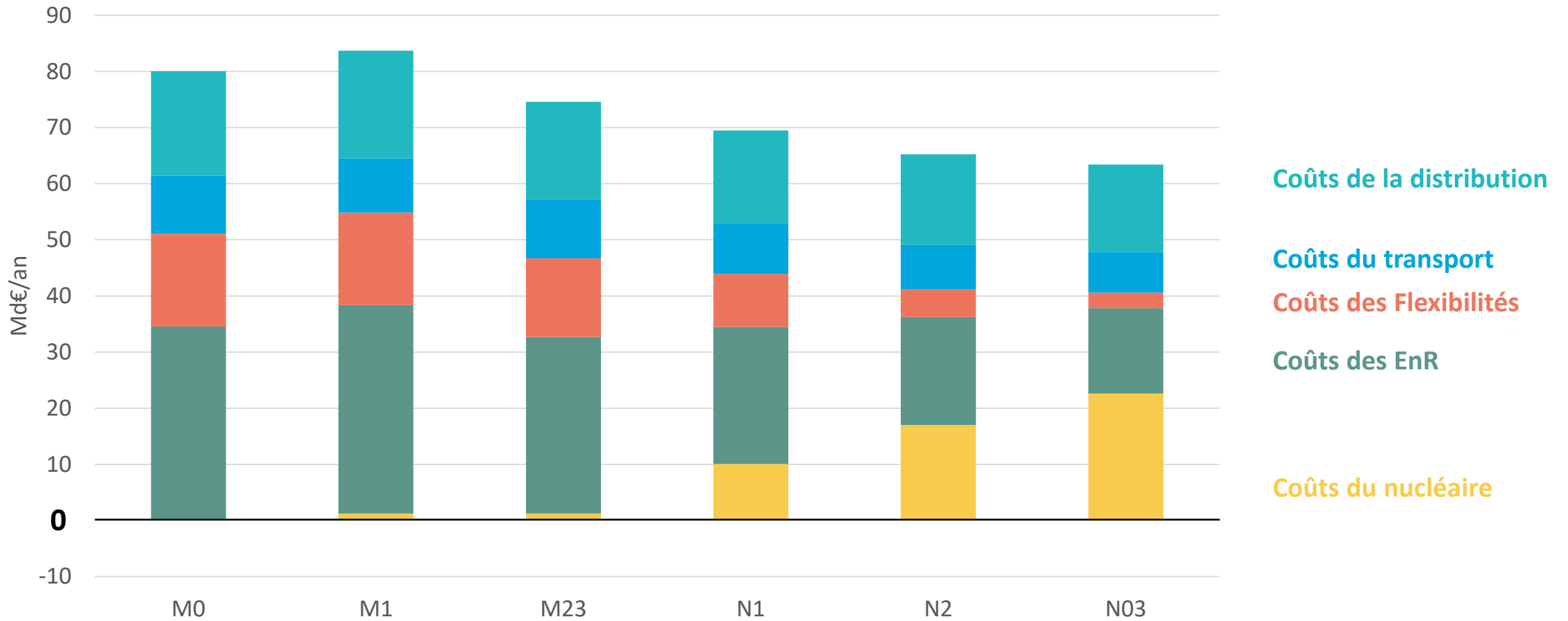
## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060

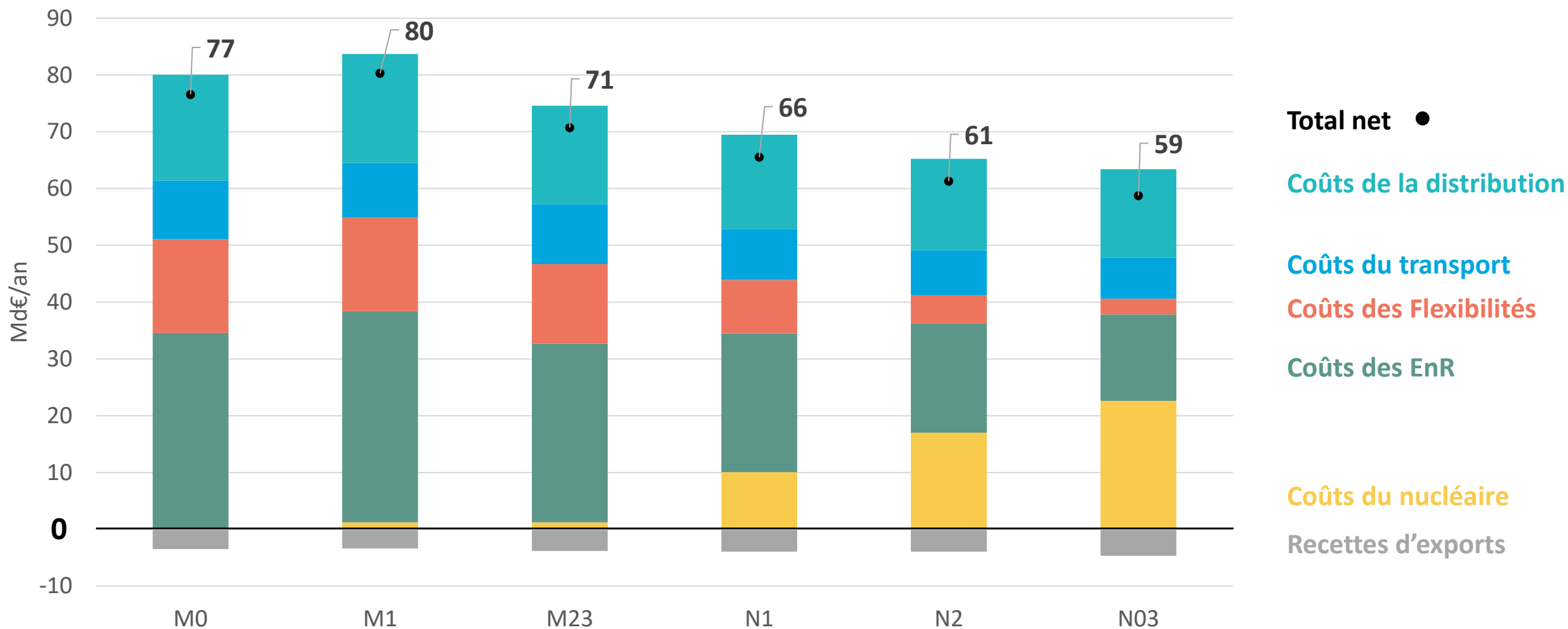


## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060

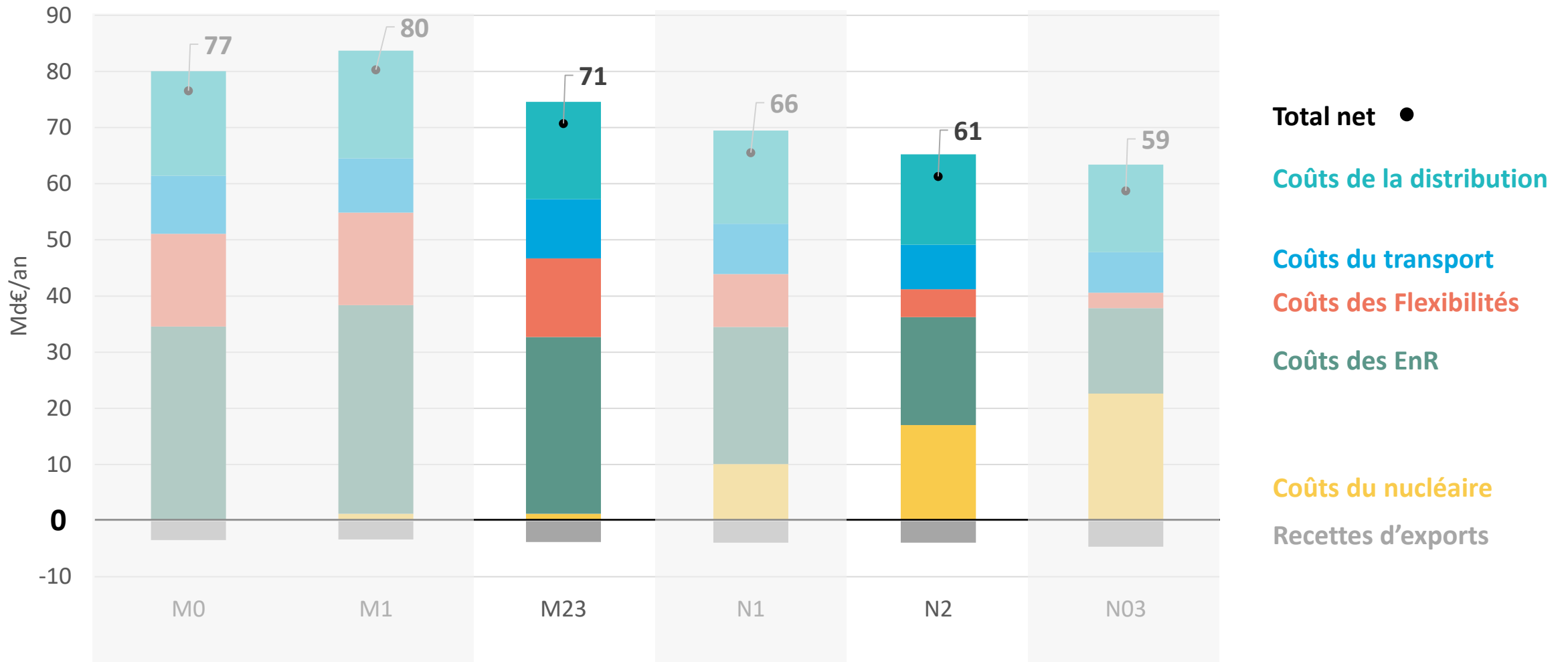




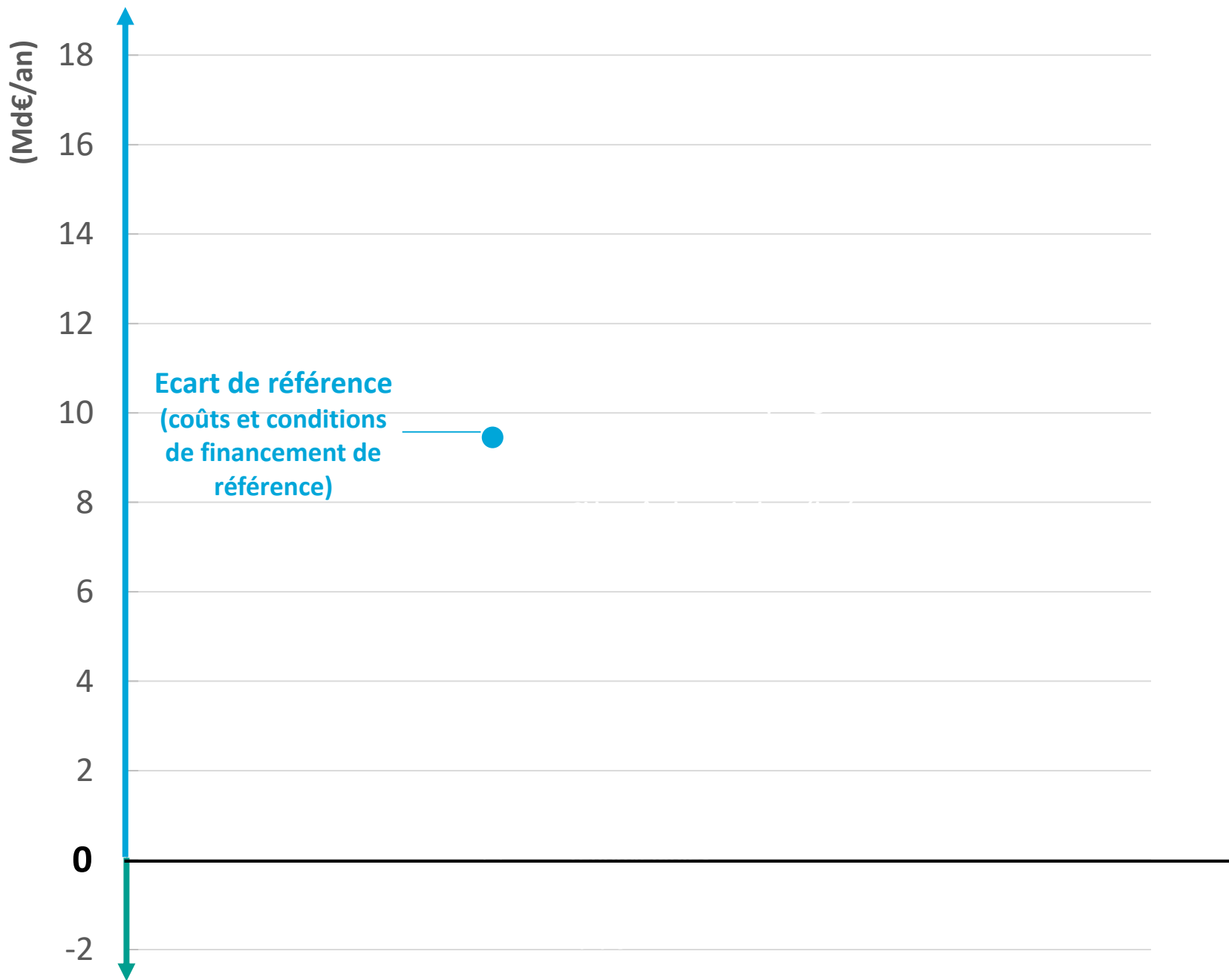
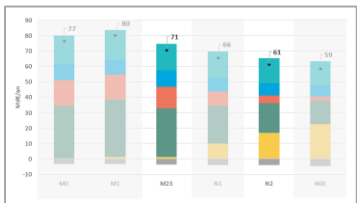
## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



## Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



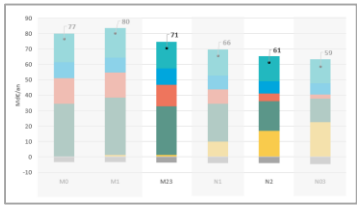
# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)



**N2 moins cher que M23**

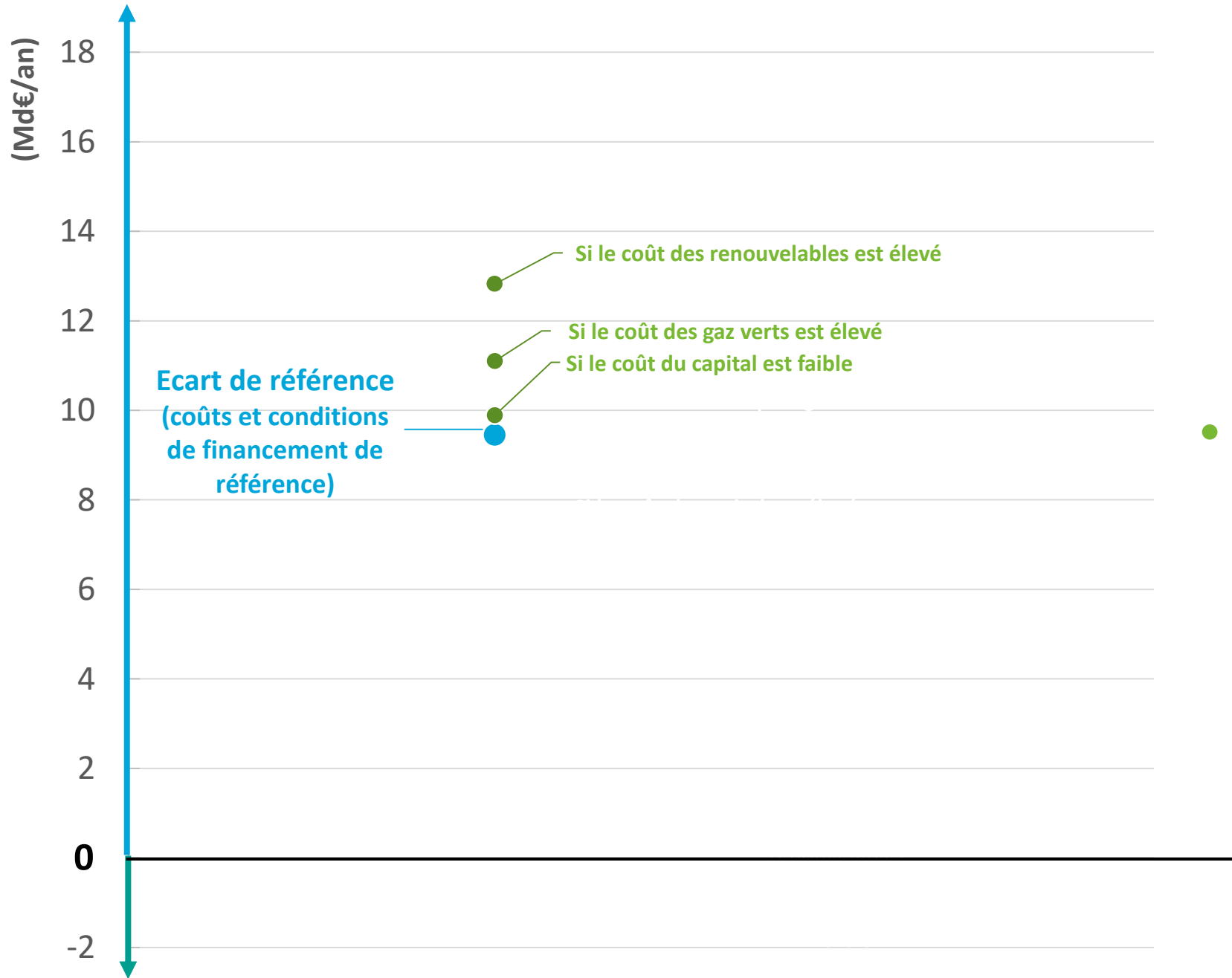
**N2 plus cher que M23**

# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)

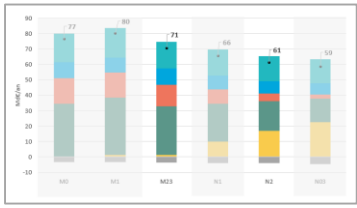


**N2 moins cher que M23**

**N2 plus cher que M23**

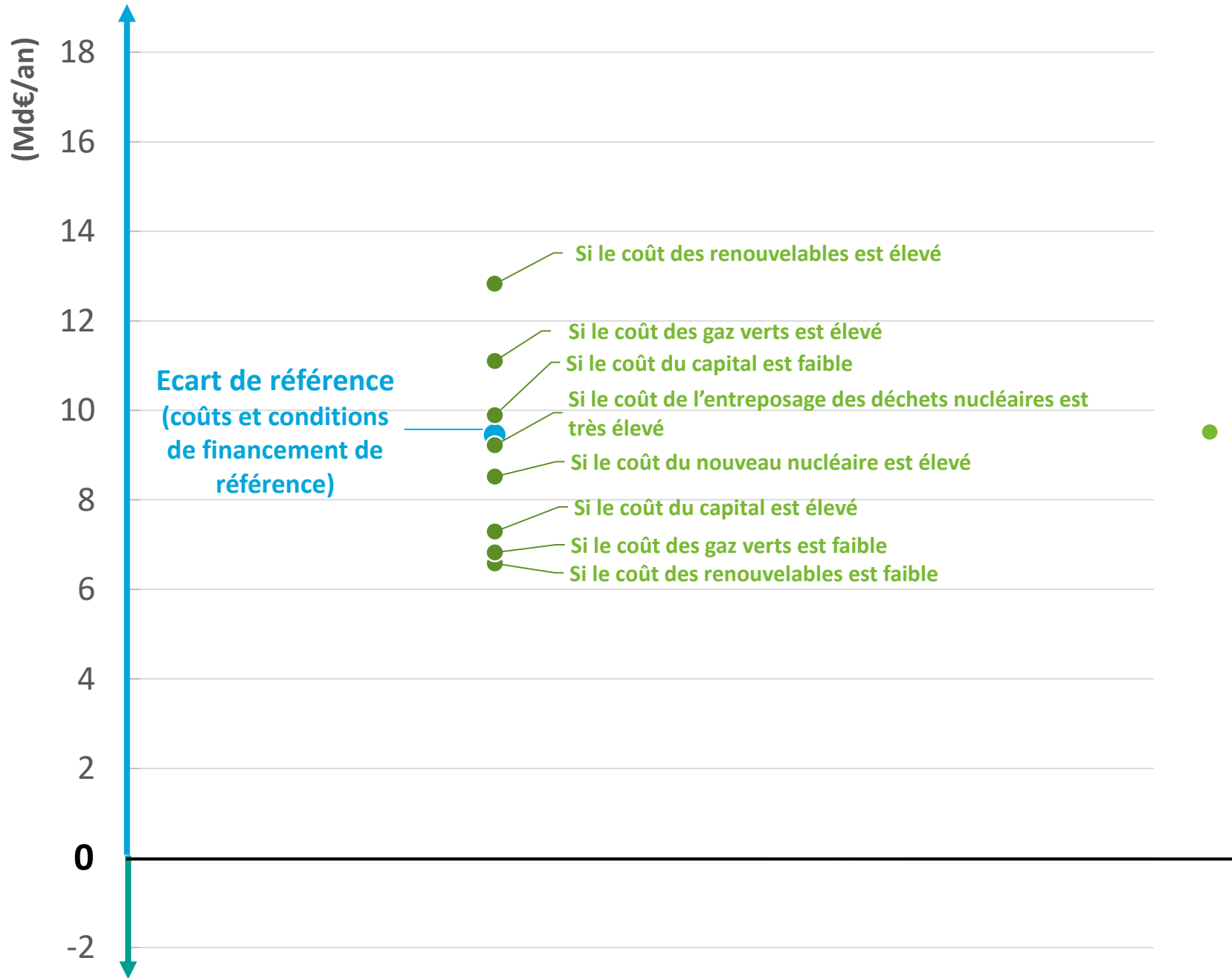


# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)

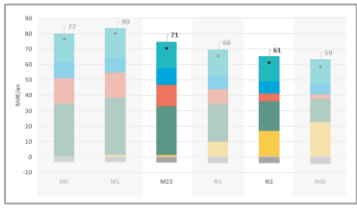


**N2 moins cher que M23**

**N2 plus cher que M23**

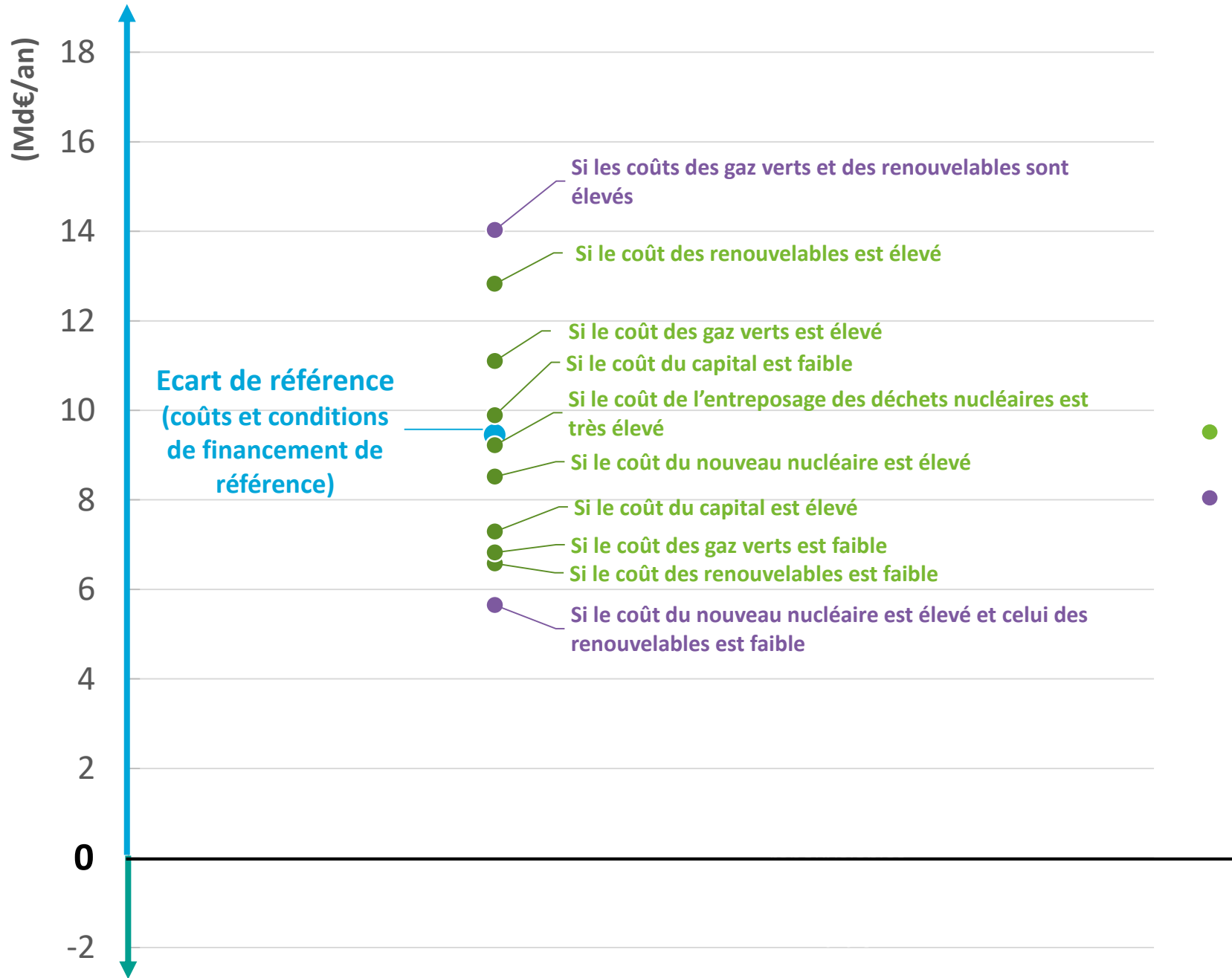


# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)

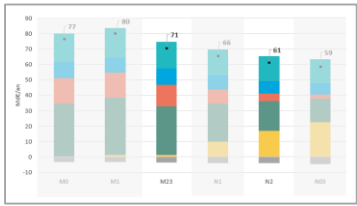


**N2 moins cher que M23**

**N2 plus cher que M23**

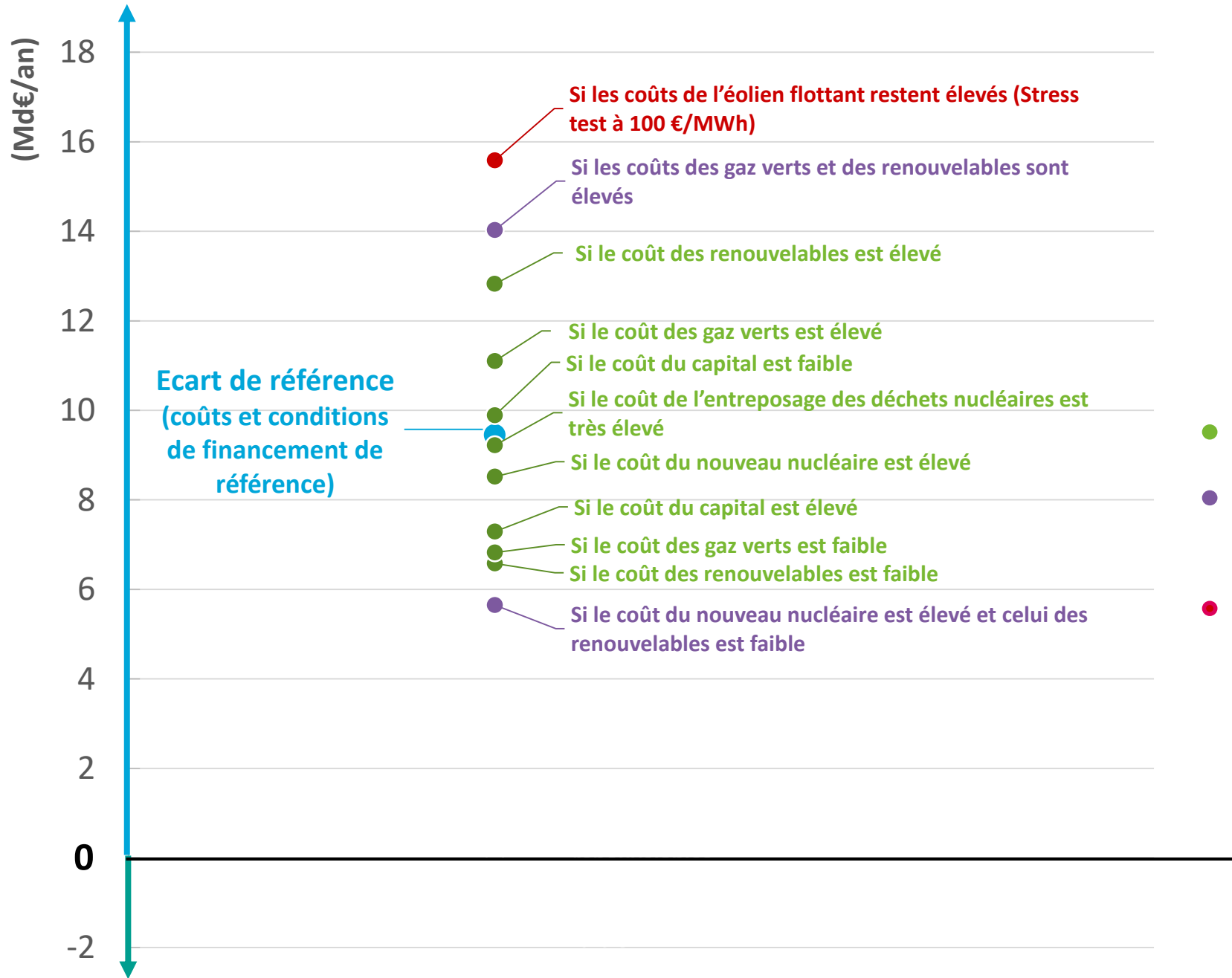


# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)



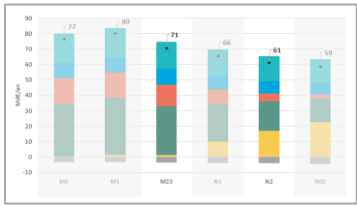
N2 moins cher que M23

N2 plus cher que M23



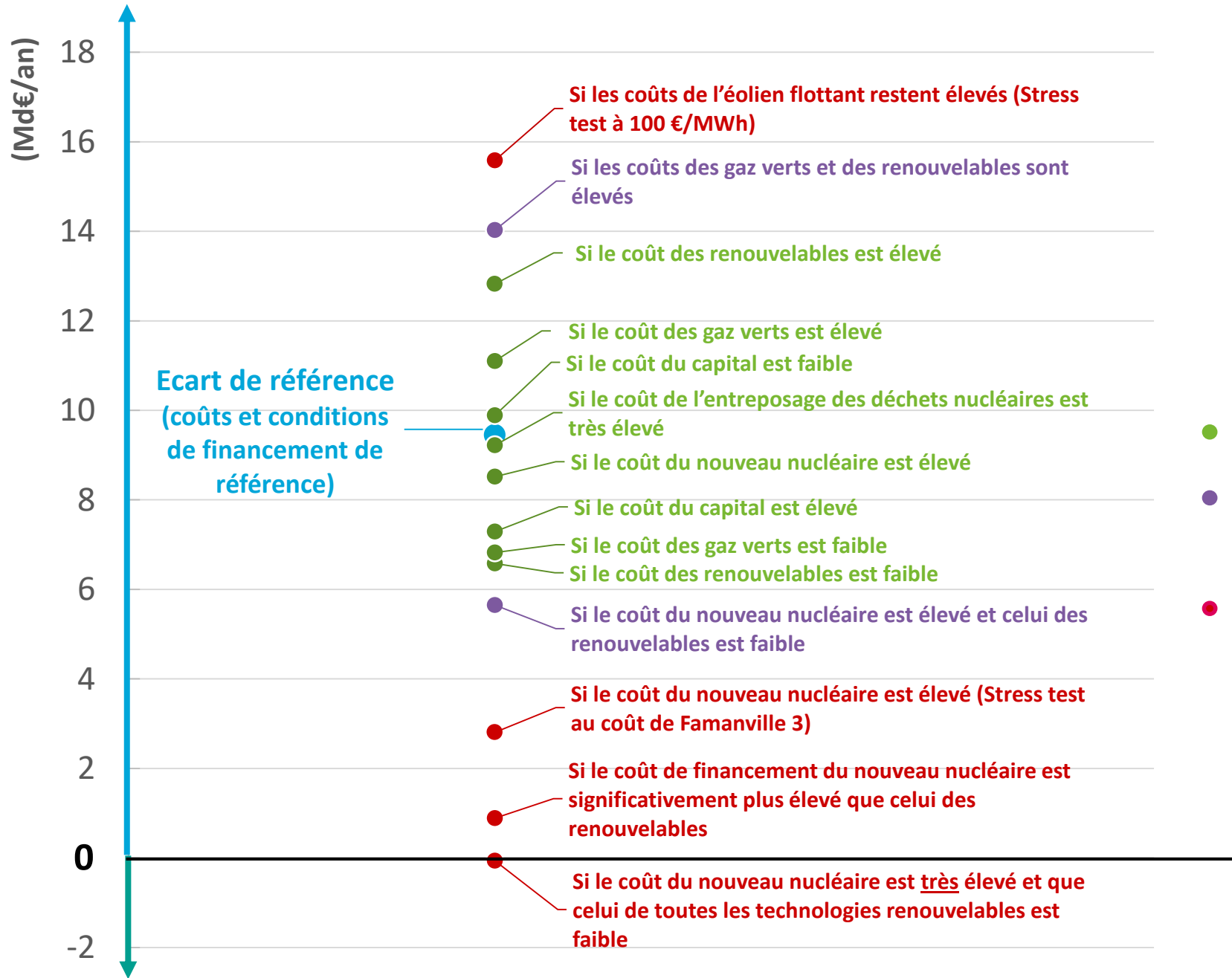
- Variation d'un paramètre
- Variation d'une combinaison de paramètres
- Stress test

# Evolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios N2 et M23 (en Md€/an)



**N2 moins cher que M23**

**N2 plus cher que M23**



- Variation d'un paramètre
- Variation d'une combinaison de paramètres
- Stress test





**6**

**Construire de nouveaux réacteurs nucléaires est pertinent du point de vue économique, *a fortiori* quand cela permet de conserver un parc d'une quarantaine de GW en 2050 (nucléaire existant et nouveau nucléaire)**

**7**

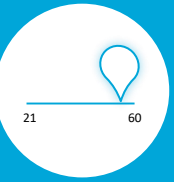
**Les énergies renouvelables électriques sont devenues des solutions compétitives. Cela est d'autant plus marqué dans le cas de grands parcs solaires et éoliens à terre et en mer**

**8**

**Les moyens de pilotage dont le système a besoin pour garantir la sécurité d'approvisionnement sont très différents selon les scénarios. Il existe un intérêt économique à accroître le pilotage de la consommation, à développer des interconnexions et le stockage hydraulique, ainsi qu'à installer des batteries pour accompagner le solaire. Au-delà, le besoin de construire de nouvelles centrales thermiques assises sur des stocks de gaz décarbonés (dont l'hydrogène) est important si la relance du nucléaire est minimale et il devient massif – donc coûteux – si l'on tend vers 100% renouvelables.**

**9**

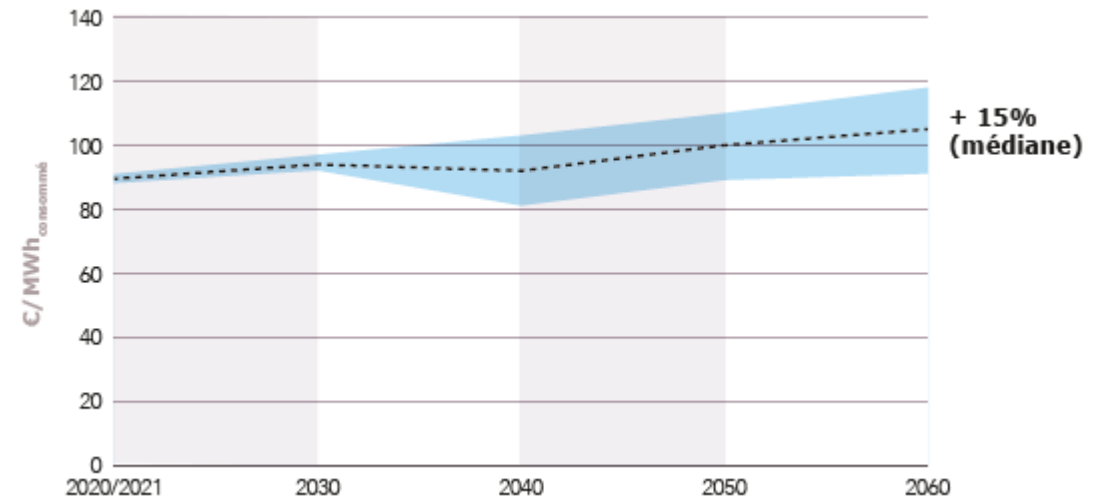
**Dans tous les scénarios, les réseaux électriques doivent être rapidement redimensionnés pour rendre possible la transition énergétique**



# Le coût rapporté au mégawattheure consommé est susceptible d'augmenter, mais dans des proportions maîtrisables

- Rapportés au mégawattheure d'électricité consommée, les coûts complets du système électrique pourraient augmenter de l'ordre de **15 % hors inflation**, en vision médiane, à un horizon de 40 ans
- L'évolution des coûts suit une **tendance haussière, maîtrisable**, mais est **différenciée selon les scénarios**
- Il existe une **large zone d'incertitude** : la borne basse de la fourchette peut être atteinte uniquement dans une configuration très favorable et dans les scénarios avec construction de nouveaux réacteurs nucléaires dans le cas où un **grand nombre de conditions** sont atteintes de manière simultanée
- Le système électrique de la neutralité carbone peut donc être atteint à un coût maîtrisable...
- Mais ceci ne doit pas masquer qu'une part importante des coûts de transition énergétique se situe à l'aval du système électrique, dans la **transformation des usages** (rénovation, remplacement des équipements et des véhicules...)

Coût complet du système électrique rapporté au volume d'électricité consommé (l'aire représente l'ensemble des scénarios de mix considérés)





16

**Pour 2050 : le système électrique de la neutralité carbone peut être atteint à un coût maîtrisable pour la France**

# Systeme et technologies

.....

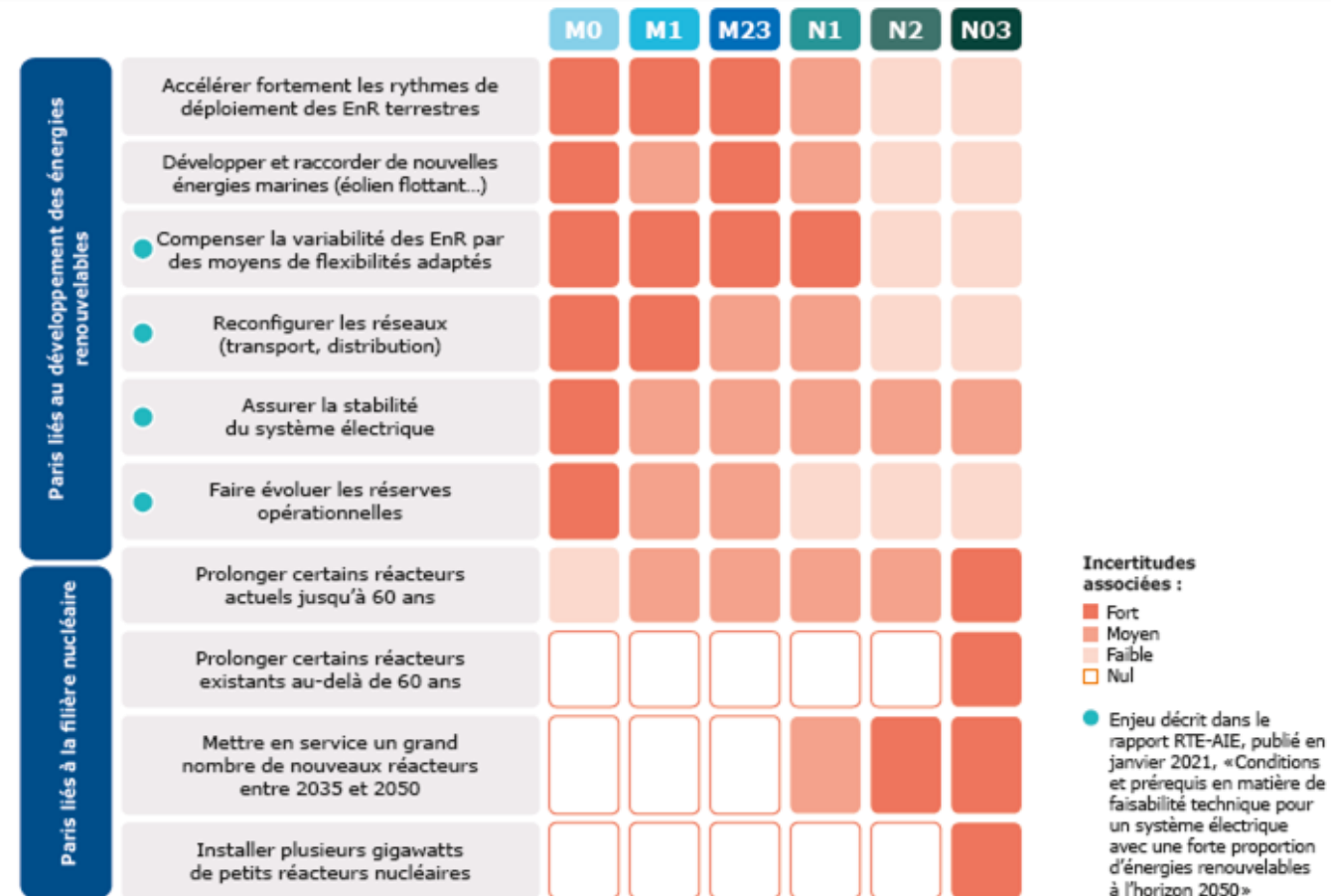
*Futurs énergétiques 2050 - principaux enseignements*



## 11

Les scénarios à très hautes parts d'énergies renouvelables, ou celui nécessitant la prolongation des réacteurs nucléaires existants au-delà de 60 ans, impliquent des paris technologiques lourds pour être au rendez-vous de la neutralité carbone en 2050

Prérequis technologiques et industriels associés aux différents scénarios et incertitudes

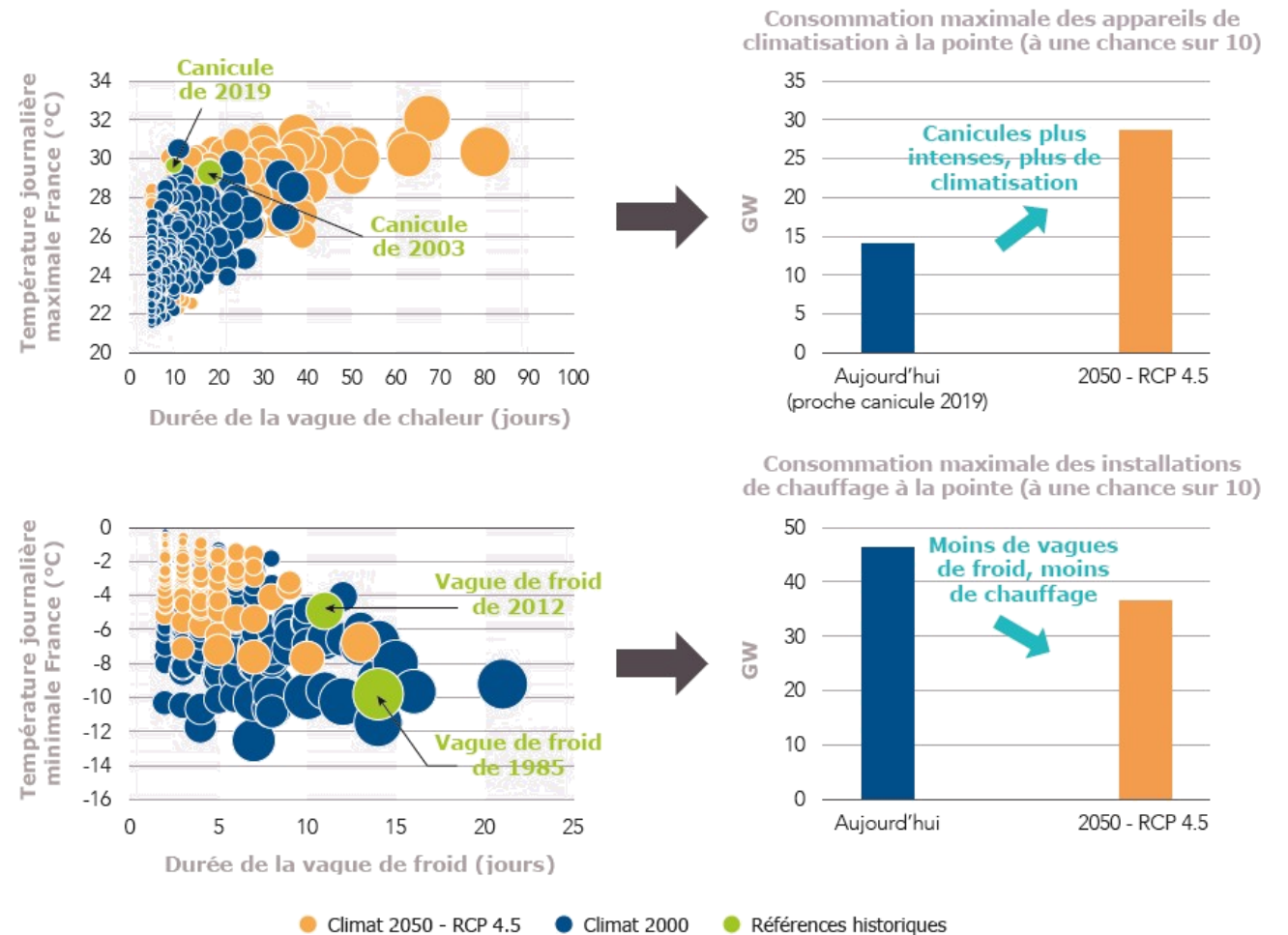




## 12

La transformation du système électrique doit intégrer dès à présent les conséquences probables du changement climatique, notamment sur les ressources en eau, les vagues de chaleur ou les régimes de vent

Evolution de la fréquence des canicules et vagues de froid et incidence sur les appels de puissance pour la climatisation et le chauffage



# Espace et environnement

.....

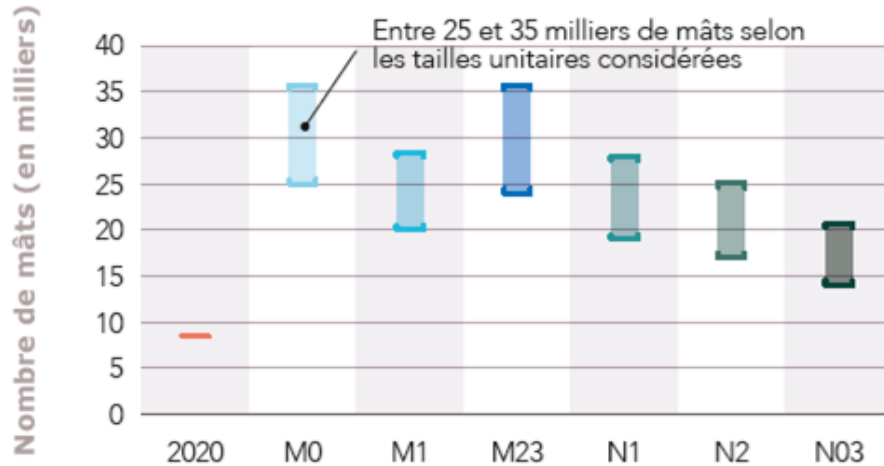
*Futurs énergétiques 2050 - principaux enseignements*



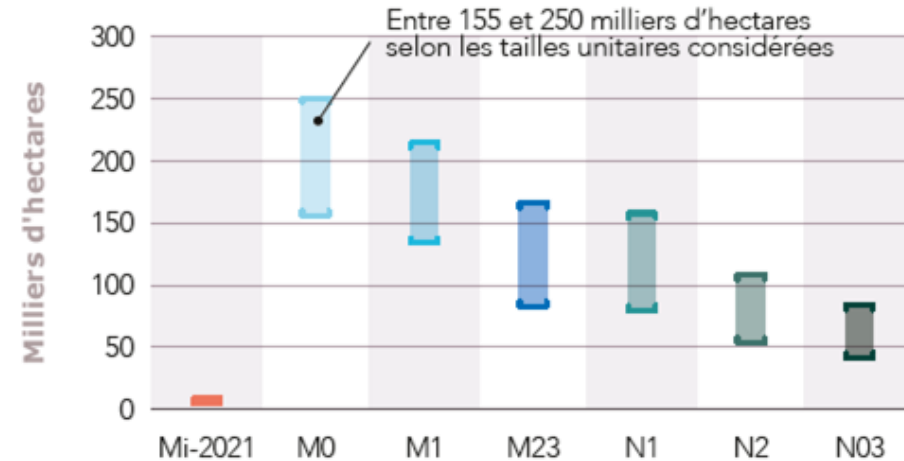
13

Le développement des énergies renouvelables soulève un enjeu d'occupation de l'espace et de limitation des usages. Il peut s'intensifier sans exercer de pression excessive sur l'artificialisation des sols, mais doit se poursuivre dans chaque territoire en s'attachant à la préservation du cadre de vie

Projection du nombre de mâts d'éoliennes terrestres à l'horizon 2050



Projection du nombre d'hectares occupés par des panneaux photovoltaïques au sol à l'horizon 2050





# Général

.....

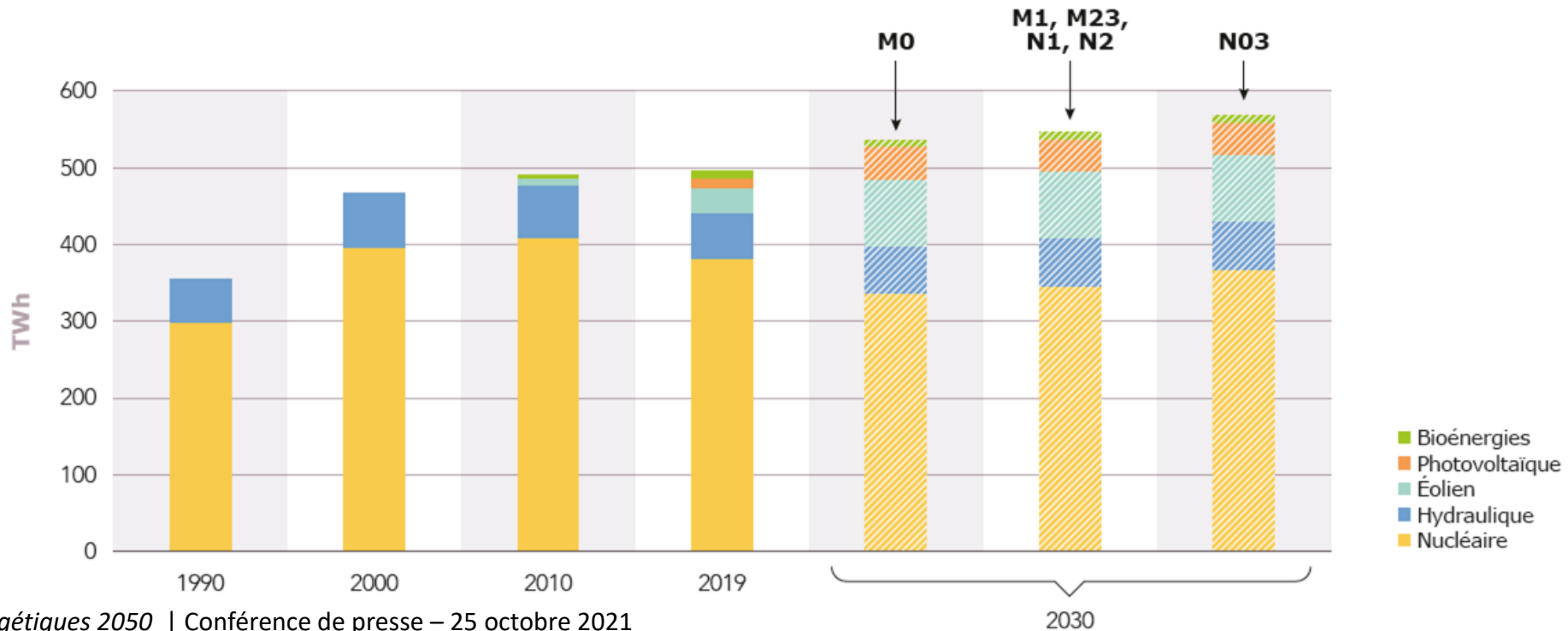
*Futurs énergétiques 2050 - principaux enseignements*



17

**Pour 2030 : développer les énergies renouvelables le plus rapidement possible et prolonger les réacteurs nucléaires existants dans une logique de maximisation de la production bas-carbone augmente les chances d'atteindre la cible du nouveau paquet européen « -55 % net »**

Production d'électricité bas-carbone en France (historique et projections 2030)



# Questions

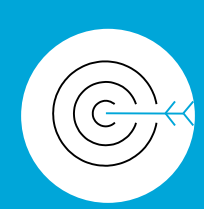
.....

*Futurs énergétiques 2050 - principaux enseignements*

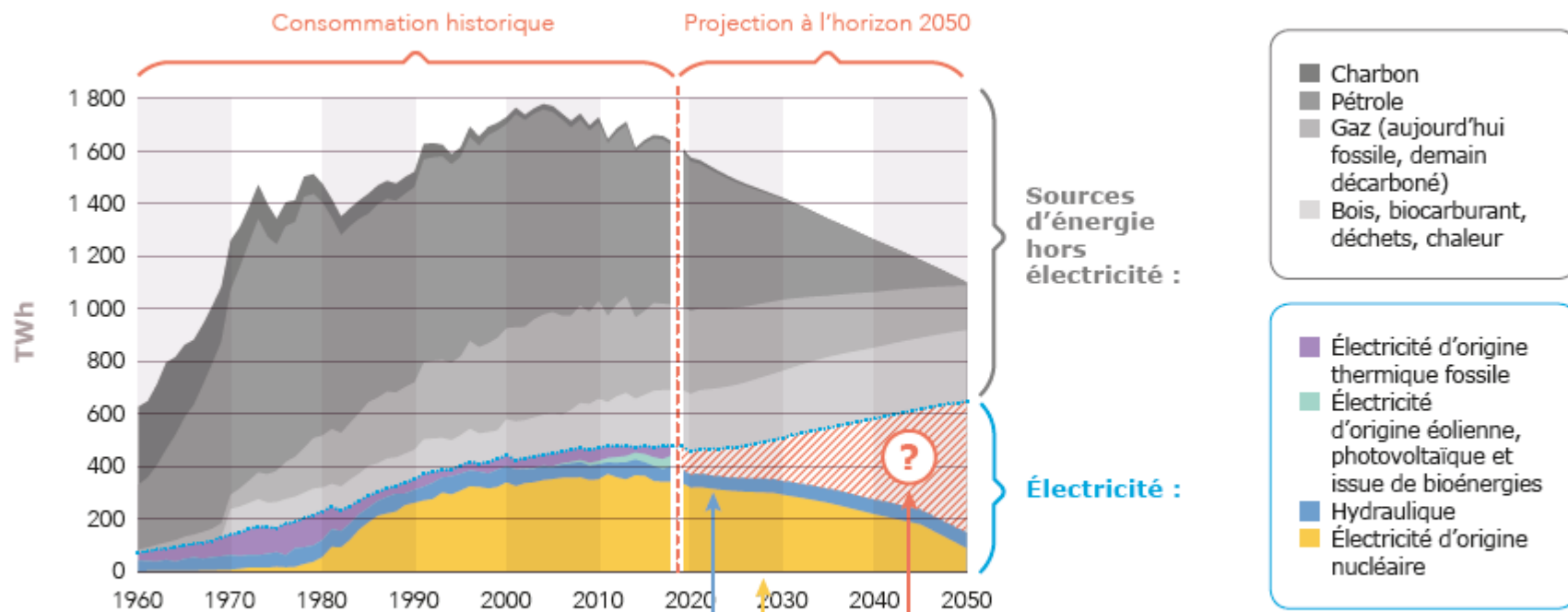


Le réseau  
de transport  
d'électricité

# Annexes



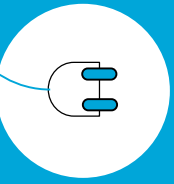
Évolution de la consommation totale d'électricité et de la consommation d'énergie finale pour les autres énergies en France



Un socle de production hydraulique stable

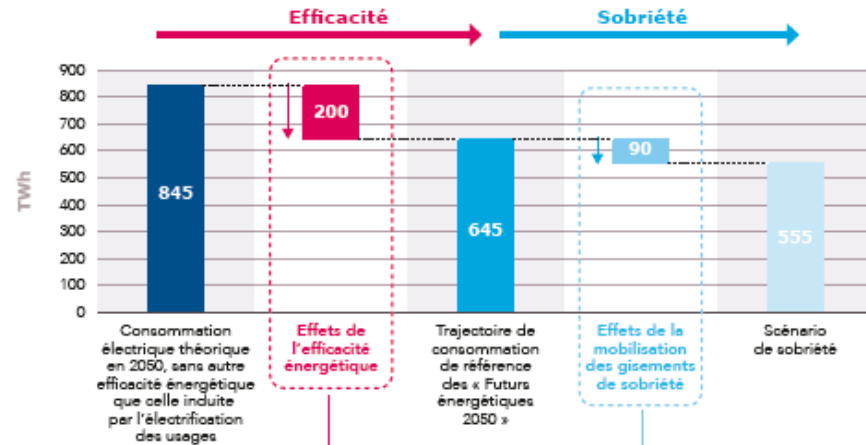
Environ 16 GW de nucléaire existant en 2050, selon la durée d'exploitation du parc dans la trajectoire de référence

Une production électrique restante composée à parts variables d'EnR, de nucléaire et de thermique décarboné



## Enseignement n° 1 : Efficacité énergétique et sobriété

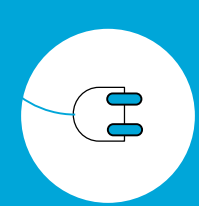
**Enseignement n° 1** Effets attendus de l'efficacité énergétique et effets potentiels de la sobriété sur le niveau de consommation (par rapport à la trajectoire de référence)



- 1 **Réduction des consommations unitaires des équipements :** électroménager, éclairage, informatique.
- 2 **Mise en œuvre de politiques publiques volontaristes :** rénovation thermique des bâtiments (doublement du rythme de rénovations), normes sur les nouveaux bâtiments (RE 2020), décret tertiaire, utilisation privilégiée des pompes à chaleur.

3 **Renforcement mécanique de l'efficacité énergétique lors de l'électrification :** véhicules électriques et pompes à chaleur offrent des performances énergétiques très supérieures à celles des véhicules thermiques ou des chaudières à combustibles fossiles.

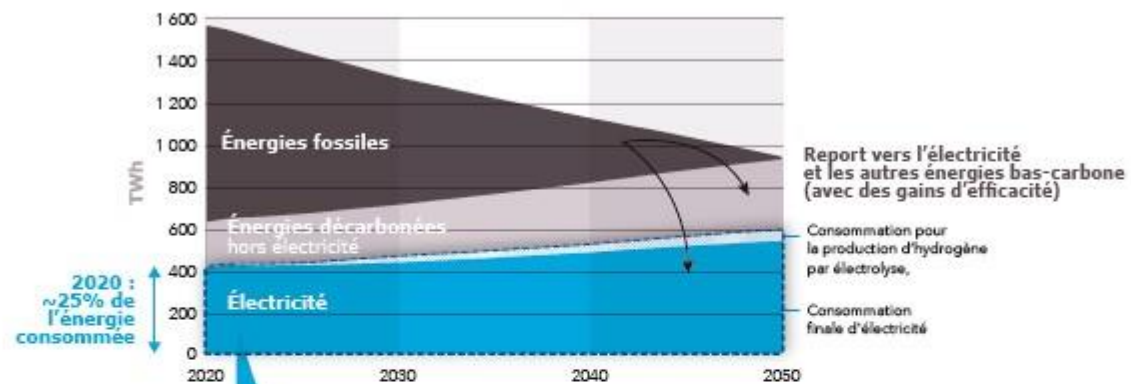
- Habitat : -23 TWh**  
augmentation de l'habitat partagé, limitation volontaire de la consommation de chauffage (-1° C) et d'eau chaude.
- Travail et commerces : -18 TWh**  
recours au télétravail associé à une limitation des surfaces de bureaux, moindre équipement en matériel informatique.
- Déplacements : -22 TWh**  
diminution des transports individuels au profit du covoiturage, réduction de la vitesse moyenne de circulation et de la taille des véhicules.
- Activités industrielles : -20 TWh**  
réduction des besoins de l'industrie agro-alimentaire si adoption d'une alimentation moins transformée, réduction de la production de biens grâce à l'allongement de la durée de vie des équipements.



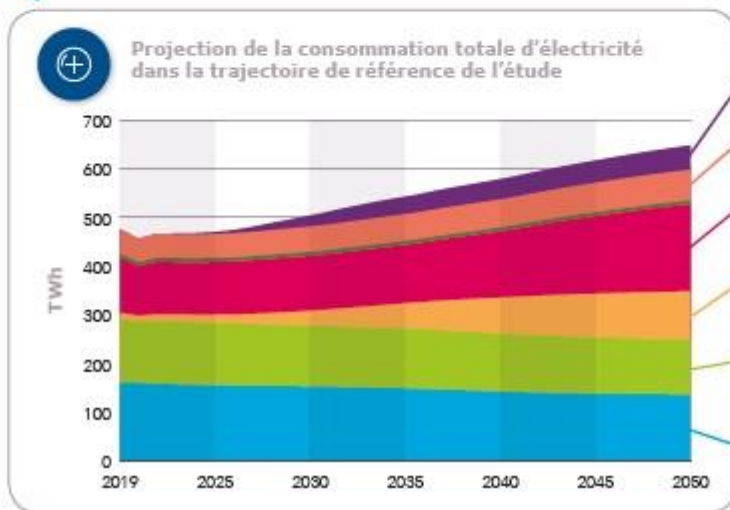
# Enseignement n°2 : Evolution de la consommation

**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



Traduction en consommation totale d'électricité = consommation finale + pertes réseau + consommation du secteur énergie + consommation pour la production d'hydrogène



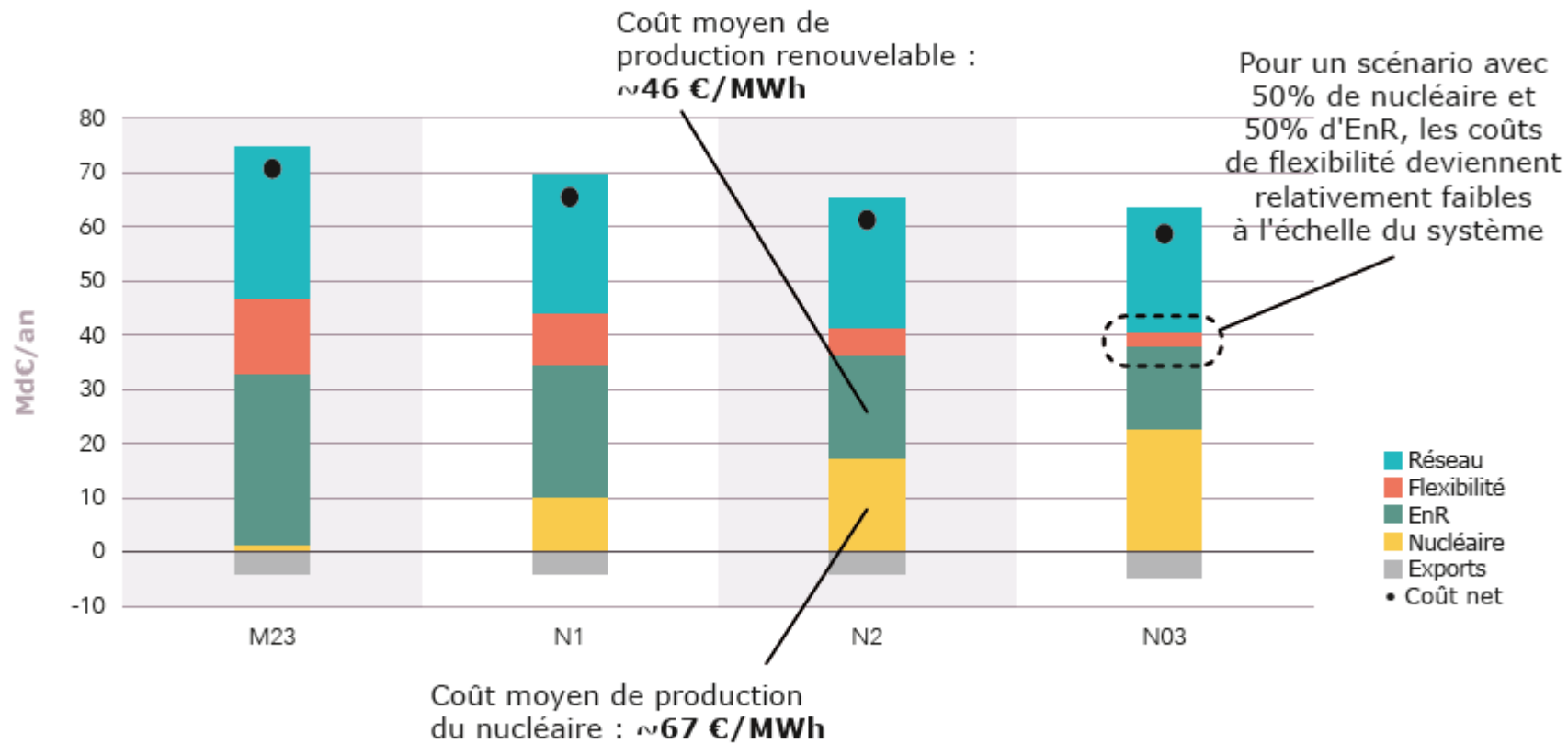
- Hydrogène bas-carbone (0 → 50 TWh) :** produit par électrolyse (besoins industriels et transport lourd)
- Énergie et pertes (50 → 60 TWh) :** corrélé à la demande d'électricité
- Industrie (115 → 180 TWh) :** électrification et croissance de la valeur ajoutée
- Transports (15 → 100 TWh) :** fin des ventes des véhicules thermiques en 2040 : en 2050, 94% des véhicules légers et 21% de camions sont électriques
- Tertiaire (130 → 110 TWh) :** croissance de la consommation des data centers (~x3), compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique dans d'autres usages
- Résidentiel (160 → 135 TWh) :** développement du chauffage électrique par pompes à chaleur, compensé par la rénovation des bâtiments et des équipements électriques plus efficaces



# Enseignement n°7 : Energies renouvelables compétitives

## Enseignement n°7

Coûts complets annualisés à l'horizon 2060



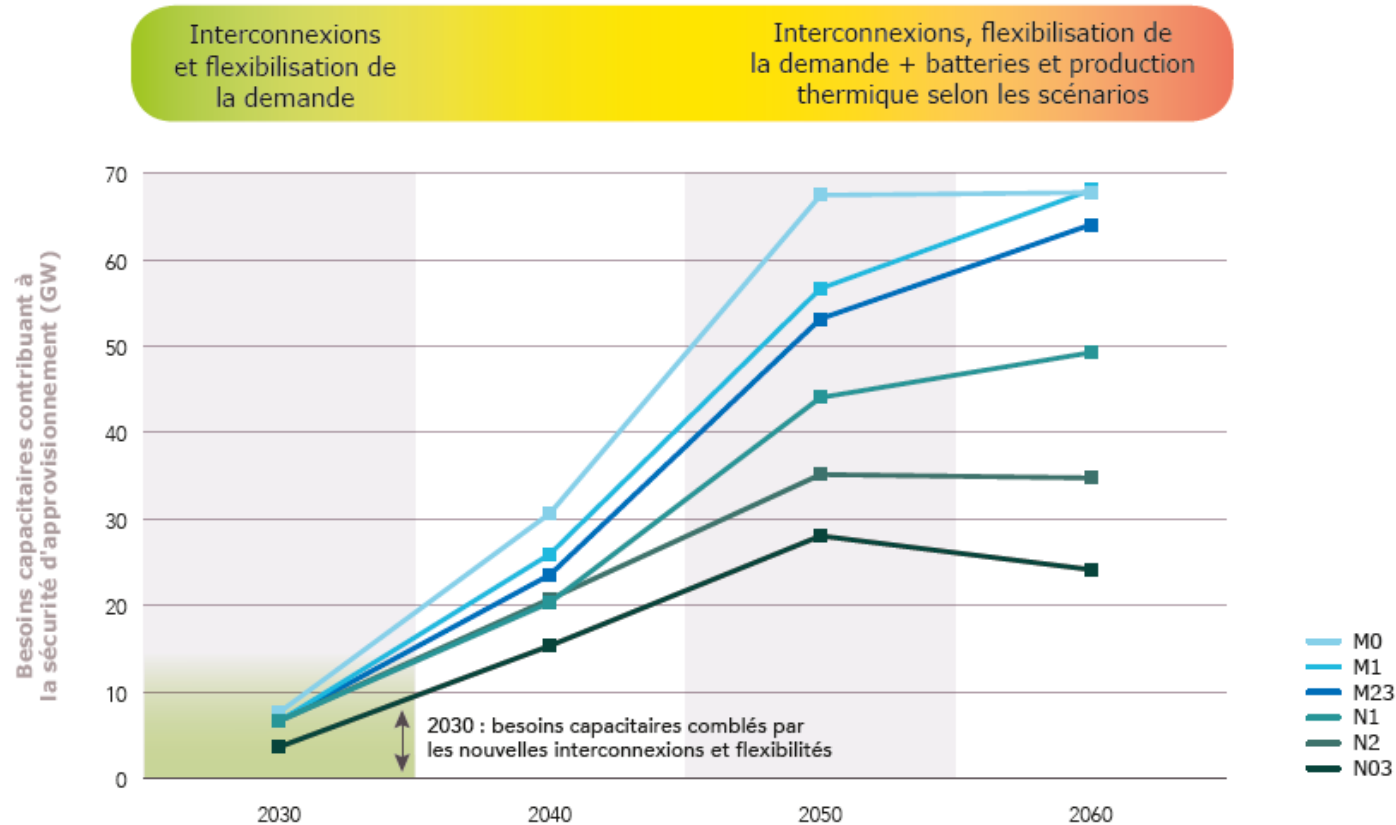
\* Hypothèse centrale du coût des technologies et coût du capital à 4%

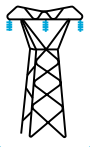




## Enseignement n°8

Évolution des besoins de nouvelles capacités flexibles contribuant à la sécurité d'approvisionnement (en plus de la flexibilité intrinsèque des installations de production nucléaires et renouvelables)

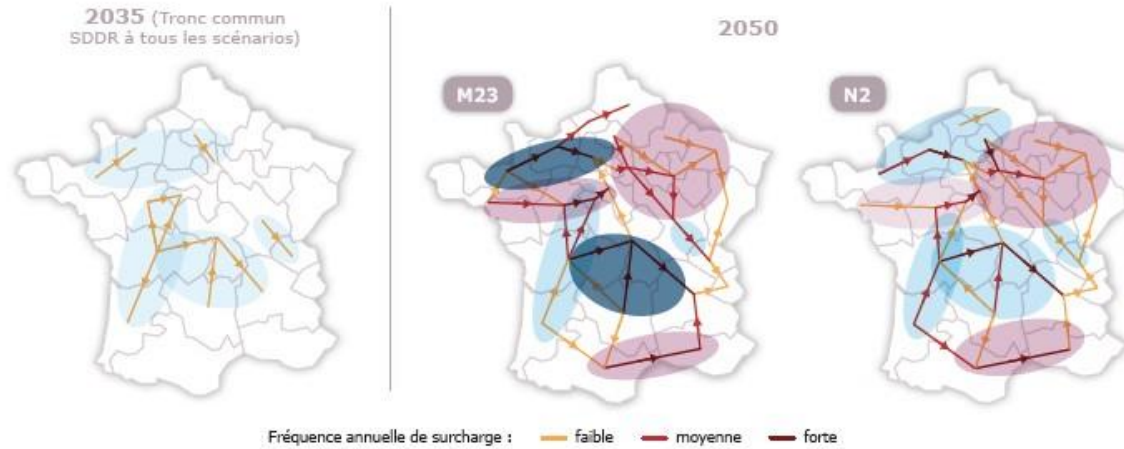




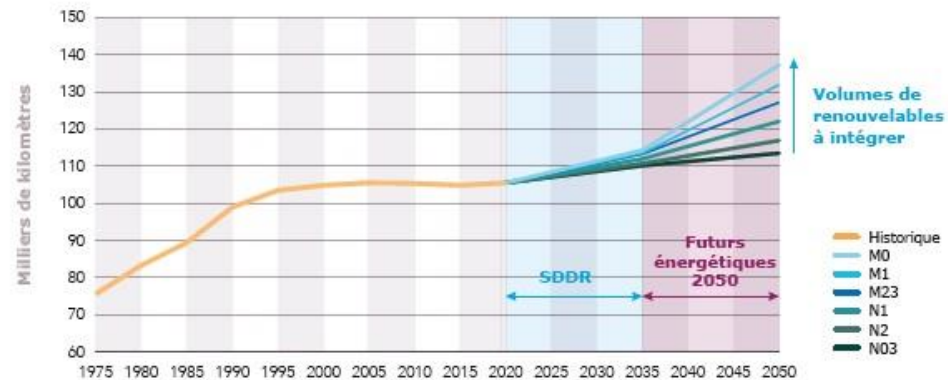
Enseignement n°9

Perspectives d'adaptations du réseau public de transport selon les scénarios

### Évolution des zones de fragilité du SDDR dans les scénarios M23 et N2



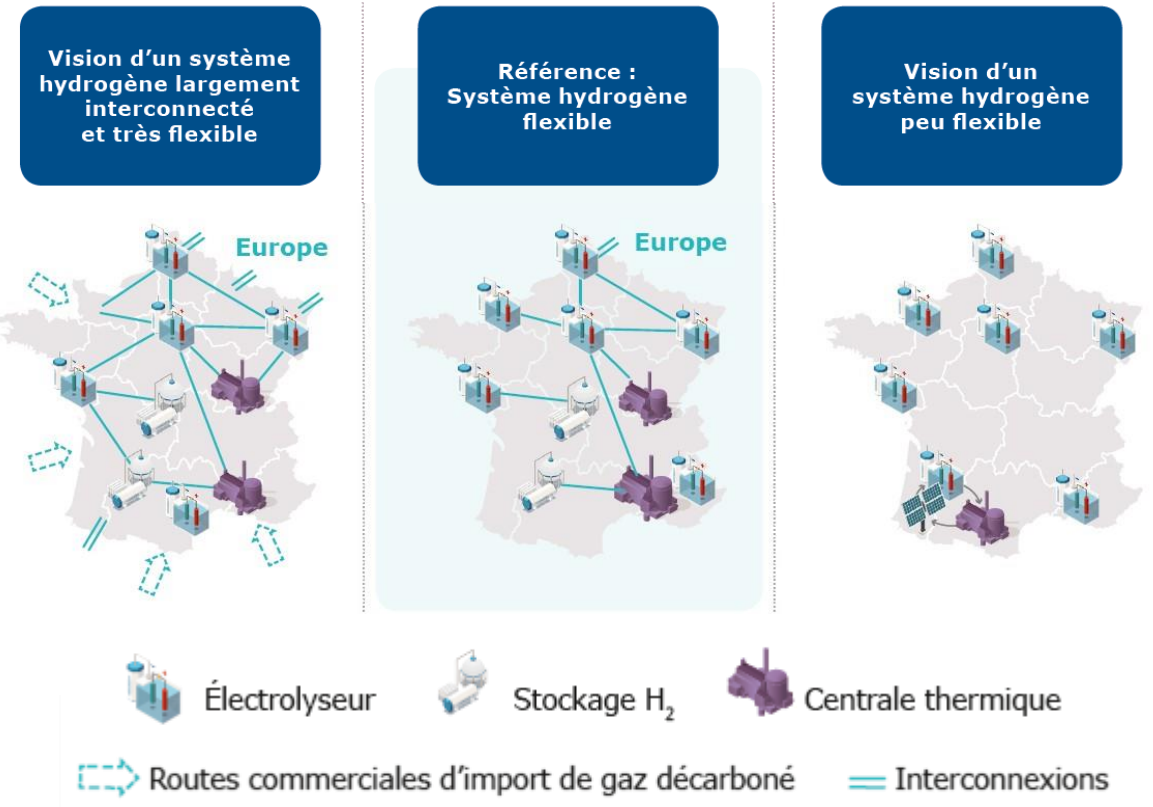
### Évolution de la longueur des réseaux régionaux et grand transport





10

Créer un « système hydrogène bas-carbone » performant est un atout pour décarboner certains secteurs difficiles à électrifier, et une nécessité dans les scénarios à très fort développement en renouvelables pour stocker l'énergie

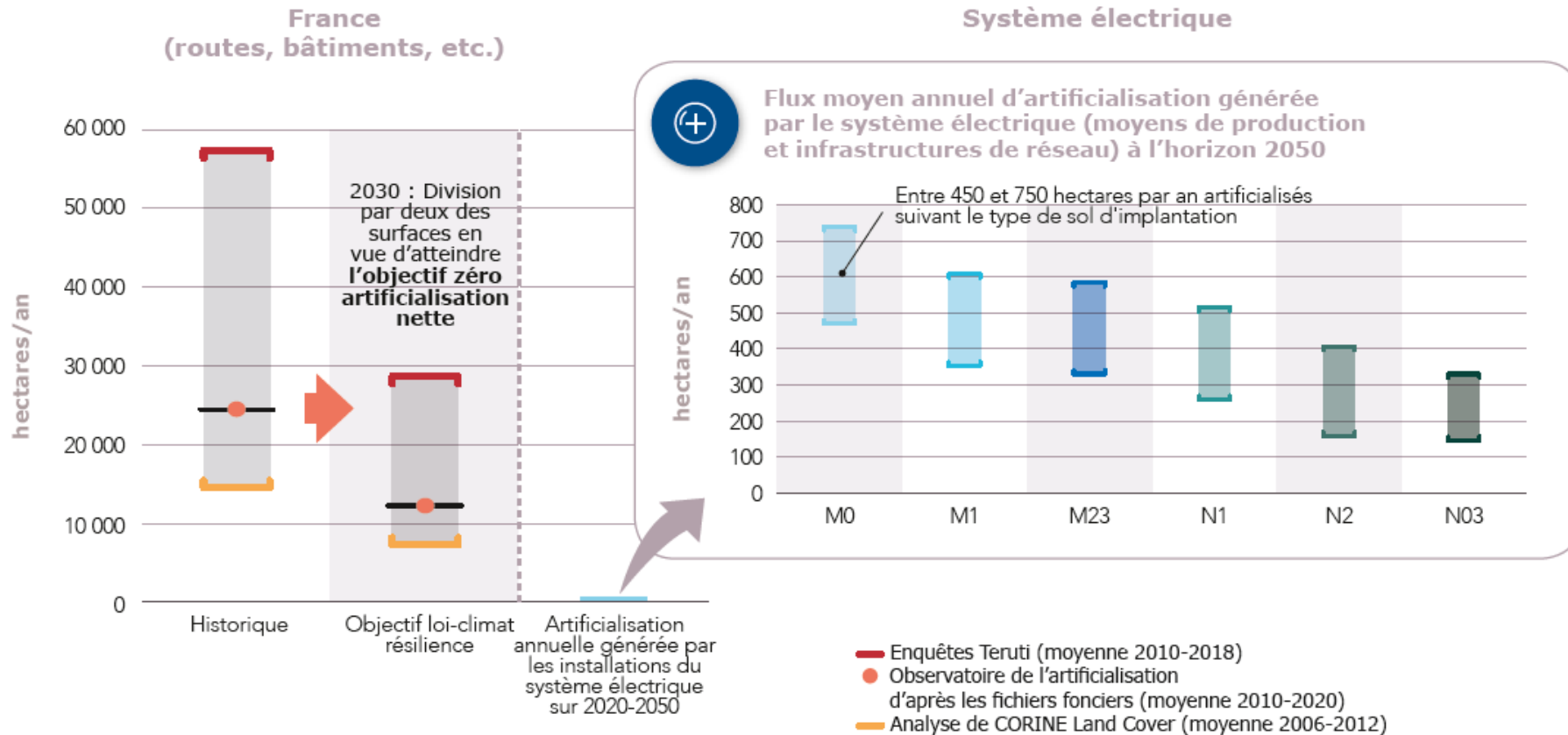




# Enseignement n°13 : Flux d'artificialisation

## Enseignement n° 13

Flux d'artificialisation projeté à 2050 dans les scénarios et à l'échelle de la France (historique et objectif 2030)



Source : CEREMA, 2021, «Les déterminants de la consommation d'espaces».

Nota bene : le volume d'artificialisation varie selon la méthode d'évaluation (fichiers fonciers, enquêtes par sondage).

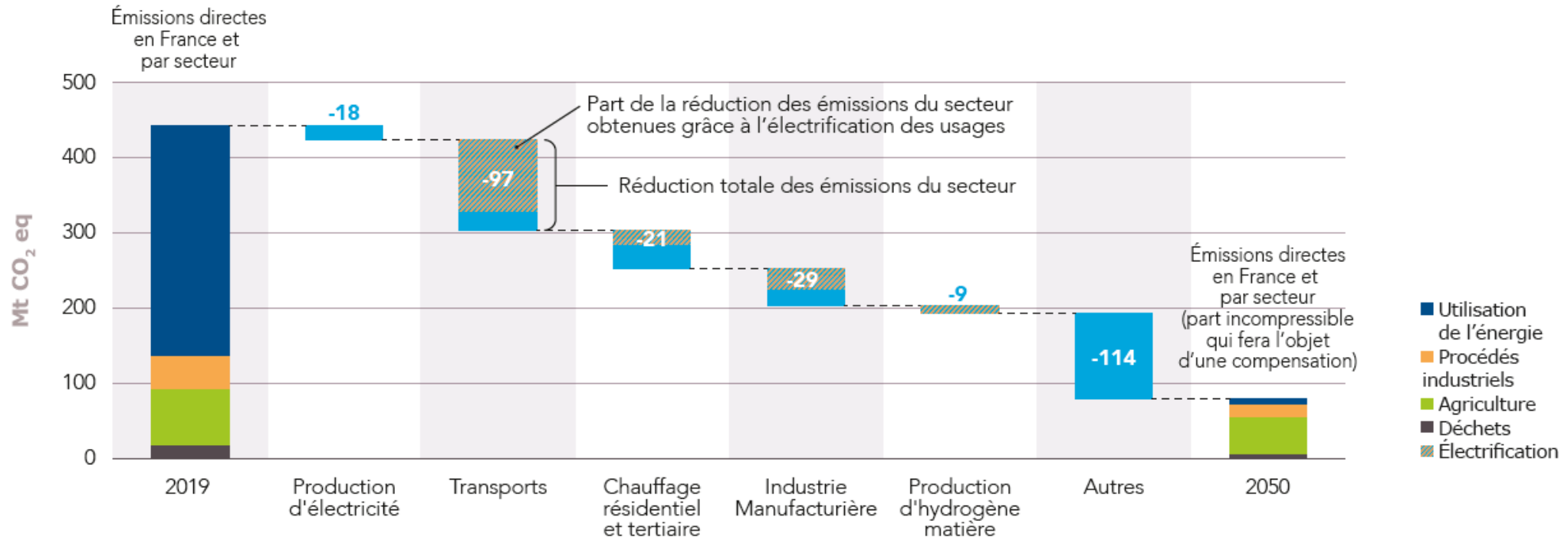
Conformément à la convention prévue par la loi climat et résilience, la surface sous les panneaux photovoltaïques n'est ici pas comptabilisée dans les surfaces artificialisées.



14

**Même en intégrant le bilan carbone complet des infrastructures sur l'ensemble de leur cycle de vie, l'électricité en France restera très largement décarbonée et contribuera fortement à l'atteinte de la neutralité carbone en se substituant aux énergies fossiles**

Trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre et effets de l'électrification

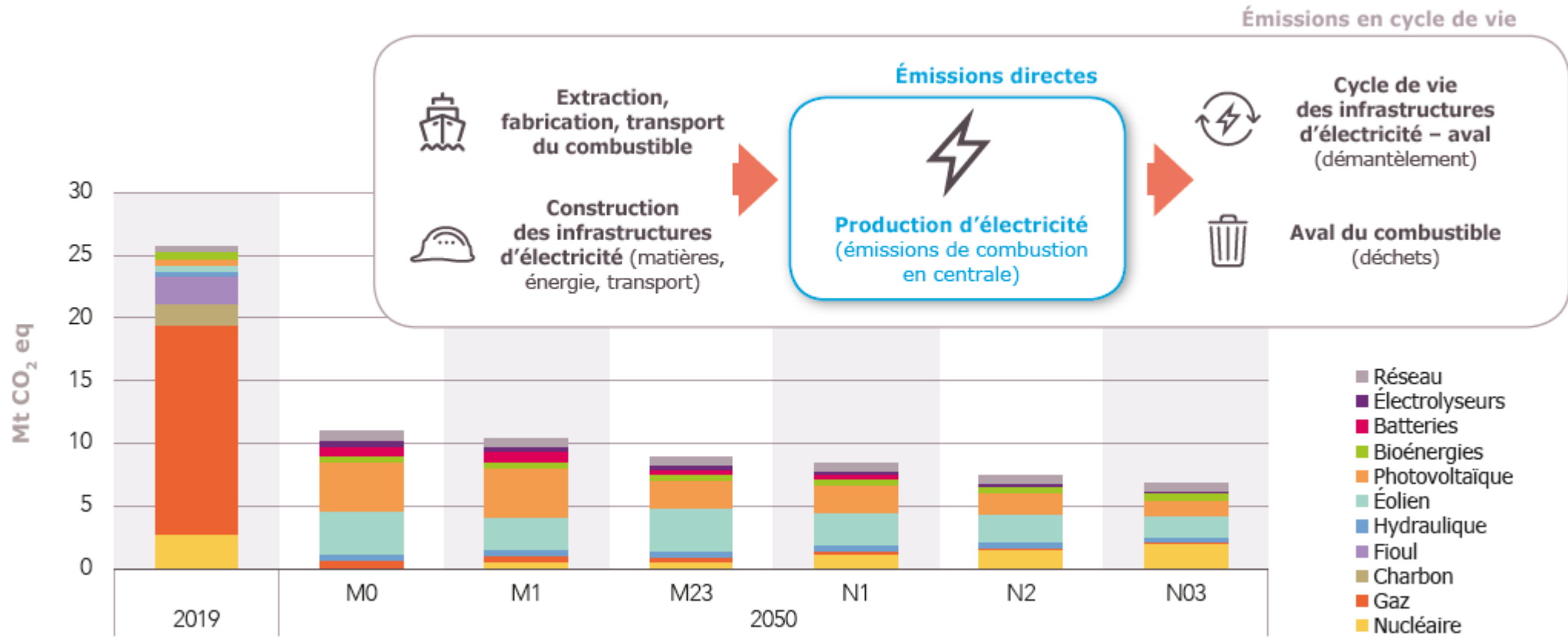




# Enseignement n°14 : Bilan carbone

## Enseignement n° 14

Émissions de gaz à effet de serre en cycle de vie du système électrique





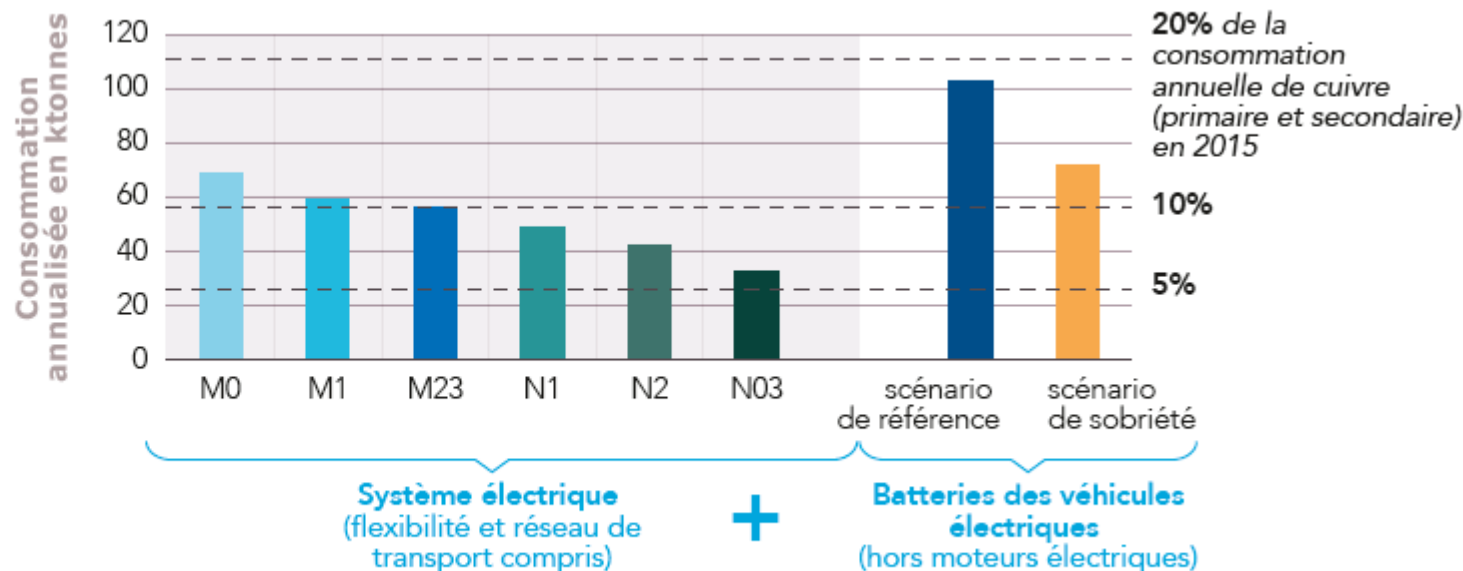
## 15

### L'économie de la transition énergétique peut générer des tensions sur l'approvisionnement en ressources minérales, particulièrement pour certains métaux, qu'il sera nécessaire d'anticiper

Consommation annuelle de cuivre projetée à 2050 dans les scénarios et pour les batteries de véhicules

Aluminium
<b>Cuivre</b>
Acier
Béton
Terres rares
Argent
Silicium
Uranium
Zirconium
Graphite
Lithium
Cobalt
Manganese
Nickel
Chrome
Zinc

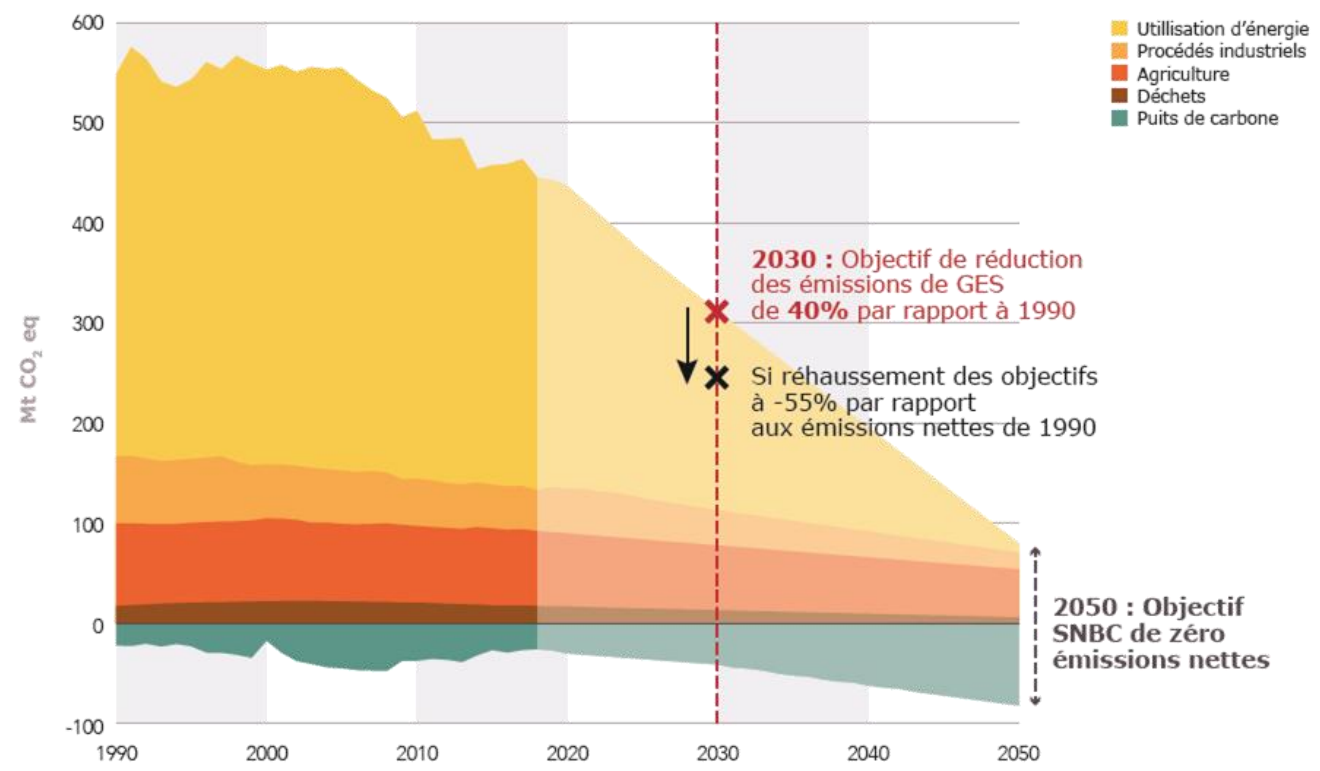
Exemple pour le cuivre dont l'approvisionnement est aujourd'hui jugé critique du fait d'une demande en forte croissance et de réserves qui pourraient devenir insuffisantes



## 18

### Quel que soit le scénario choisi, il y a urgence à se mobiliser

Evolution des émissions et des puits de gaz à effet de serre (historique et objectifs)



(Source : SNBC)





**Laurence BOONE**

*Économiste en chef de l'OCDE*

**Pierre CAYE**

*Philosophe, directeur de recherche au CNRS,  
directeur du Centre Jean Pépin (ENS-CNRS-PSL)*

**Jean-Michel GLACHANT**

*Économiste, directeur de la Florence School of Regulation  
à l'Institut universitaire européen de Florence,  
Président élu de l'IAEE, l'Association Internationale  
des Économistes de l'Énergie*

**Christian GOLLIER**

*Économiste, directeur général de Toulouse School of Economics,  
Président de l'EAERE, l'Association Européenne  
des Économistes de l'Environnement*

**Jan-Horst KEPPLER**

*Économiste, professeur à l'Université Paris-Dauphine,  
directeur scientifique de la Chaire European Electricity Markets*

**Dominique ROUILLARD**

*Architecte, professeure à l'École Nationale Supérieure d'Architecture  
Paris-Malaquais, directrice du Laboratoire Infrastructure, Architecture,  
Territoire (LIAT)*

**Robert VAUTARD**

*Climatologue, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace,  
coordinating lead author pour le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC*