

## *Enjeux énergétiques*

# *Scénarios*

*Les leviers d'une stratégie énergétique soutenable,  
à l'échelle mondiale et nationale*

*Yves MARGNAC*

*Référent méthodologique et porte-parole,  
Association négaWatt*



1.

*Problématique*

*Du constat d'un système  
énergétique non soutenable  
à la recherche de solutions*

---

2.

*Demande d'énergie*

*Réduire la consommation,  
le potentiel de l'efficacité  
et de la sobriété*

---

3.

*Production d'énergie*

*Décarboner l'énergie,  
mobiliser les renouvelables,  
adapter les systèmes*

---

4.

*Scénarios France*

*Panorama,  
méthode et résultats,  
convergences et différences*

---

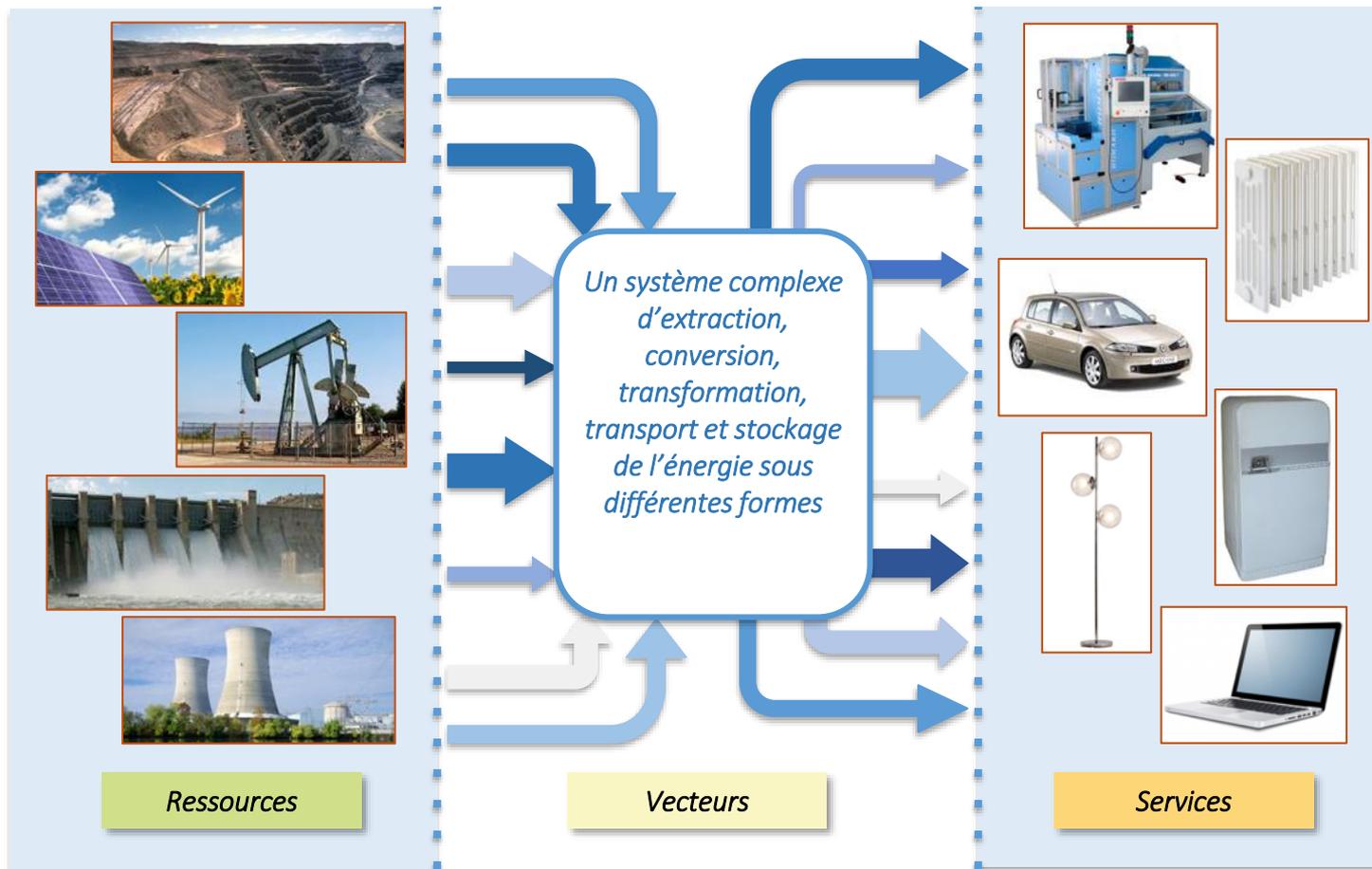


# 1.

## *La problématique*

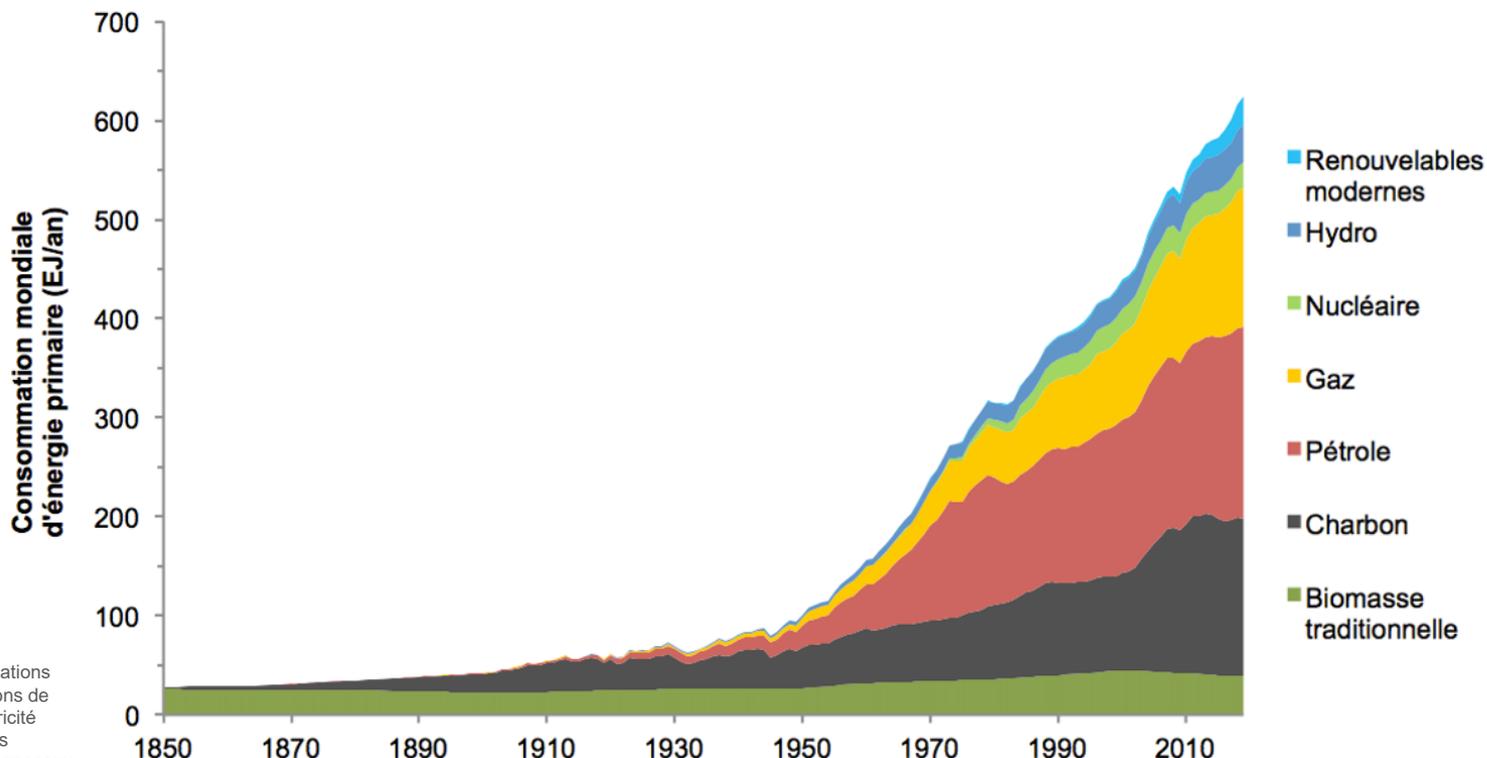
---

- *Dimension systémique*
- *Approche systématique*
- *Soutenabilité globale*



## ↳ Une demande en accumulation exponentielle

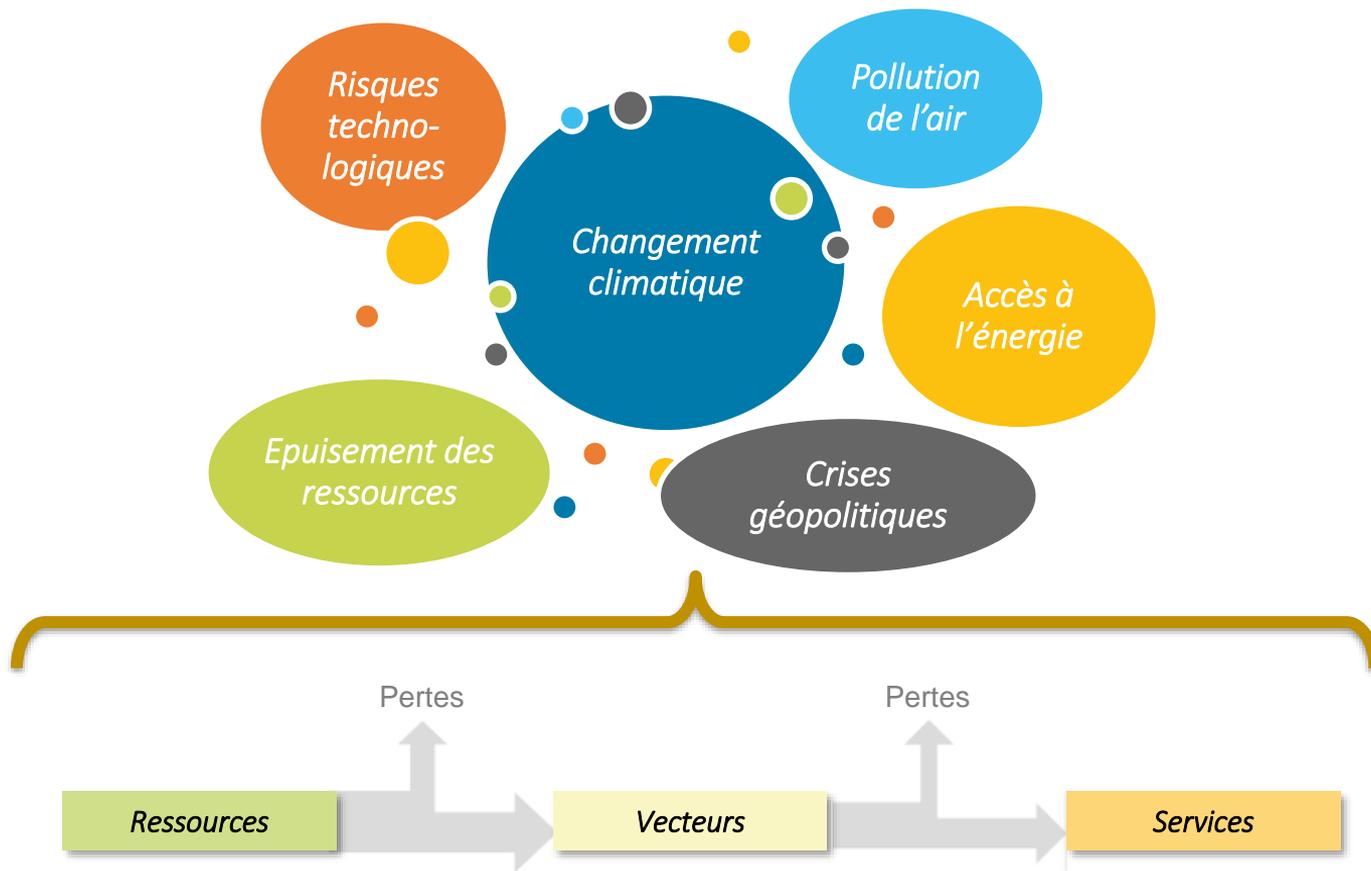
### Évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire, 1850–2019



À noter qu'on peut trouver des estimations différentes en fonction des conventions de calcul retenues pour convertir l'électricité provenant du nucléaire, des barrages hydrauliques, des éoliennes et des panneaux photovoltaïques en équivalents primaires.

Source : Victor Court (IFP School), à partir des données de Etemad & Luciani (1991) numérisées par The Shift Project (2019), Smil (2016), et British Petroleum (2020)

## Un système énergétique non soutenable



# ↳ Une approche systématique



Choix et préparation de la ressource



Transformation



Livraison au consommateur final



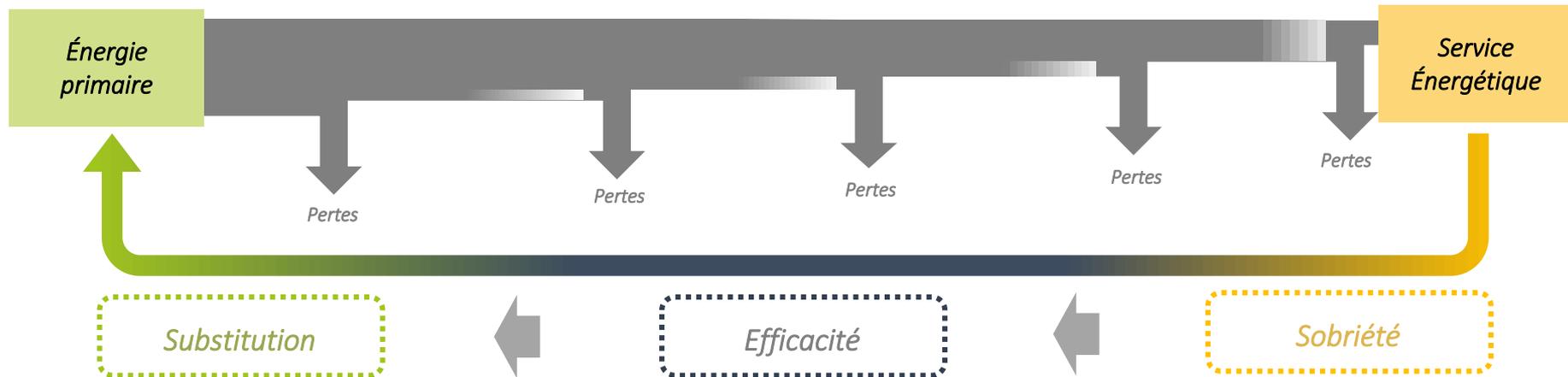
Conversion en énergie utile



Conception et dimensionnement



Conditions d'utilisation



# Un projet de société soutenable : exemple du scénario négaWatt

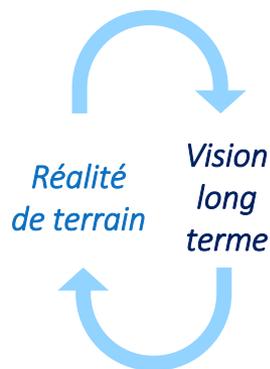
La recherche d'une voie soutenable

L'ambition d'une société apaisée, plus juste et plus désirable

Des valeurs ...

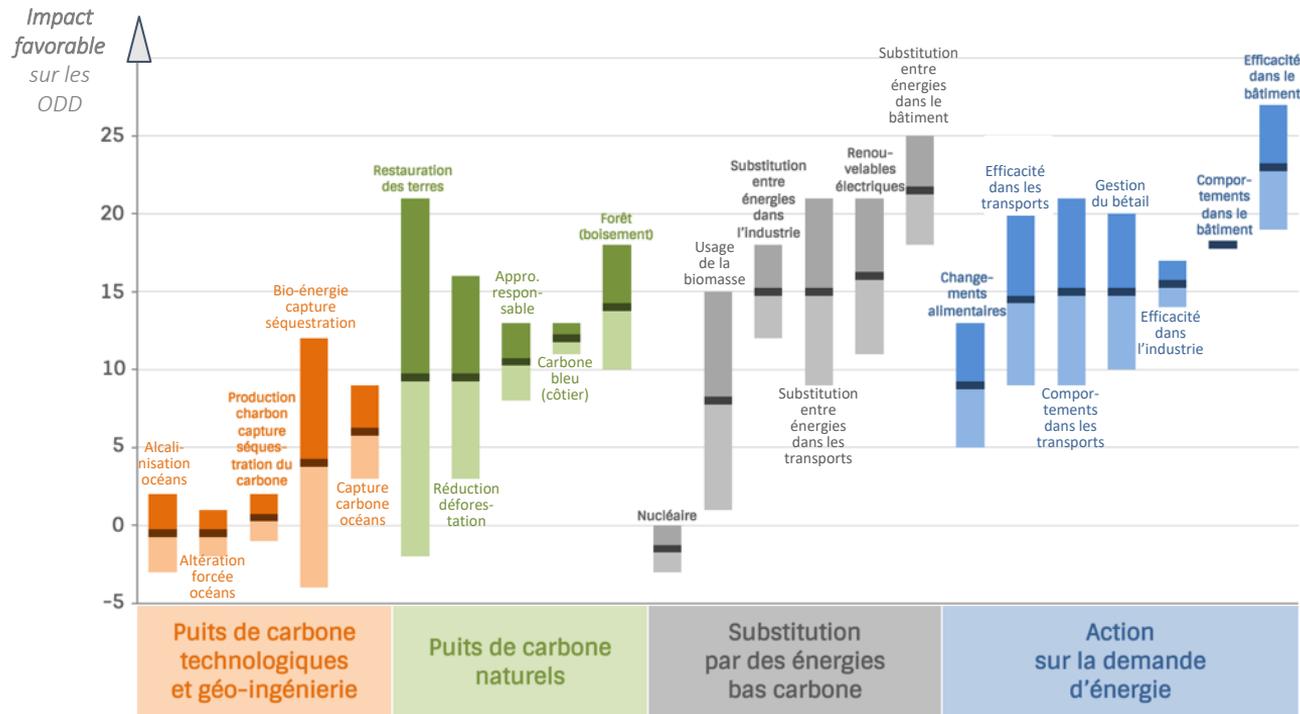
... à traduire en action ...

... à travers une matrice intégrée



# Une hiérarchisation multicritère des options

## Des synergies contrastées entre les actions de décarbonation et les autres ODD



### Ordre de mérite "systémique"

- cohérence
- soutenabilité
- scalabilité
- granularité de mise en œuvre
- accessibilité financière
- contribution à la résilience

## Discernement sur les solutions innovantes en regard de leur maturité

Approche prudente vis-à-vis des solutions technologiques

Stimulation et régulation de l'innovation par les dimensions environnementale et sociale

Échelle(s)  
de maturité

	Technologique (TRL)	Industrielle (MRL)	Environnementale et sociale (ESRL)
7	<i>A minima système démontré, si possible plusieurs en compétition</i>	<i>A minima prototype en environnement industriel, si possible plusieurs en compétition</i>	<i>A minima caractérisation des impacts génériques par une modélisation robuste</i>
8			
9			
10	<i>Système optimisé</i>		
11		<i>Déploiement massif, intégration système</i>	<i>Acceptabilité sociale et environnementale, mesure des effets indirects</i>

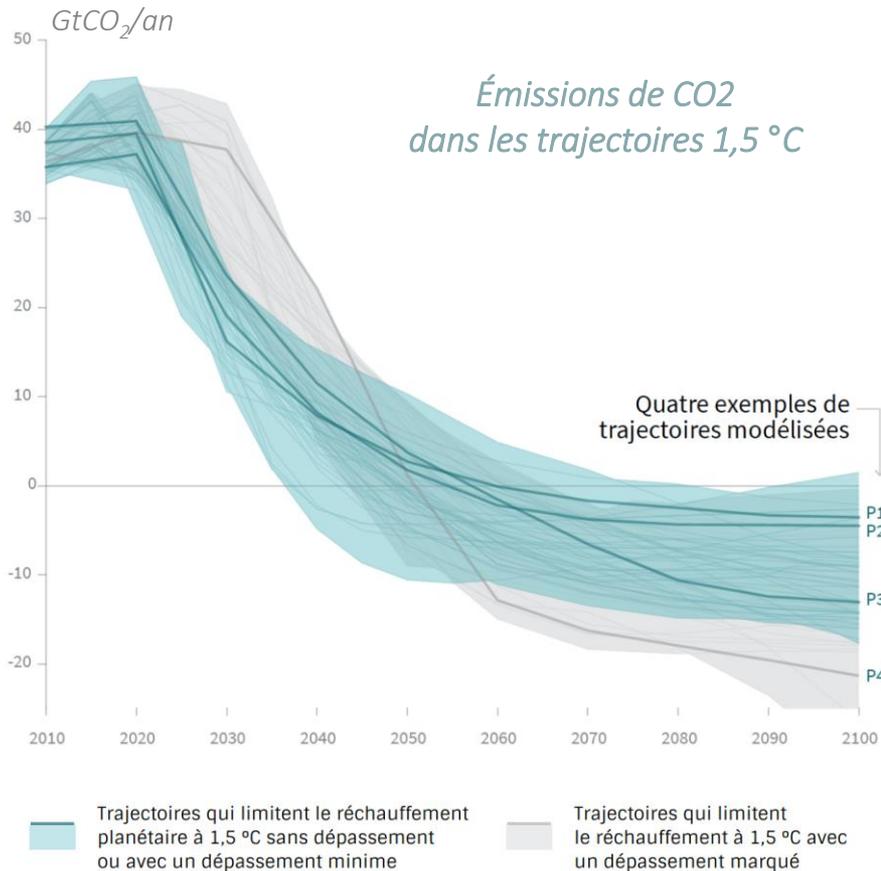


# 2.

## *Les options sur la demande*

---

- *Perspective mondiale*
- *Sobriété et efficacité*
- *Choix du scénario négaWatt*

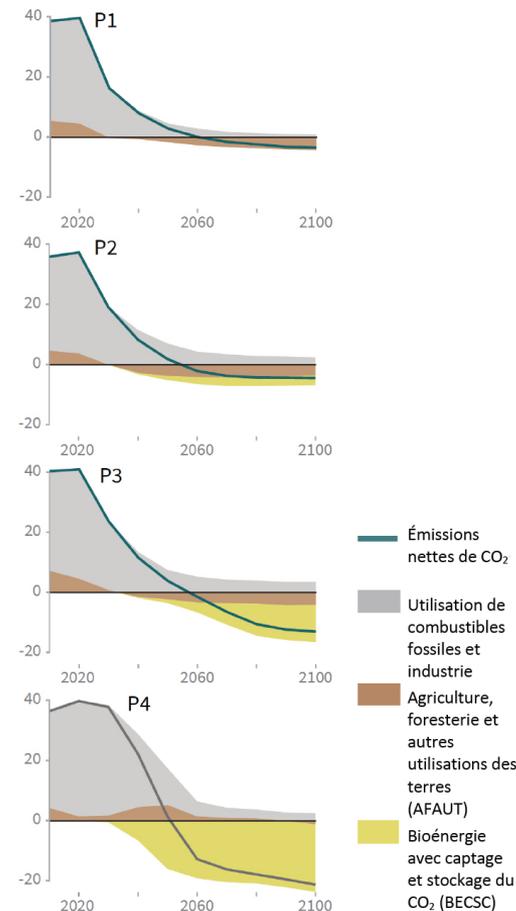


Innovation sociale, réduction de la demande, amélioration des conditions de vie, pas de recours aux puits technologiques de carbone

Intensité énergétique, développement humain, convergence économique, modes de consommation durables et robustes

Développement sociétal et technologique "habituels", priorité aux modifications de la production sur la réduction de la demande

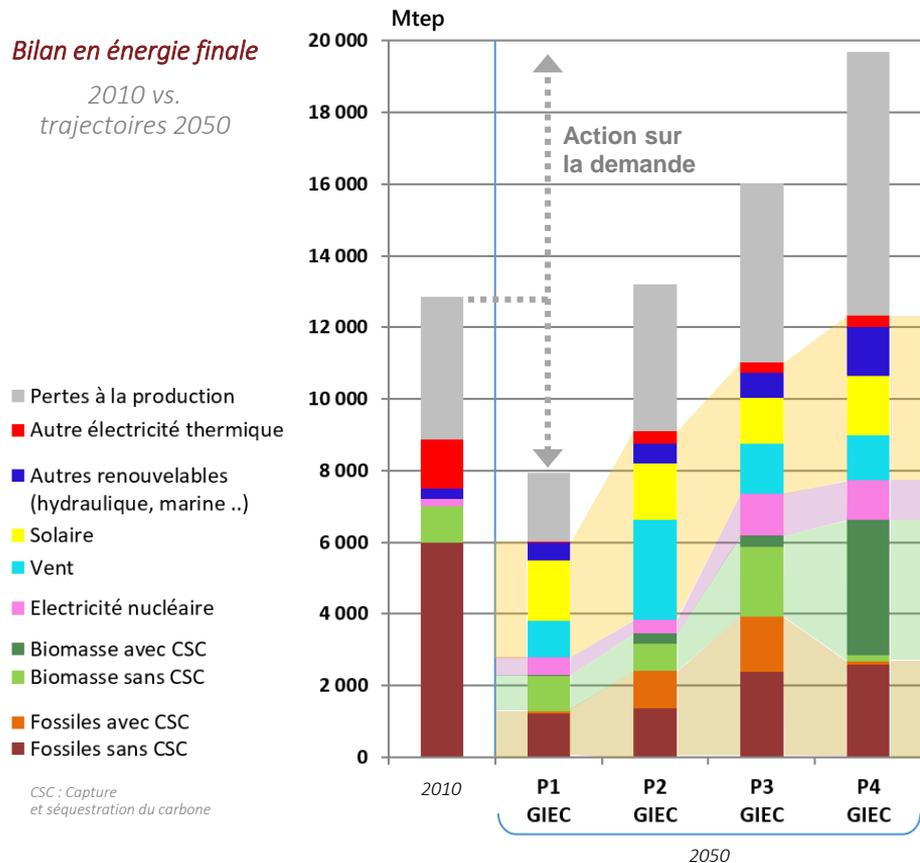
Forte intensité en énergie et ressources, poursuite et généralisation de la consommation de masse, réduction des émissions par la technologie



# ➤ Potentiel sur la demande

## Bilan en énergie finale

2010 vs.  
trajectoires 2050



Le niveau de demande est le premier facteur de différenciation des scénarios

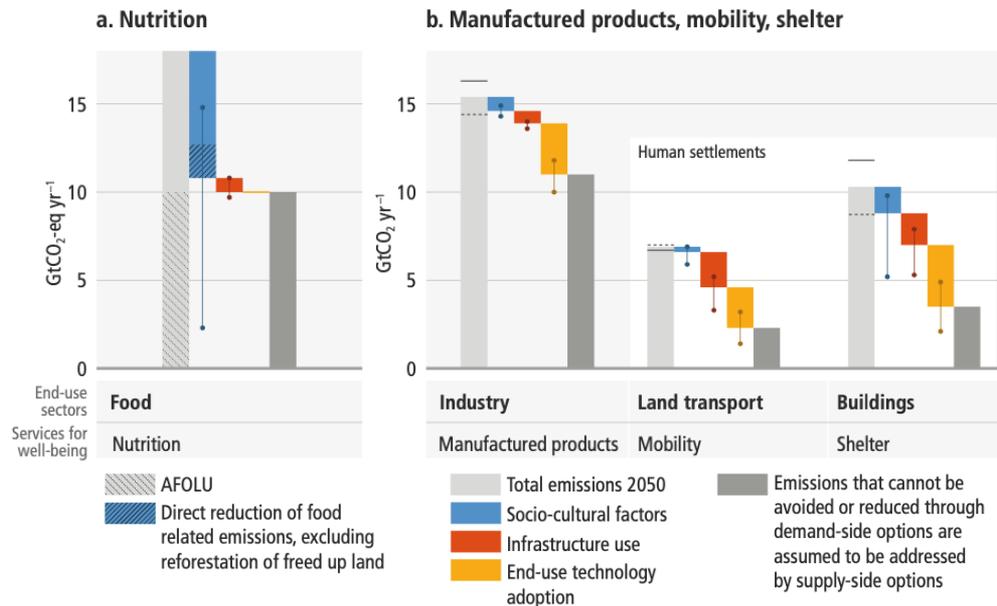


6<sup>ème</sup> rapport d'avancement  
(AR6 – WGIII, 2022)

*“Les politiques de **sobriété** sont un ensemble de mesures et de pratiques quotidiennes qui permettent d'éviter la demande d'énergie, de matériaux, de terres et d'eau tout en assurant le bien-être de tous les êtres humains dans les limites de la planète.”*

*“Sufficiency policies are a set of measures and daily practices that avoid demand for energy, materials, land and water while delivering human well-being for all within planetary boundaries.”*

“La réduction des émissions par la demande peut être obtenue par des changements des facteurs socioculturels, la conception et l'utilisation des infrastructures, et les changements d'usage des technologies d'ici 2050”.



Potentiel de réduction des émissions de 40 % à 70 % supplémentaires d'ici 2050 par rapport aux politiques annoncées par les gouvernements nationaux.

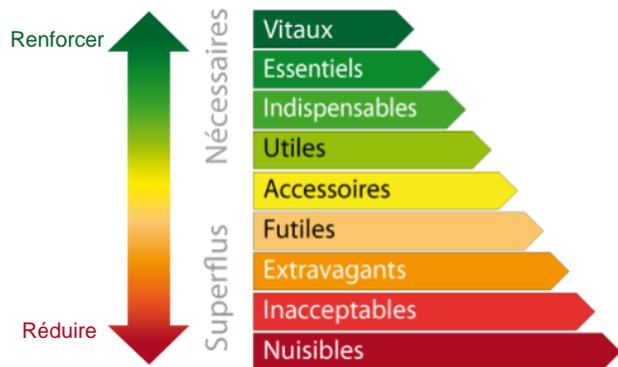


6<sup>ème</sup> rapport d'avancement  
(AR6 – WGIII, 2022)

*“Les politiques de sobriété sont un ensemble de mesures et de pratiques quotidiennes qui permettent d'éviter la demande d'énergie, de matériaux, de terres et d'eau tout en assurant le bien-être de tous les êtres humains dans les limites de la planète.”*

*“Sufficiency policies are a set of measures and daily practices that avoid demand for energy, materials, land and water while delivering human well-being for all within planetary boundaries.”*

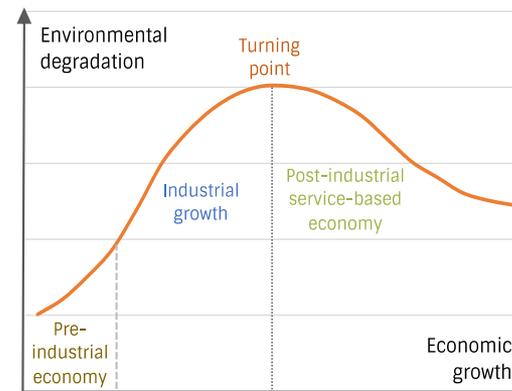
Assurer, dans les limites collectives, une meilleure distribution de l'accès aux services



Repenser les activités

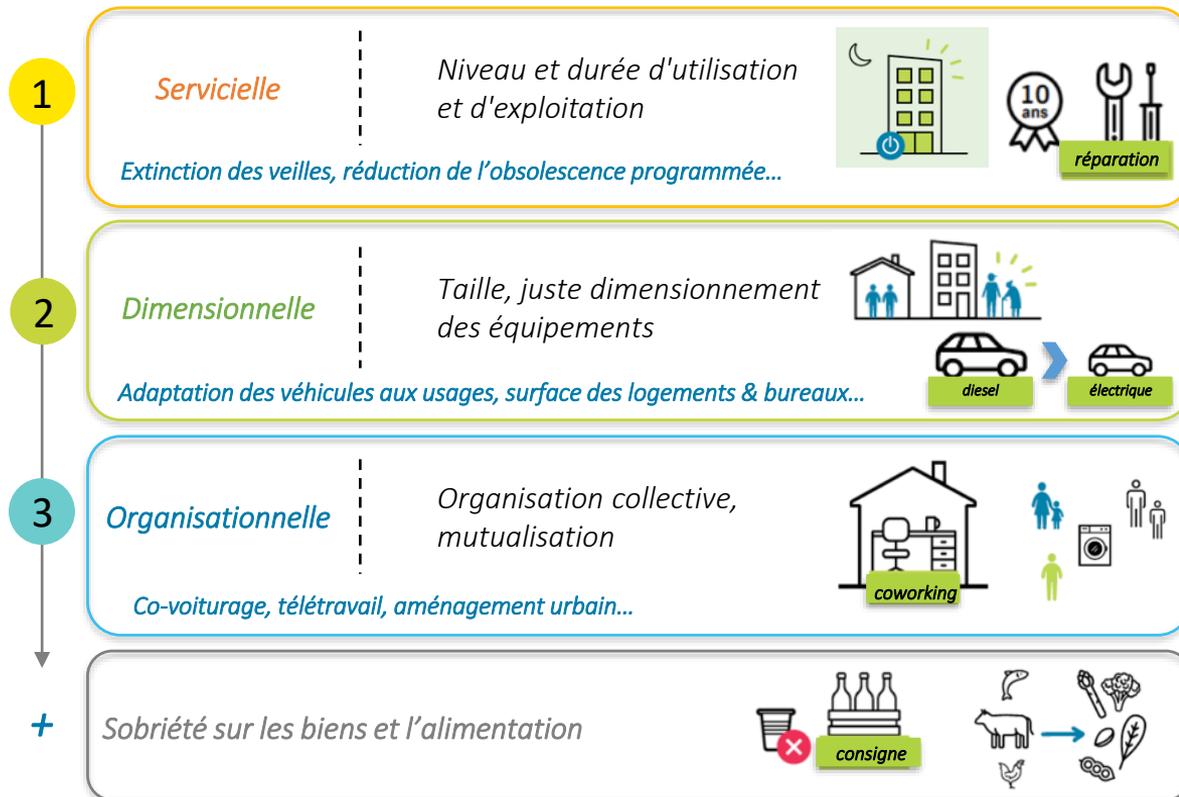


Aligner la création de valeur avec la protection des ressources plutôt que leur destruction



# ↳ L'action de sobriété

## Leviers de sobriété



## Politiques et mesures

- A** Informer et soutenir les actions
- B** Orienter l'innovation et les marchés
- C** Faire évoluer les normes sociales et les pratiques
- D** Réguler et adapter les infrastructures

Voir : European sufficiency policy database  
<https://energysufficiency.de/en/policy-database-en/>

## Bâtiment

Stabilisation des m<sup>2</sup> par habitant et du nombre de personnes par logement

Réduction de la part des maisons individuelles dans le neuf

Diminution des surfaces neuves construites

Dimensionnement et usage raisonnables des équipements



## Mobilité

Diminution des distances parcourues

Report modal et réduction de l'aérien

Augmentation du taux d'occupation

Réduction des limites de vitesse

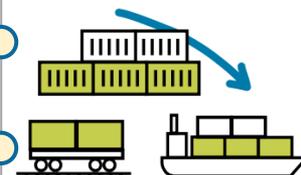


## Fret

Réduction des tonnages transportés

Report modal

Meilleur remplissage

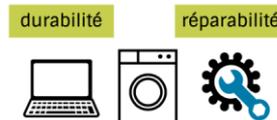


## Industrie

Diminution de la production d'acier, de ciment, de plastique et de la consommation d'énergie

Des produits plus durables, plus réparables et réparés

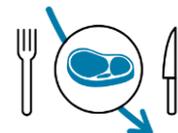
Une forte augmentation des taux de recyclage (métaux, verre, plastiques)



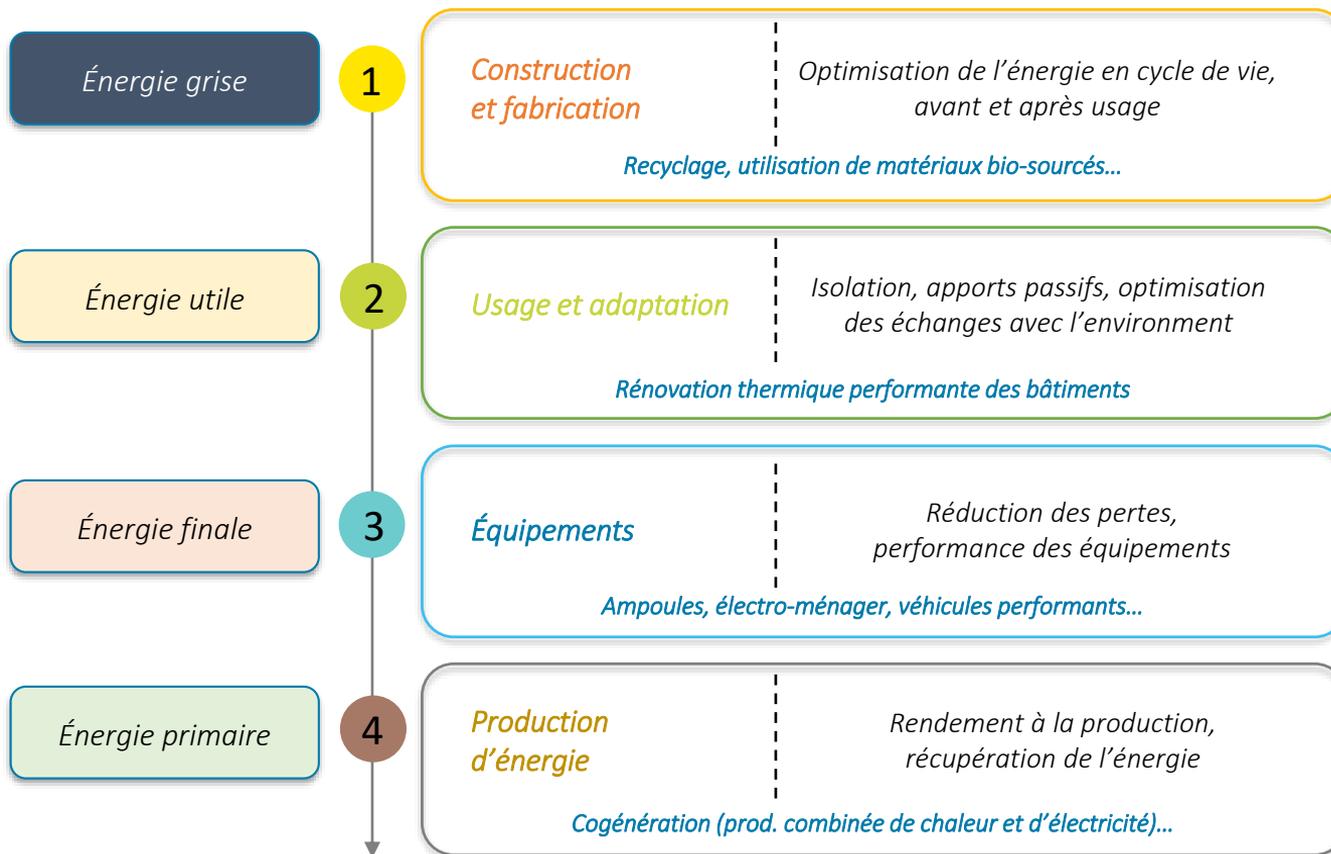
## Agriculture

Réduction des gaspillages alimentaires

Réduction de la quantité de protéines animales



# Leviers d'efficacité





# 3.

## *Les options sur l'offre*

---

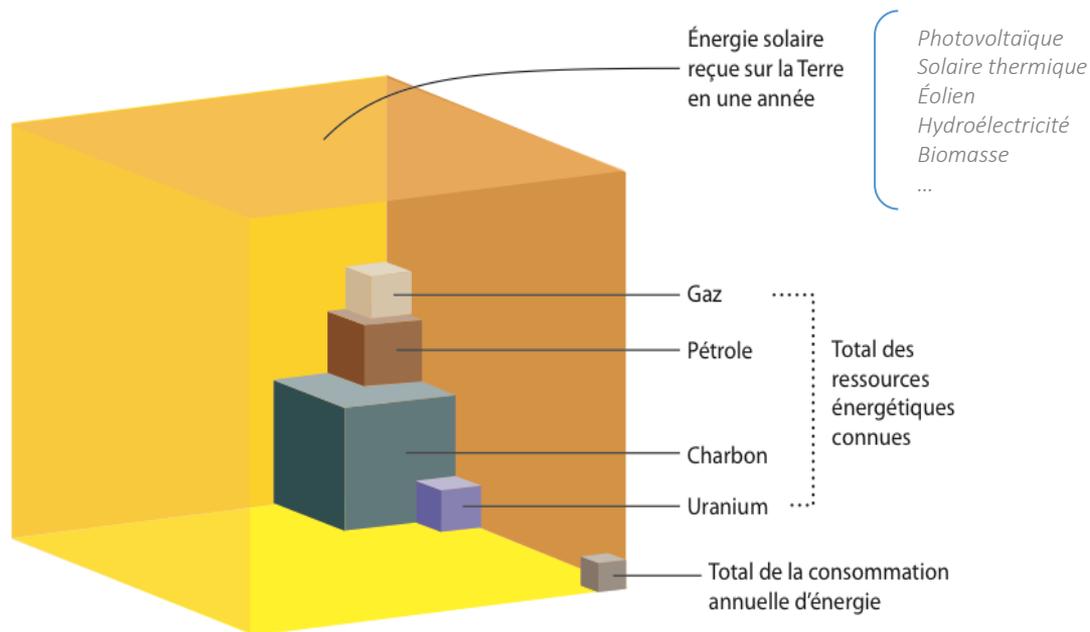
- *Perspective mondiale*
- *Nucléaire vs. renouvelables*
- *Choix du scénario négaWatt*

*Substitution*

*Ressources  
basées sur des stocks*



*Ressources  
basées sur des flux*



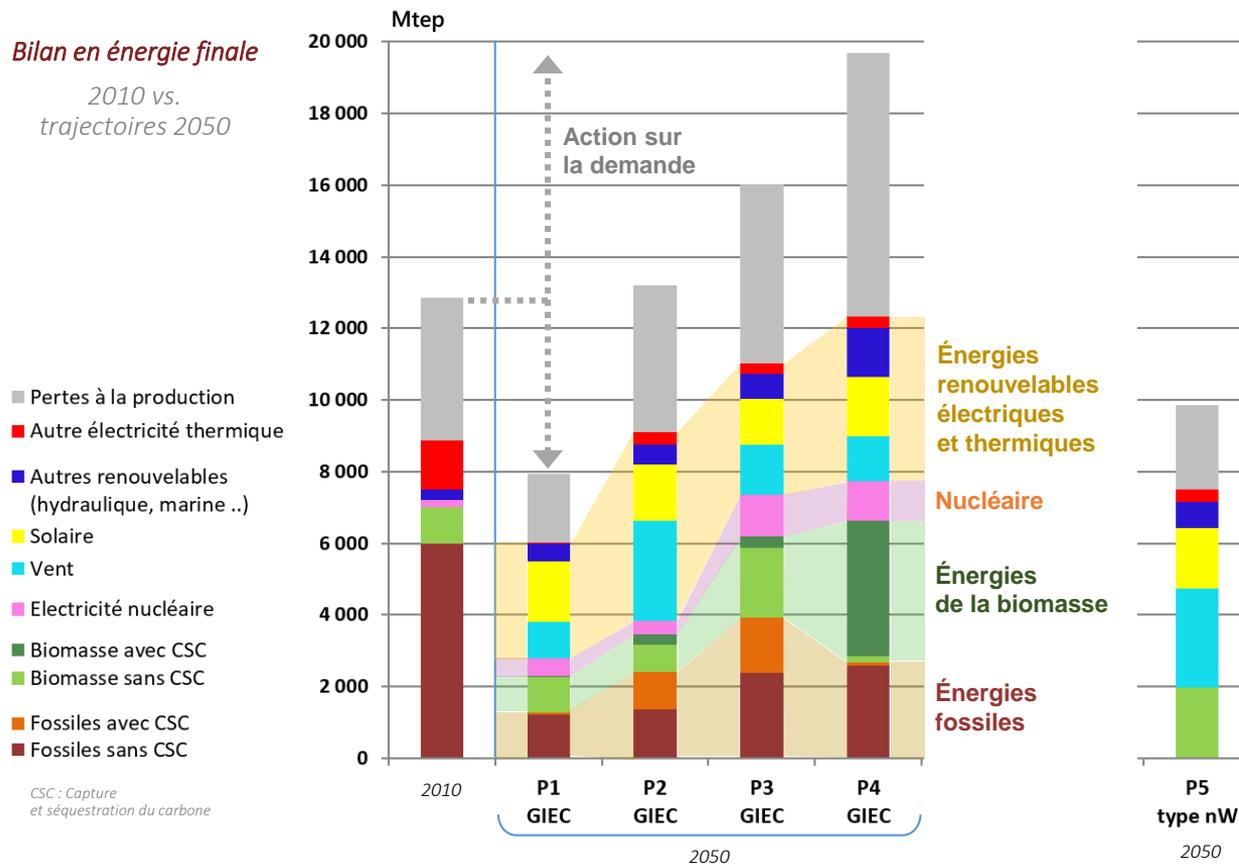
La Terre reçoit en **1 heure**  
la quantité d'énergie  
consommée en **1 an**

Représentation des quantités d'énergies disponibles sur Terre

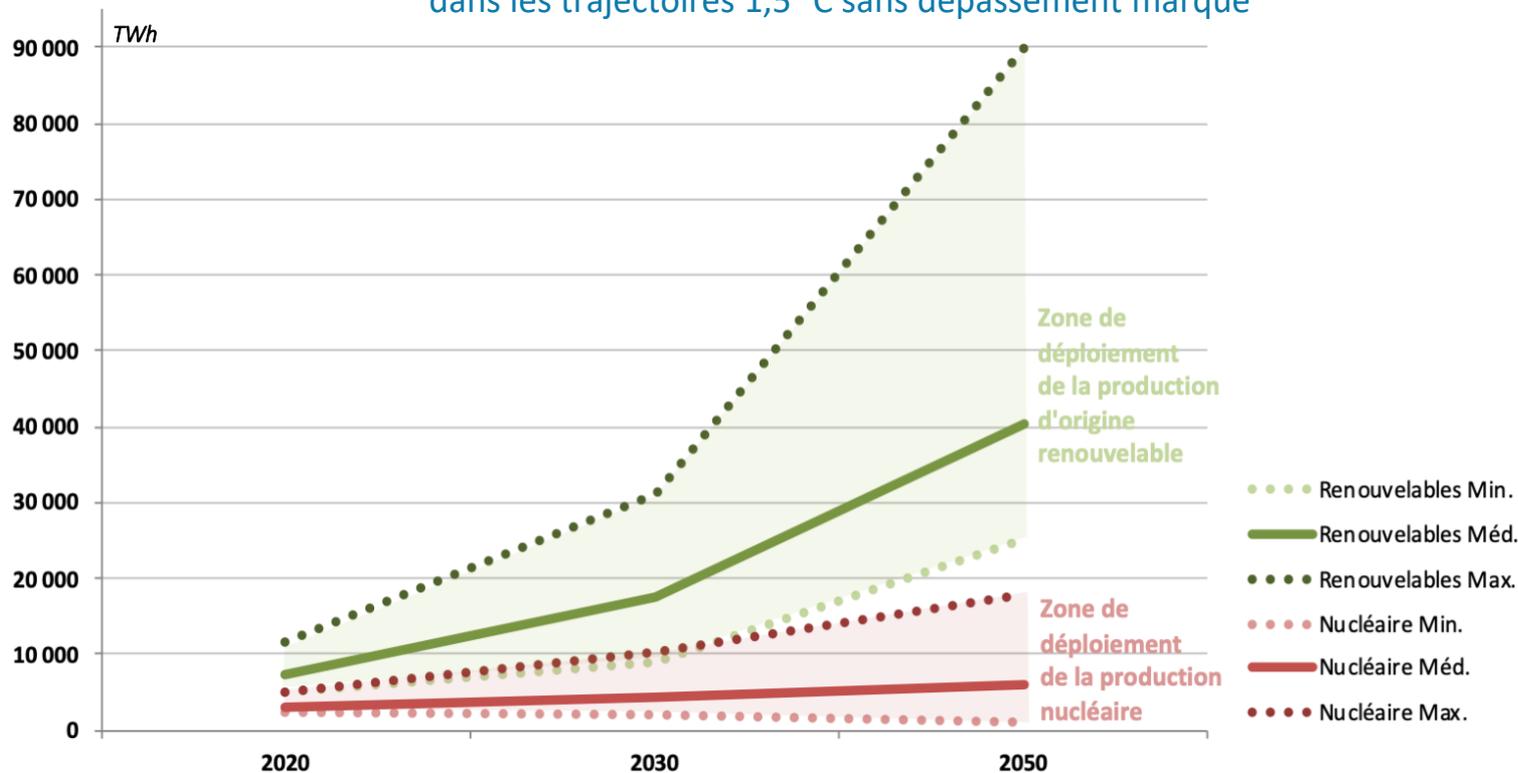
# ➤ Potentiel sur la production

## Bilan en énergie finale

2010 vs.  
trajectoires 2050

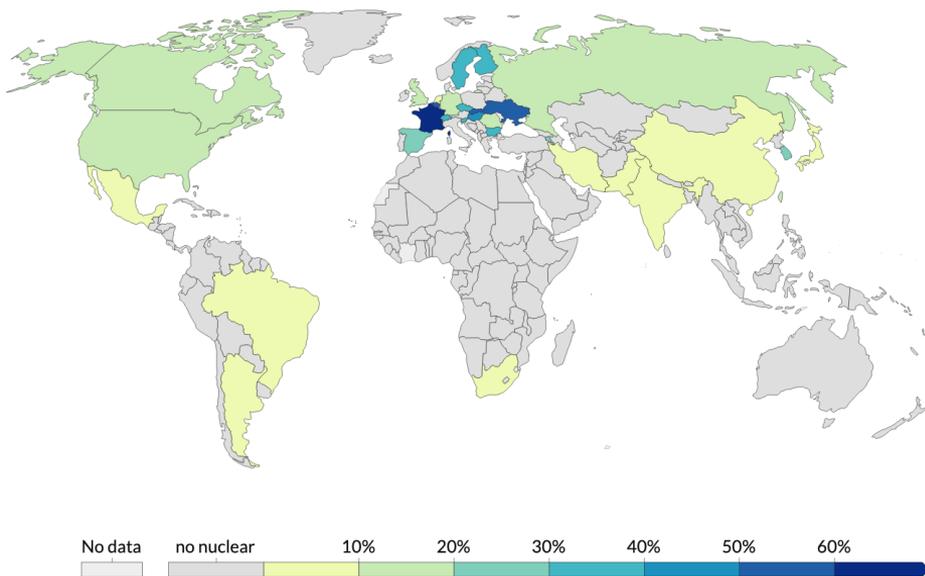


## Production électrique d'origine renouvelable et nucléaire dans le monde dans les trajectoires 1,5 °C sans dépassement marqué

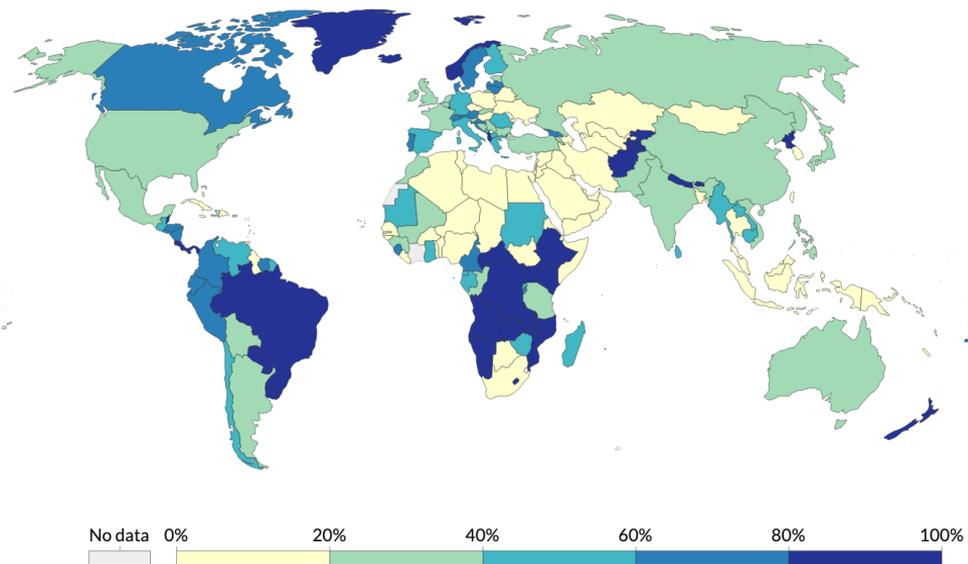


Source : Association négaWatt, d'après GIEC (2018), Rapport spécial 1,5°C

Part du nucléaire dans la production d'électricité par pays  
2021



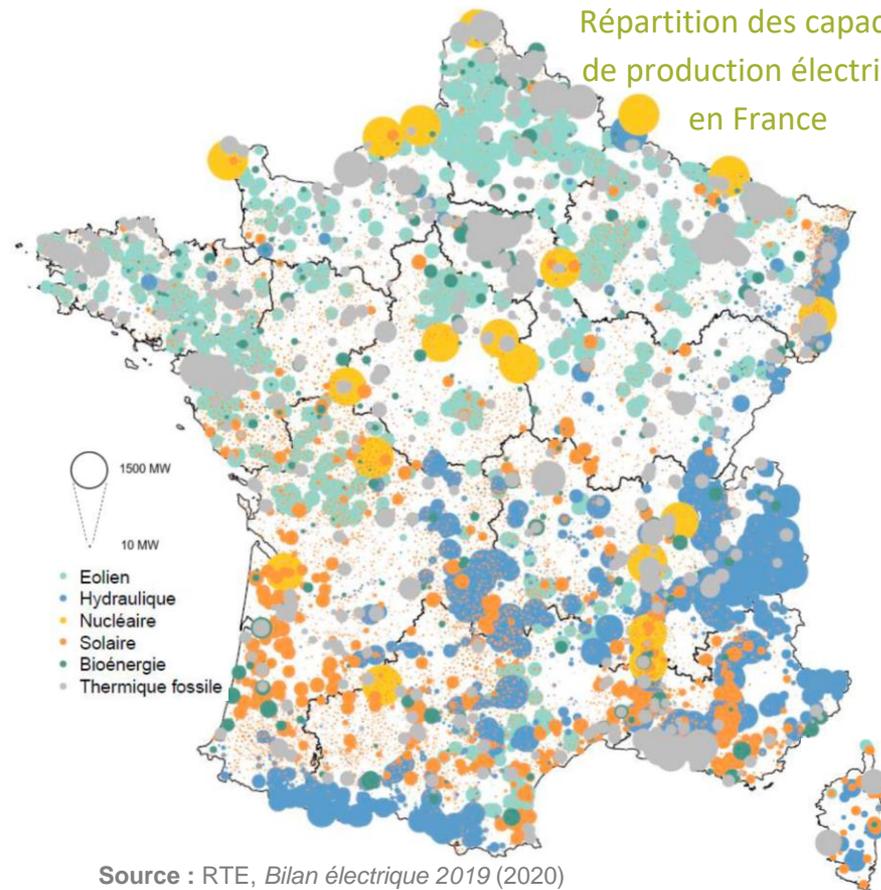
Part des renouvelables dans la production d'électricité par pays  
2021



## Principales installations nucléaires en France

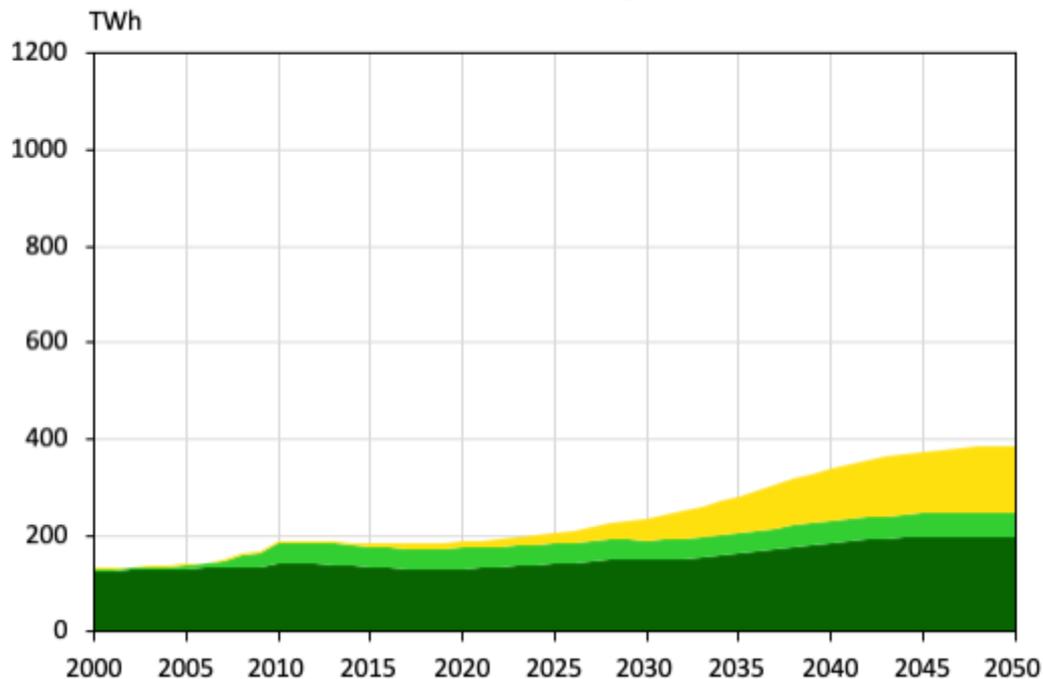


## Répartition des capacités de production électrique en France





## Bio-énergies



■ Biogaz

■ Biomasse liquide

■ Biomasse solide

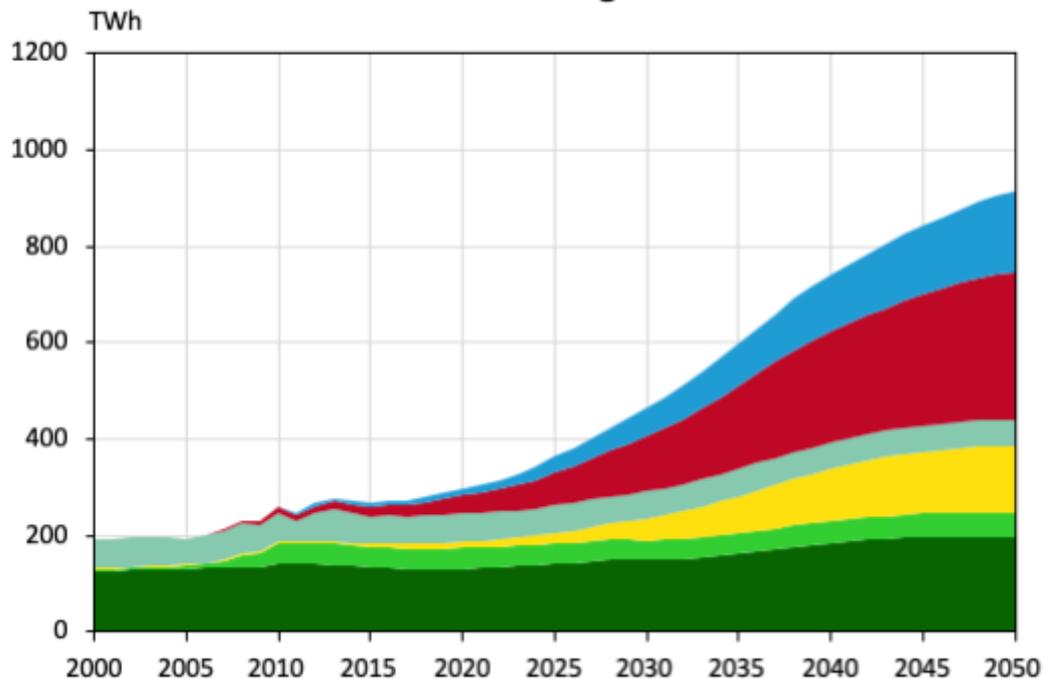
Déchets, résidus de culture, cultures intermédiaires, **pas de culture dédiée** pour la production de biogaz

Réduction du recours aux **agrocarburants** sous leur forme actuelle Développement de nouveaux agrocarburants pour l'aviation

**Exploitation raisonnée** de la forêt + contribution croissante de l'agroforesterie



### Bio-énergies + électricité



- Solaire PV
- Eolien
- Hydraulique
- Biogaz
- Biomasse liquide
- Biomasse solide

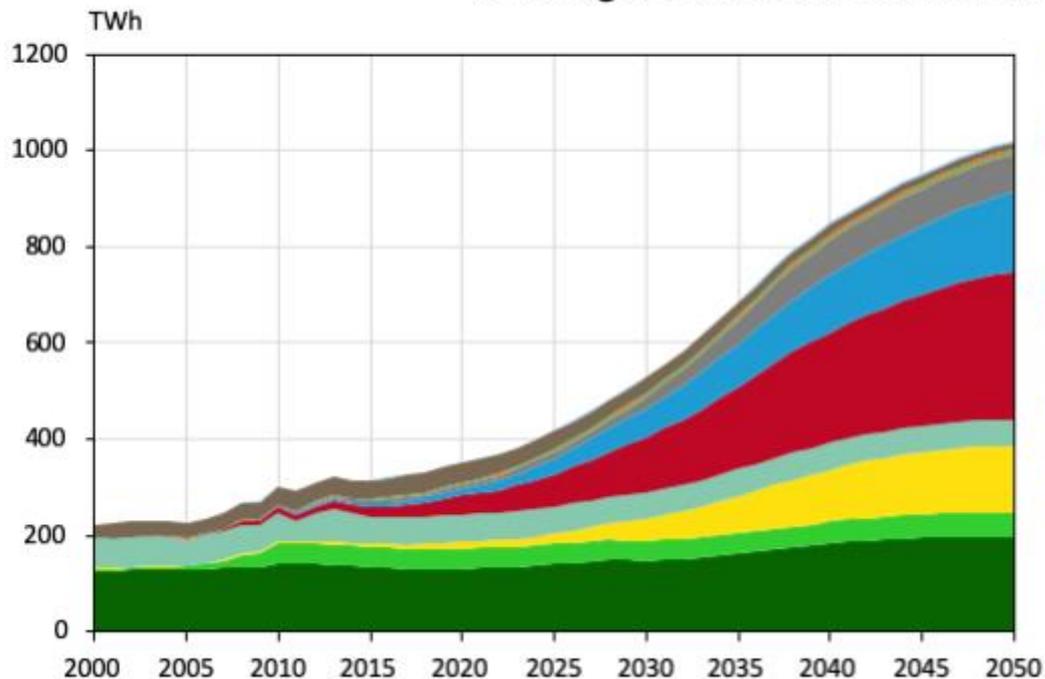
Développement diversifié du photovoltaïque, du **diffus** aux **parcs au sol**, sans concurrence avec les usages agricoles  
**144 GW au total en 2050**

Développement de l'éolien **terrestre** (18 500 mâts) et **offshore** (3 500 mâts) posé et flottant  
**99 GW au total en 2050**

Baisse tendancielle modérée de la production hydroélectrique



### Bio-énergies + électricité + autres renouvelables



- Energies marines
- Déchets
- Solaire thermique
- Géothermie
- Chaleur environnement
- Solaire PV
- Eolien
- Hydraulique
- Biogaz
- Biomasse liquide
- Biomasse solide

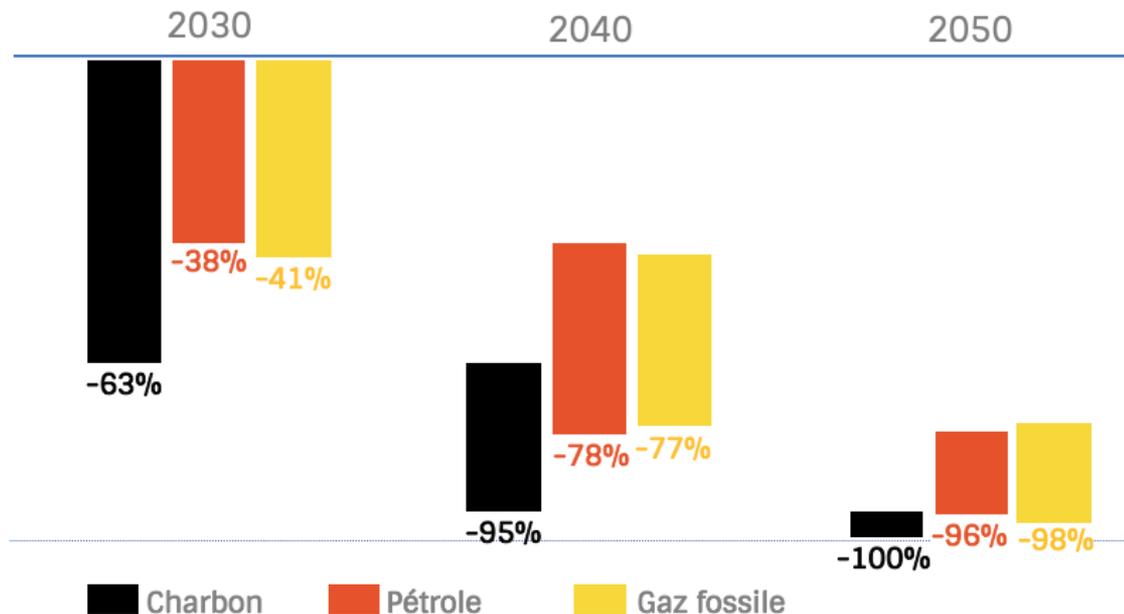
Pas de développement de filières nouvelles insuffisamment matures

Recours modéré aux filières matures à potentiel limité

Développement important des *pompes à chaleur*

- *Sortie progressive des énergies fossiles sauf usages résiduels marginaux de gaz fossile*
- *Talon d'usages non énergétiques*
- *Effort de substitution continu entre vecteurs et de remplacement du gaz fossile par du gaz vert*
- *Pas de pic temporaire lié à la transition*

Réduction de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2020





# 4.

## *Les scénarios France*

---

- *Panorama des scénarios*
- *Méthodes et résultats*
- *Convergences et différences*



## Stratégie nationale bas-carbone

La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone

Horizon 2050

Basée sur scénario AMS  
"avec mesures supplémentaires"

Modélisation  
énergie - GES - air

Traduction  
en budgets carbone

Mars 2020



## Futurs énergétiques 2050

Horizon 2050-2060+

Modélisation  
du système électrique  
cohérente avec SNBC

6 scénarios offre  
3 trajectoires demande  
(et 4 variantes)

Sécurité électrique

Analyse multicritères  
économie, matières...

Octobre 2021



## Scénario négaWatt 2022

La transition énergétique  
au cœur d'une transition sociétale

Horizon 2050+

Modélisation  
sectorielle  
énergie,  
matières premières,  
usages biomasse  
Périmètre domestique  
et empreinte

Analyse multicritères  
emplois, empreinte,  
cobénéfices...

Octobre 2021



## TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT  
AGIR POUR LE CLIMAT

Horizon 2050

4 scénarios  
Cadrage commun

Modélisations  
sectorielles

+

Outil intégrateur  
énergie, GES, matières, sols

Analyse multicritères  
économie, empreinte,  
robustesse...

Novembre 2021



Climat, crises:

## Le plan de transformation de l'économie française



Horizon 2050 ?

~ 15 plans sectoriels  
secteurs "usages",  
"services", "amont"

Chantiers transverses

emploi, finance,  
bouclage énergétique,  
bouclage matières,  
villes et territoires

Février 2022



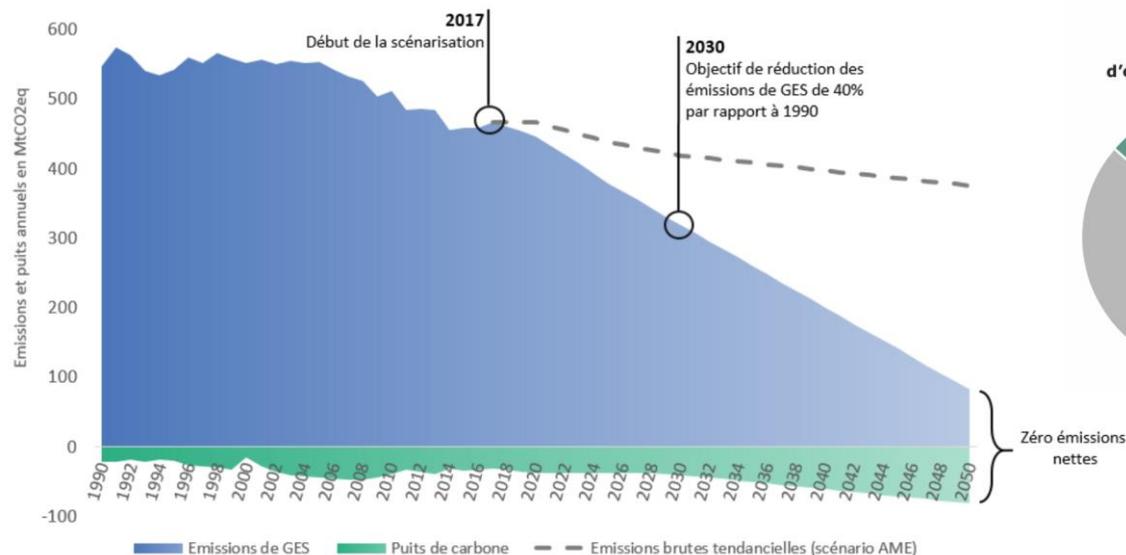
*Stratégie nationale  
bas carbone (SNBC)*

---

## 2050

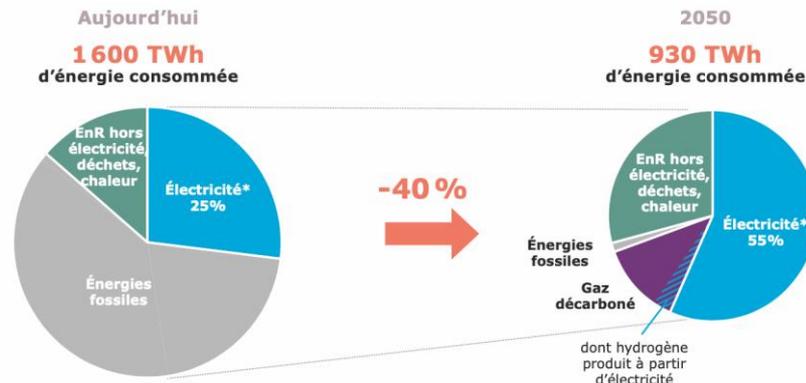
- Neutralité carbone en émissions domestiques

Évolution des émissions et des puits de gaz à effet de serre sur le territoire national



## 2050

- Forte réduction de la consommation d'énergie finale
- Forte progression de la part de l'électricité



\* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)

Biomasse et combustibles décarbonés : 37%  
Chaleur renouvelable hors biomasse : 8%



# *Scénarios ADEME*

---



## S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Villes moyennes  
et zones rurales

Frugalité contrainte

Rénovation massive

Localisme

Nouveaux indicateurs  
de prospérité

3x moins de viande



## S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Coopérations  
entre territoires

Économie du partage

Modes de vie  
soutenables

Réindustrialisation  
ciblée

Fiscalité  
environnementale

Gouvernance  
ouverte

Mobilité maîtrisée



## S3 TECHNOLOGIES VERTES

Hydrogène

Métropoles

Déconstruction / reconstruction

Technologies  
de décarbonation

Régulation minimale

Consumérisme  
vert



## S4 PARI RÉPARATEUR

Captage du CO<sub>2</sub>  
dans l'air

Agriculture  
intensive

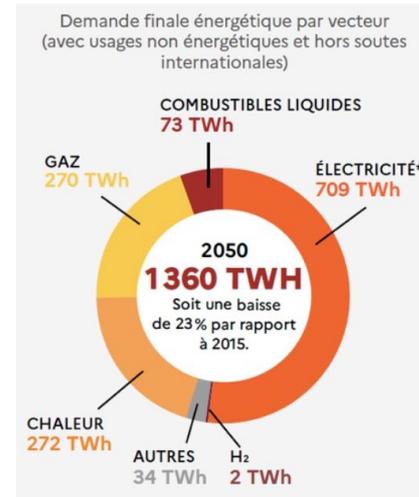
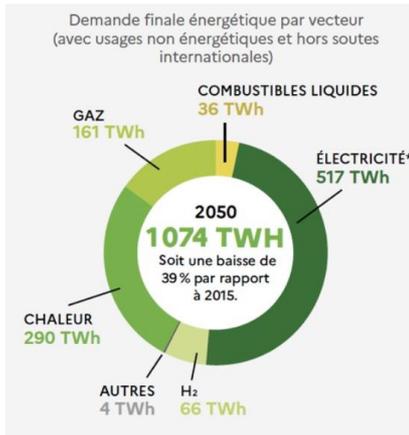
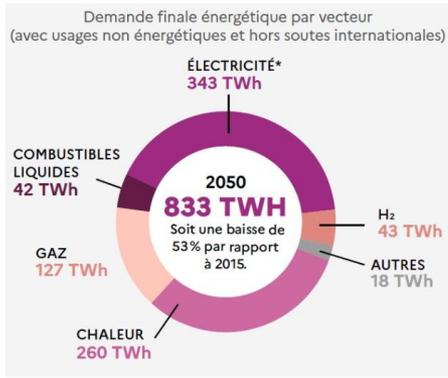
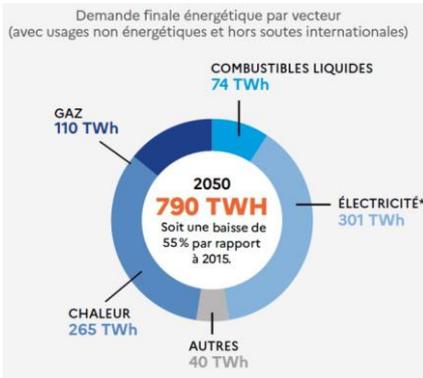
Étalement urbain

Consommation  
de masse

Économie  
mondialisée

Technologies  
incertaines

Intelligence  
artificielle





## S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050

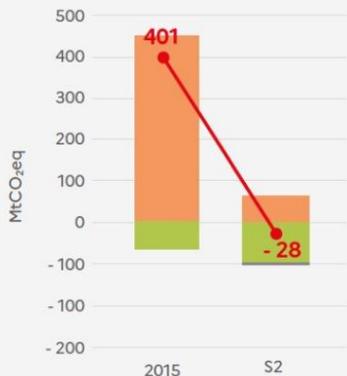


Émissions Puits biologiques Bilan



## S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



Émissions Puits biologiques Bilan



## S3 TECHNOLOGIES VERTES

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



Émissions Puits biologiques CCS et puits technologiques Bilan



## S4 PARI RÉPARATEUR

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



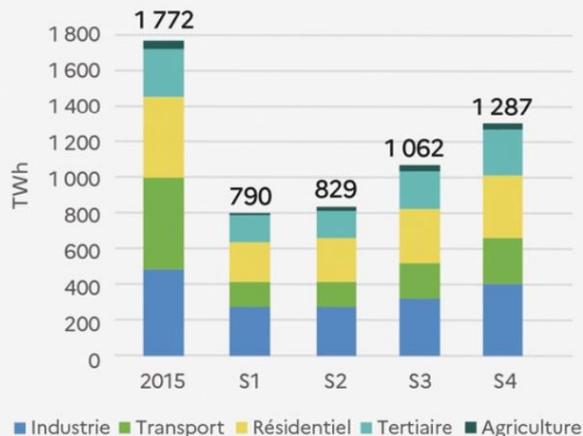
Émissions Puits biologiques CCS et puits technologiques Bilan

- Une réduction de 20% à 50% de la consommation d'énergie finale

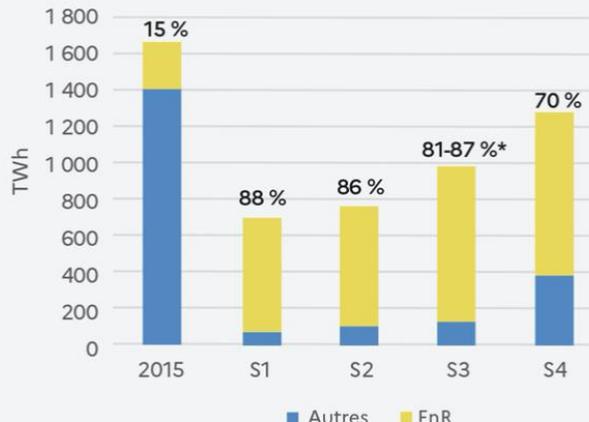
- Une part de 70% à 90% d'énergies renouvelables

- Part croissante de l'électricité mais pas nécessairement en valeur absolue
- Rôle des renouvelables hors réseau
- Talon gaz décarboné, limitation du potentiel biocarburants

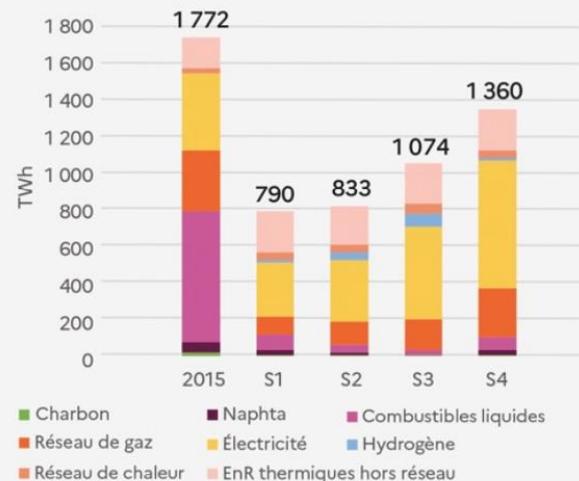
Consommation finale d'énergie par secteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)



Consommation d'énergie et part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2015 et 2050



Demande finale énergétique par vecteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)





## *Scénarios RTE*

---

## LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION À L'HORIZON 2050

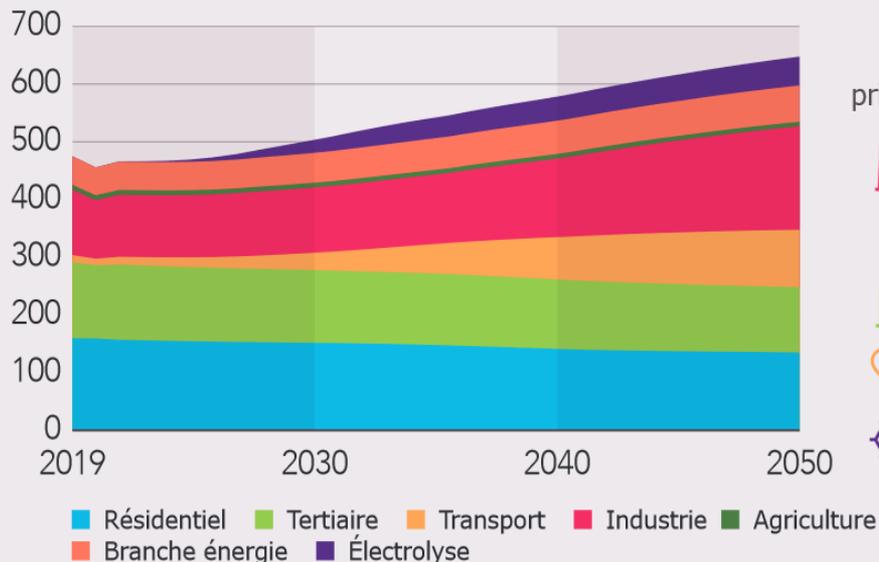
Consommation  
finale d'électricité  
par secteur :

Industrie  
Résidentiel

Tertiaire  
Transport

Hydrogène

Consommation d'électricité dans la trajectoire de référence



Les ordres de grandeurs des principaux secteurs

- 180 TWh
- 135 TWh
- 110 TWh
- 100 TWh
- 50 TWh

Référence

NIVEAU 2050

**645 TWh**

PRINCIPALES ÉVOLUTIONS

- 180 TWh
- 134 TWh
- 113 TWh
- 99 TWh
- 50 TWh

Sobriété

NIVEAU 2050  
(par rapport à la référence)

**555 TWh**  
(-90 TWh)

PRINCIPALES ÉVOLUTIONS  
(+ écart par rapport à la référence)

- 160 TWh (-20 TWh)
- 111 TWh (-23 TWh)
- 95 TWh (-18 TWh)
- 77 TWh (-22 TWh)
- 47 TWh (-3 TWh)

Réindustrialisation profonde

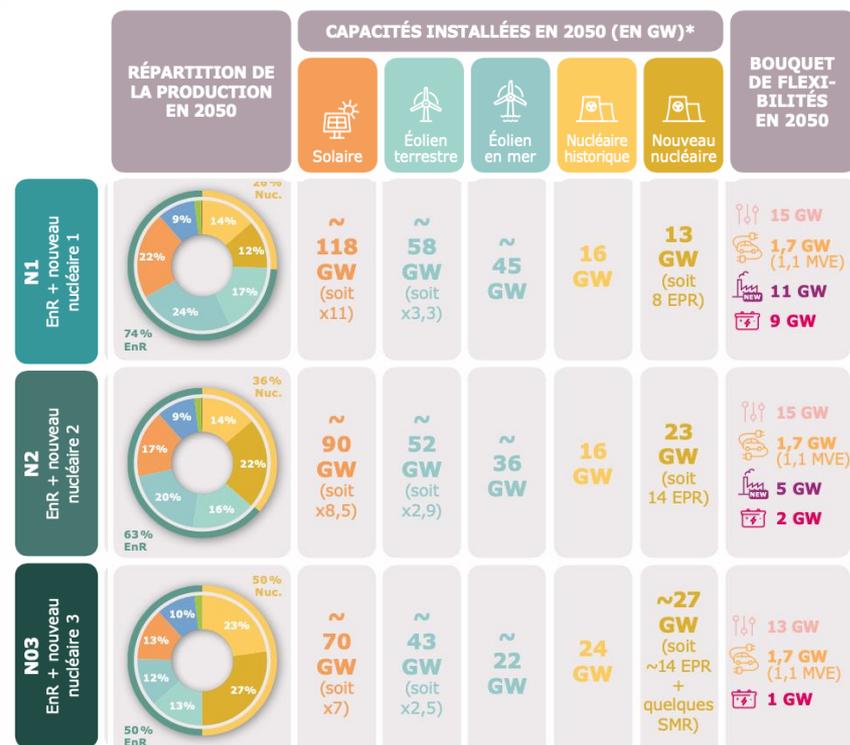
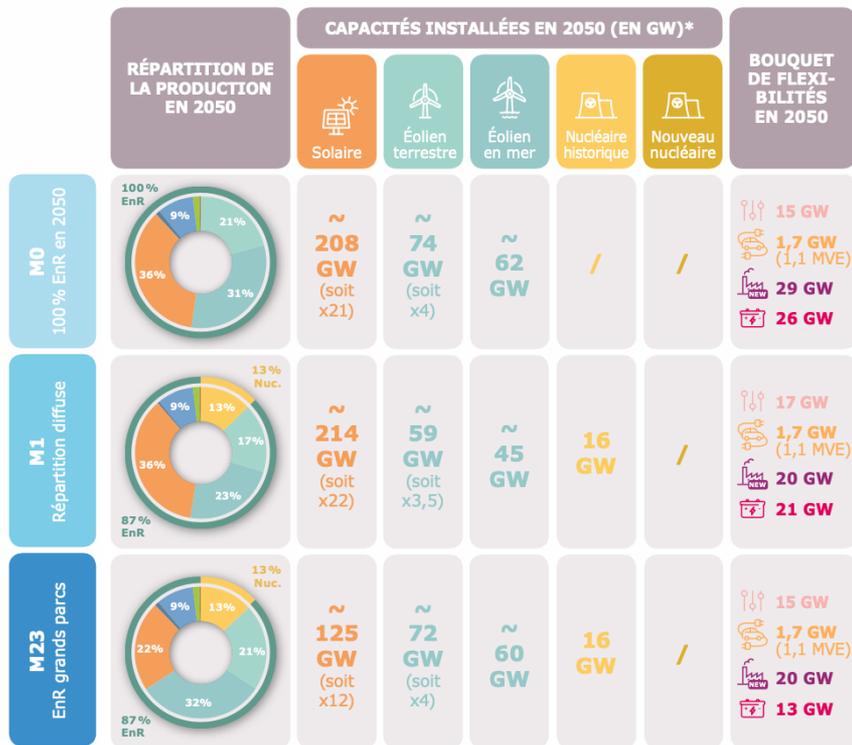
NIVEAU 2050  
(par rapport à la référence)

**752 TWh**  
(+107 TWh)

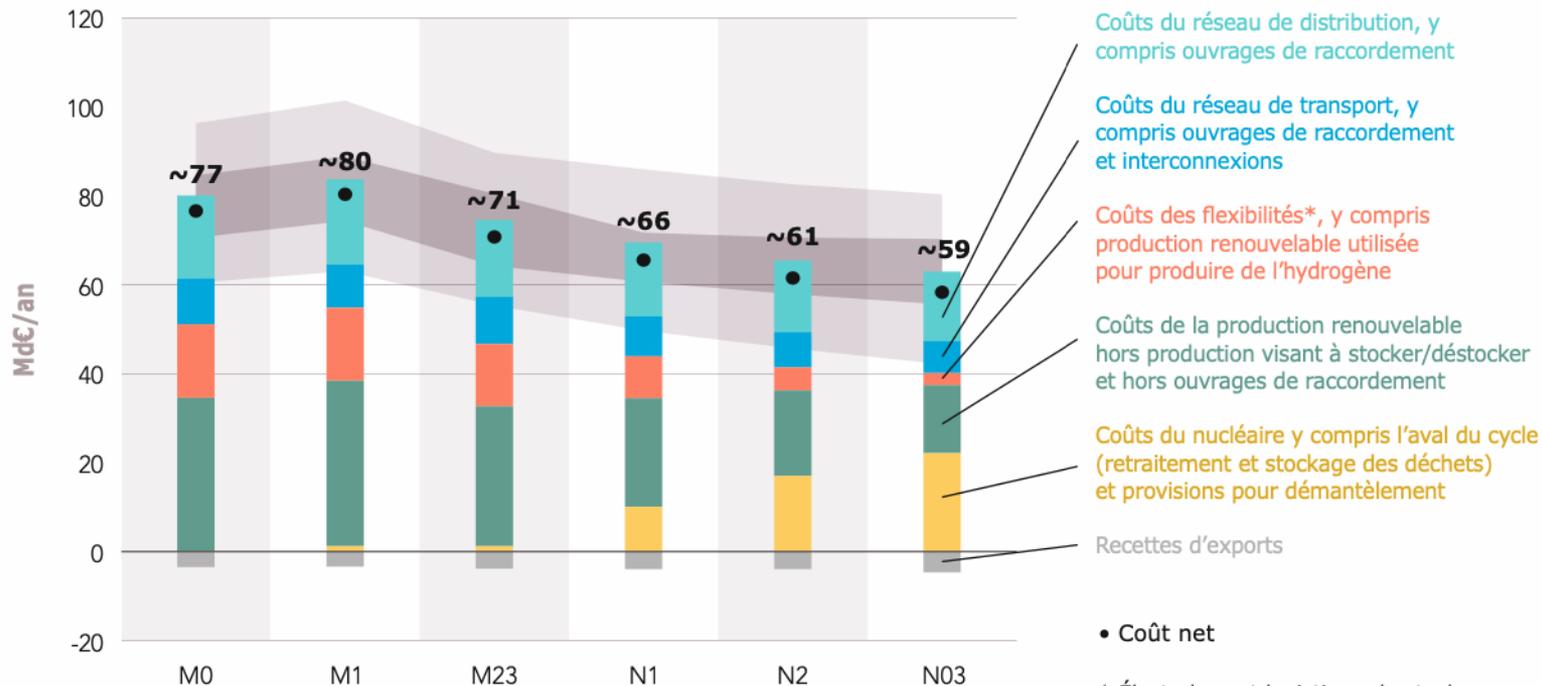
- 239 TWh (+59 TWh)
- 134 TWh (0 TWh)
- 115 TWh (+2 TWh)
- 99 TWh (0 TWh)
- 87 TWh (+37 TWh)

## LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050

Filières : Flexibilités de la demande (hors V2G) Nouveau thermique décarboné Batteries Véhicule-to-grid



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



• Coût net

\* Électrolyse et logistique de stockage d'hydrogène associée, flexibilités de la demande, batteries et stockage hydraulique



## *Scénario négaWatt*

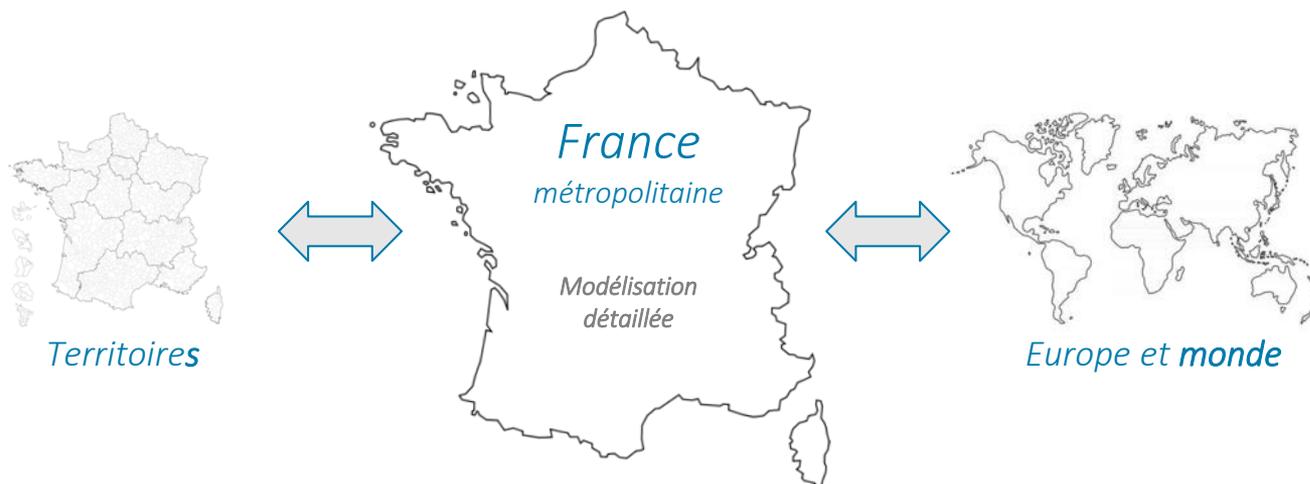
---

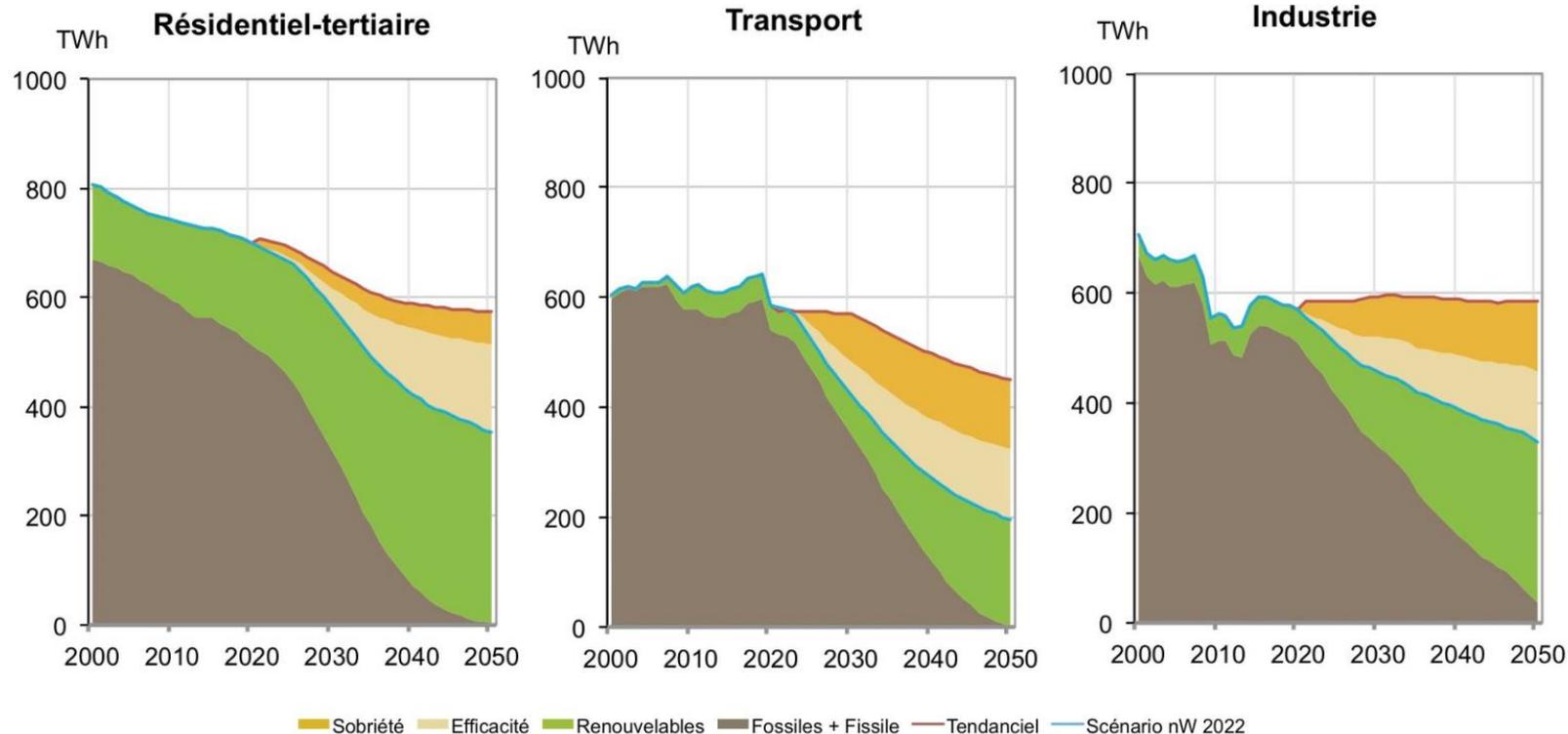
# Un périmètre aussi complet et cohérent que possible

1 Physique

2 Géographique

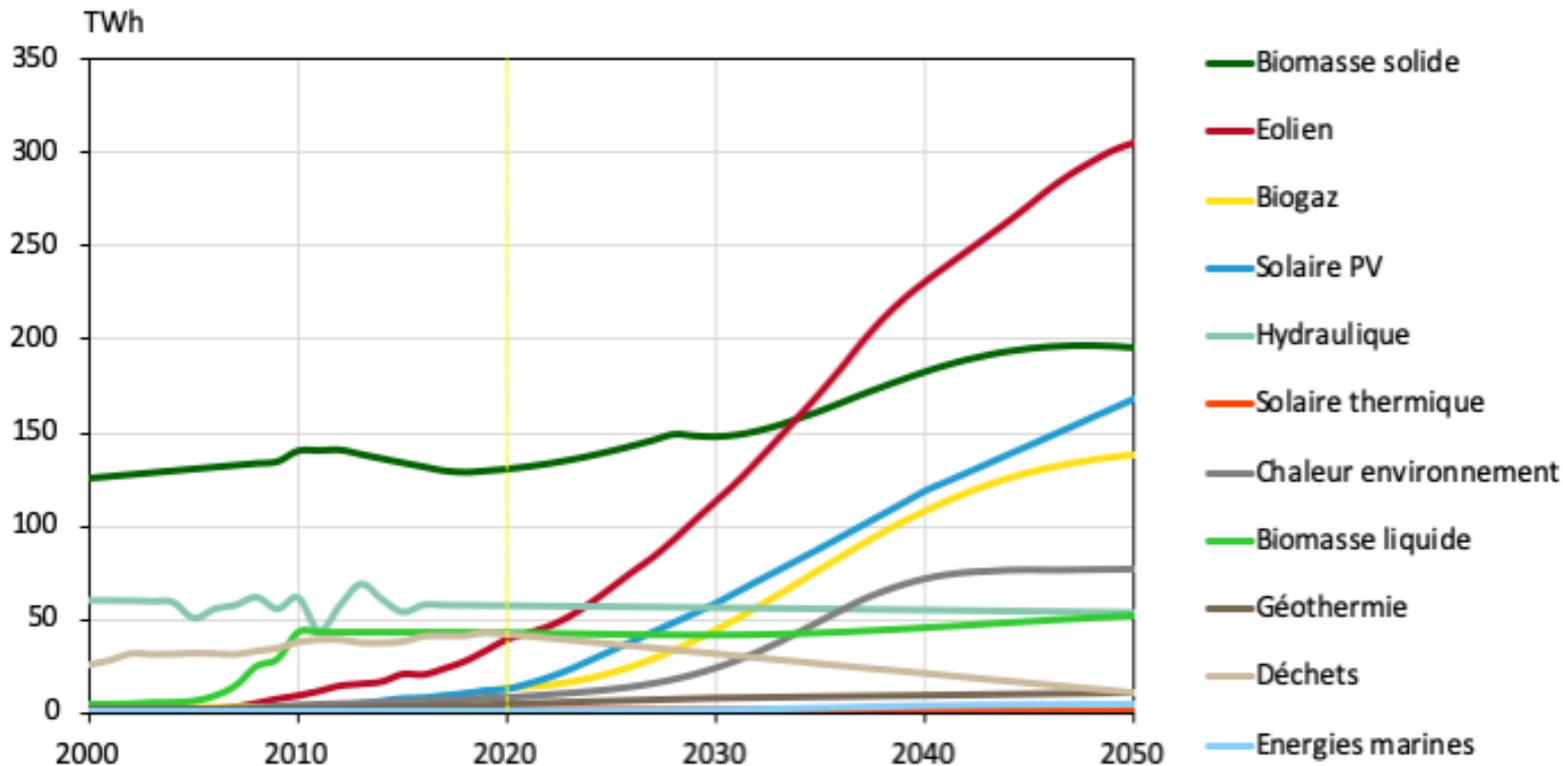
3 Temporel

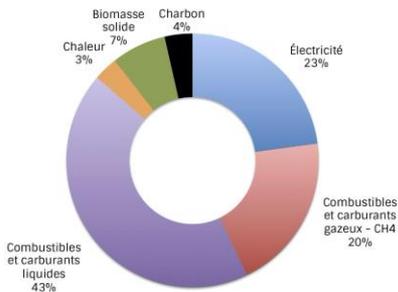




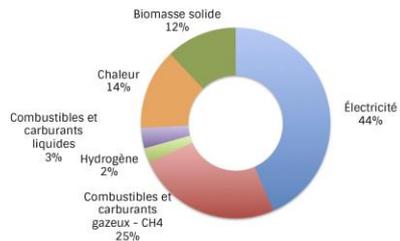


### Energies primaires renouvelables utilisées





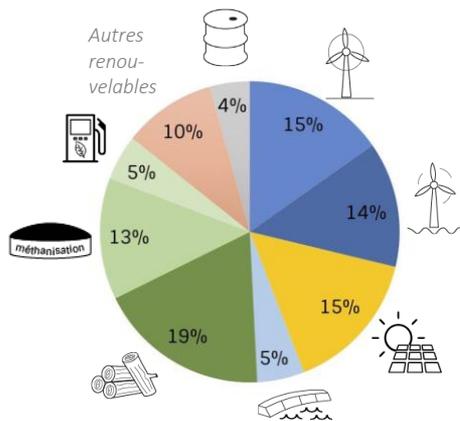
2019



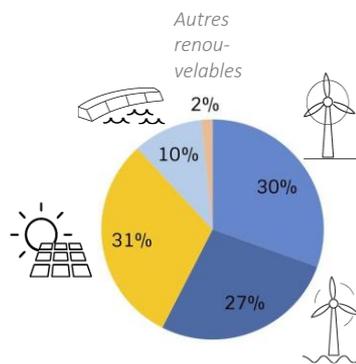
2050

## 2050

- Division par deux en énergie finale
- 100 % énergies renouvelables locales
- Neutralité carbone en empreinte
- Forte réduction de l'empreinte matières
- Cobénéfices environnementaux, sociaux, économiques



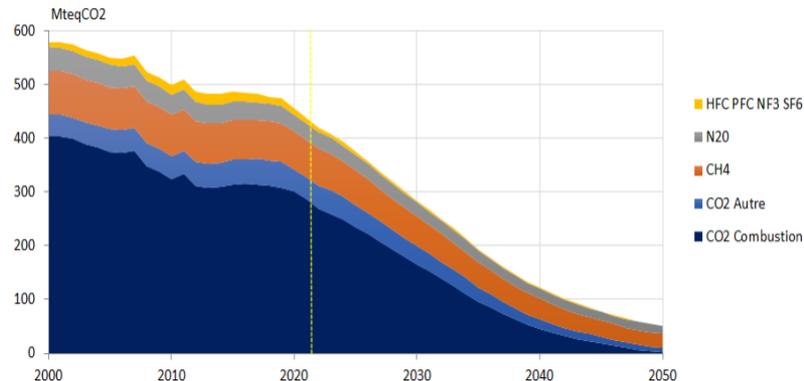
Mix énergétique 2050 - 1060 TWh



Mix électrique 2050 - 530 TWh



## Emissions de GES par gaz à effet de serre



# Des bénéfices multiples et partagés



Neutralité  
carbone  
en empreinte



100 % d'énergies  
renouvelables  
locales



Réduction de 30 %  
de l'empreinte  
matériaux



Moindre pression sur la  
biodiversité  
terrestre et aquatique



Moins de pollution et de  
prélèvements



Alimentation  
plus saine,  
moins de pertes



Moins de pollution  
et davantage  
de prévention



Forte réduction  
de la précarité  
énergétique



Redistribution  
de l'accès  
aux ressources



Équilibre renforcé  
dans les modes  
de vie



600 000 emplois  
nets créés, relocalisation  
industrielle



Création de valeur  
et résilience dans  
les territoires



Innovation et  
infrastructures  
régulées



Gestion  
partenariale  
des communs



Coopération,  
solidarité et accès  
équitable  
aux ressources



Appropriation  
démocratique  
de la transition



# Convergences et questionnements

## *Demande*

- *Nécessité d'une réduction importante de la consommation d'énergie*
- *Question sur le niveau nécessaire / possible de sobriété*

## *Production*

- *Fort développement des énergies renouvelables*
- *Question ouverte sur le maintien ou non d'une part de nucléaire dans l'électricité*
- *Nécessaire mobilisation de la biomasse pour l'énergie*

## *Vecteurs*

- *Question ouverte sur le niveau d'électrification*
- *Enjeu fort sur la maîtrise des équilibres autour de la biomasse*

## *Enjeux transverses*

- *Enjeux croisés de la sobriété et de la réindustrialisation*
- *Nécessité de prendre en compte un impact différencié sur les ressources (matières, sols, eau...)*
- *Trajectoire économique maîtrisable, opportunités (emplois, nouvelles filières...)*
- *Implications fortes et peu explorées sur les dynamiques territoriales*



→ Contact

Mail : [yves.marignac\[at\]negawatt.org](mailto:yves.marignac[at]negawatt.org)

Tél. : +33 6 07 71 02 41

LinkedIn & Twitter

<https://www.linkedin.com/in/yvesmarignac/>

<https://twitter.com/yvesmarignac>

→ Nombreuses ressources disponibles

[www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)

Synthèse et rapport du scénario

Graphiques dynamiques

Replay de la présentation complète, webinaires

---

Ressources complémentaires

**Association négaWatt** • Ressources sur le scénario négaWatt 2022

<https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>

**Association négaWatt** • Webinaire “Risques et gouvernance : enjeux associés à l’avenir du parc nucléaire français” avec Hélène Gassin et Yves Maignac • 16 sept. 2022

<https://negawatt.org/Risques-et-gouvernance-quels-enjeux-associes-a-l-avenir-du-parc-nucleaire>

**Kaizen** • Débat “Sortir des énergies fossiles : demain quelles énergies ?” entre Jean-Marc Jancovici et Yves Maignac • 16 février 2023

<https://www.youtube.com/watch?v=sVZViT-cnGo>

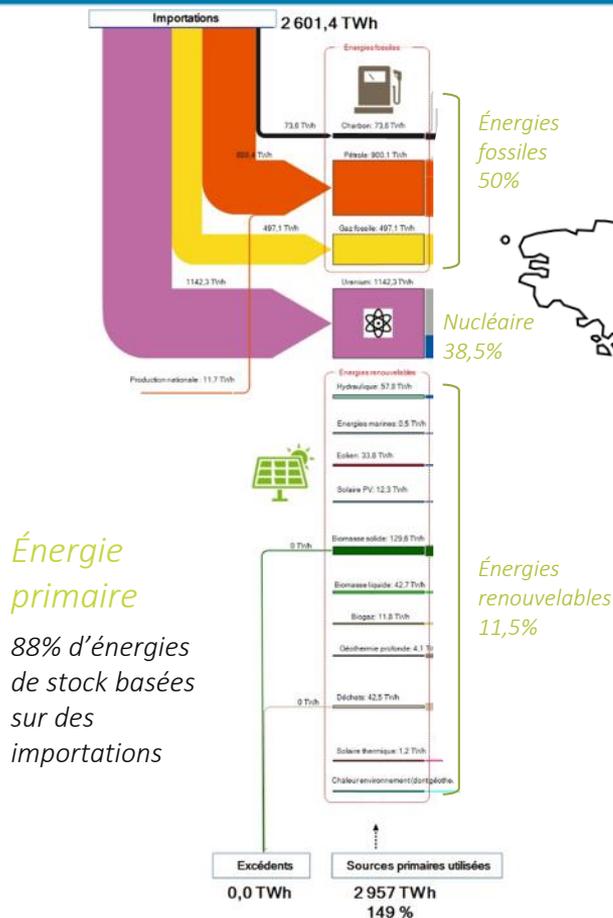
**Plan(s) B** • Podcast “Décroissance vs. transition” avec Cyrus Farhangi, Yves Maignac, Karim Megherbi et Timothée Parrique • 10 mai 2023

<https://www.youtube.com/watch?v=K6LB4RYMKjo>

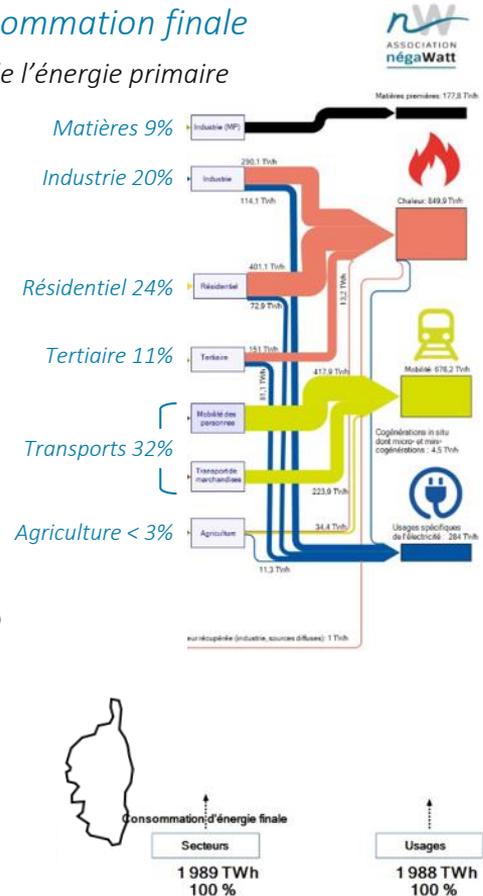
**Énerpresse** • Webinaire “Nucléaire : le défi d’une décennie” avec Antoine Armand, Valérie Faudon, Yves Maignac, Aurore-Emmanuelle Rubio • 16 mai 2023

<https://webikeo.fr/webinar/debats-bip-enerpresse-nucleaire-le-defi-d-une-decennie/replay>

# Application nationale



## Consommation finale 67% de l'énergie primaire



Bilan 2019

### Scénario négaWatt

→ Transition énergétique  
et enjeu climatique

- Évalue l'évolution possible de nos consommations d'énergie et de nos moyens de production
- **Approche en empreinte carbone**  
→ émissions importées et soutes internationales sont incluses

### Scénario négaMat

→ Matériaux  
et matières premières

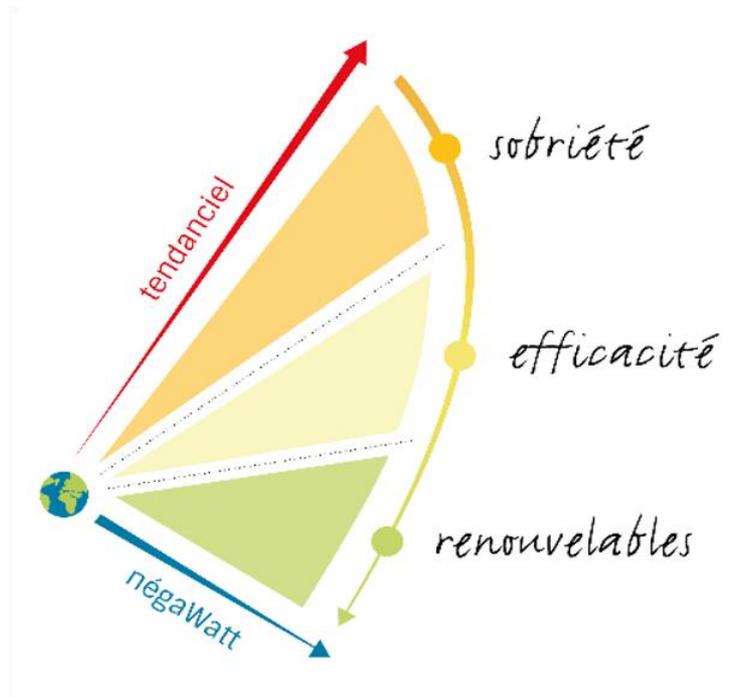
- Évalue l'évolution possible de nos consommations de matériaux et de matières premières
- **Approche en empreinte matière**

### Scénario Afterres

→ Transition agricole,  
sylvicole et alimentaire

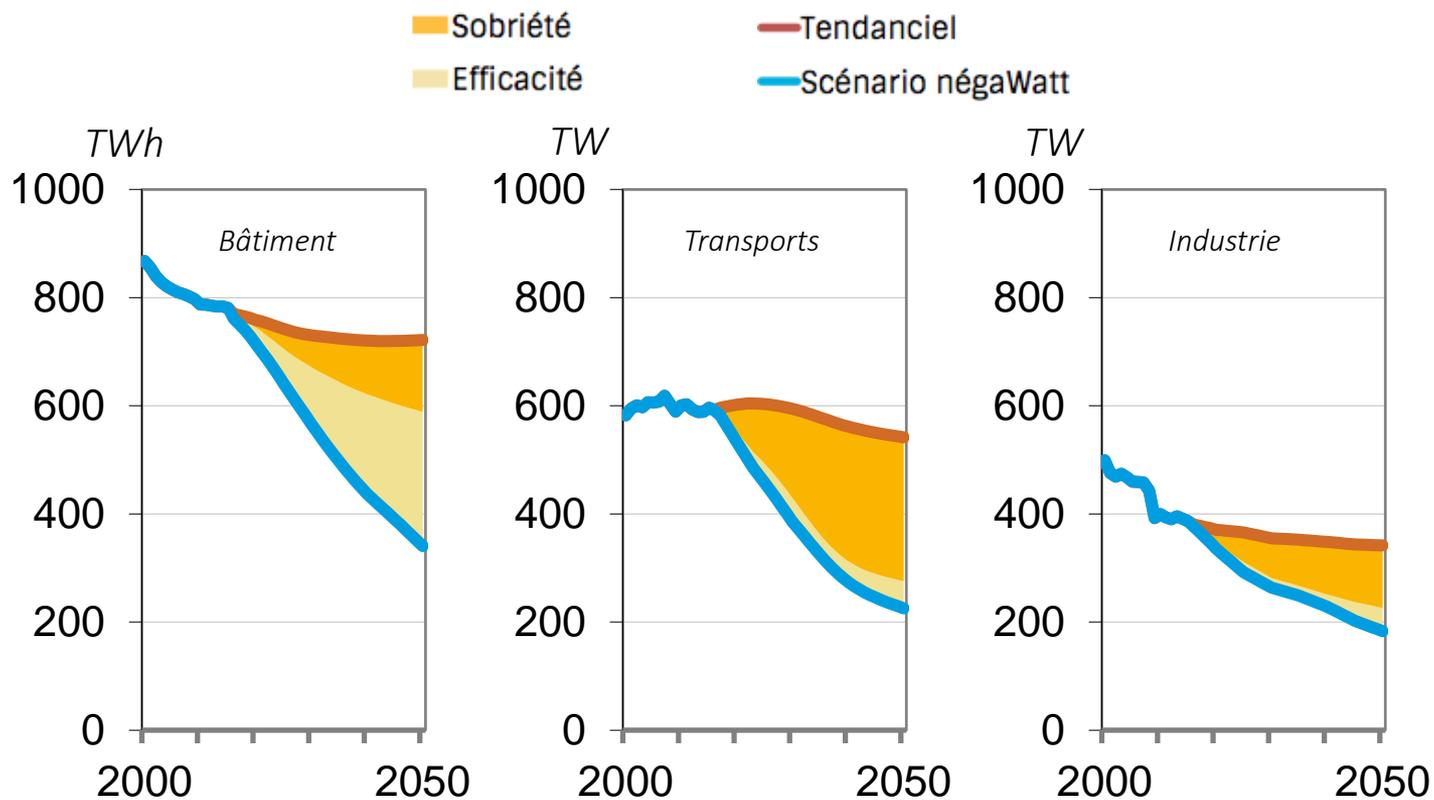
- Évalue l'évolution possible de notre consommation de produits agricoles, de leur production, ainsi que de l'usage des sols, de la forêt et du bois

Une démarche systématique  
pour actionner l'ensemble des leviers



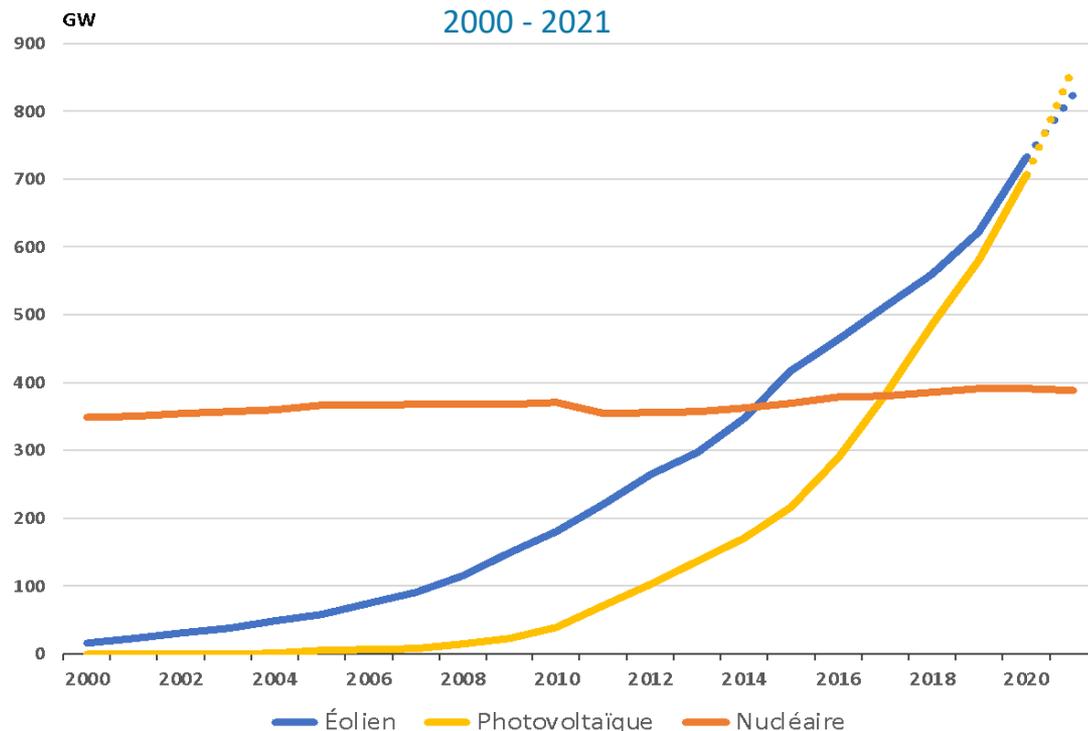
Une matrice “intégrée et indivisible”  
pour traiter l'ensemble des enjeux





Évolution de la consommation d'énergie finale dans le scénario négaWatt

## Évolution de la capacité installée nucléaire, éolienne et photovoltaïque dans le monde



## Capacités de production nettes ajoutées dans le monde

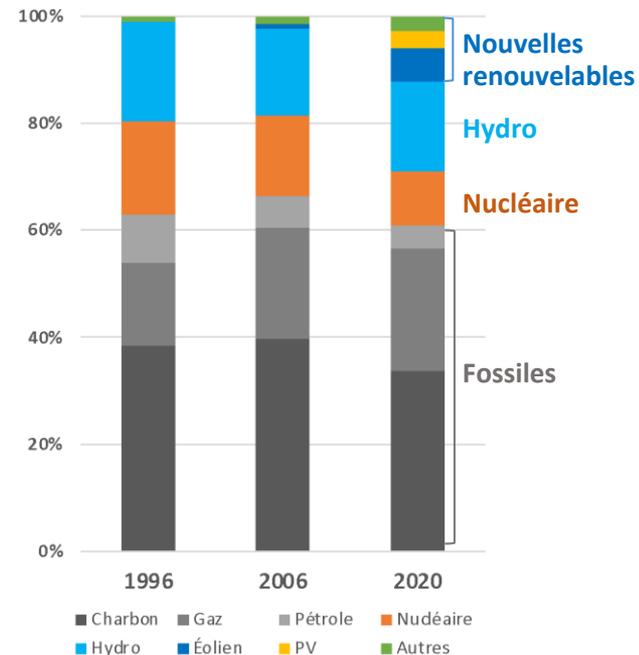
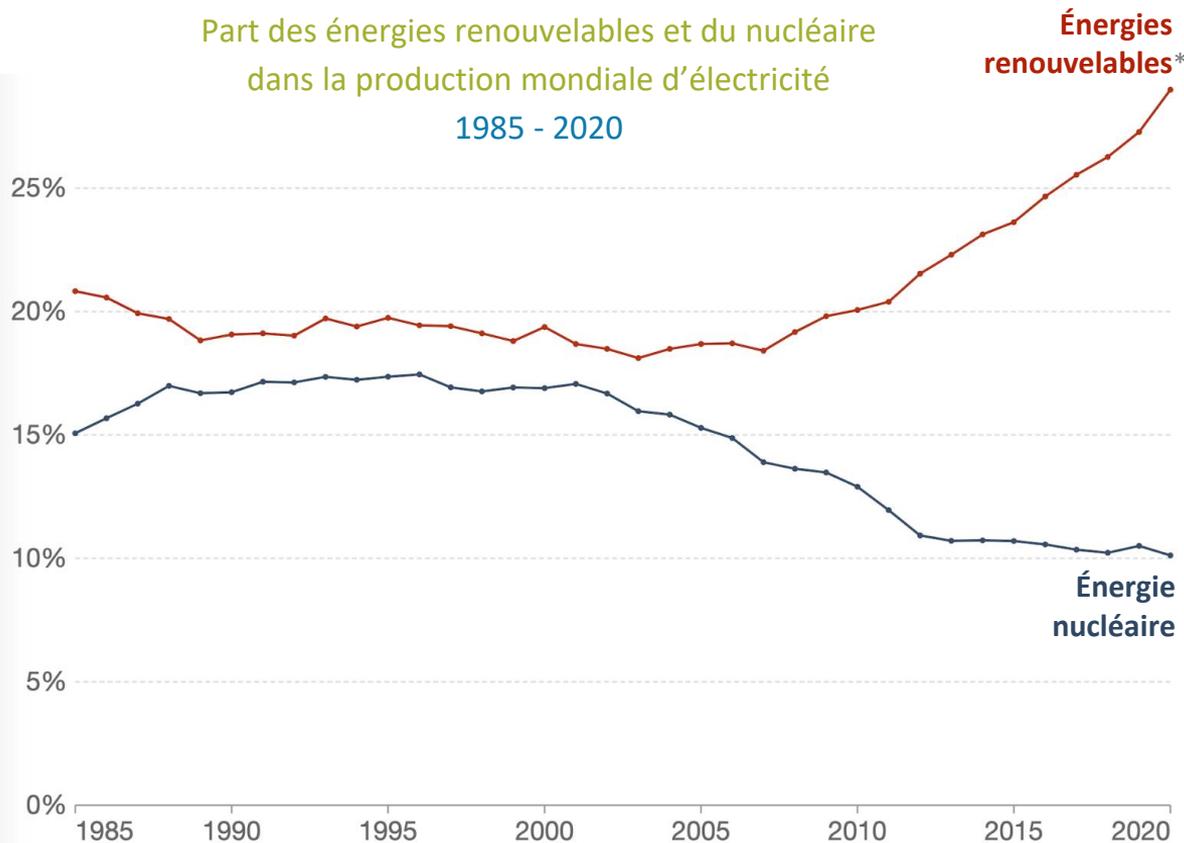
	Nucléaire	Renouvelable
<b>2020</b>	+ 0,4 GW	+ 270 GW
<b>2021</b>	- 2,4 GW	+ 264 GW
<b>2022</b>	+ 4 GW	+ 295 GW

Source : IRENA (2023)

Depuis 20 ans, les investissements dans les renouvelables sont en moyenne **10 à 15 fois supérieurs** aux investissements dans le nouveau nucléaire

Part des énergies renouvelables et du nucléaire dans la production mondiale d'électricité

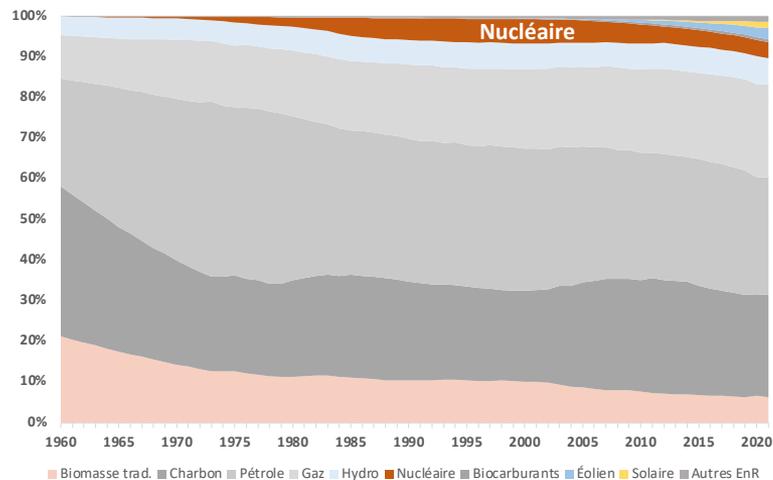
1985 - 2020



\* Renouvelables électriques :  
 - Hydroélectricité  
 - Éolien terrestre et offshore  
 - Photovoltaïque  
 - Production électrique biomasse  
 - Géothermie  
 - Énergies marines

## ↘ La dimension géopolitique

### Part des énergies dans la production primaire dans le monde



En plus de 60 ans, le nucléaire n'a jamais fourni plus de **3 % de l'énergie finale mondiale**

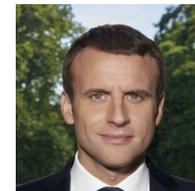
Le nucléaire est une technologie géopolitique avant d'être une technologie énergétique

... dans un monde où l'instrumentalisation militaire d'installations nucléaires devient pour la première fois possible

Emmanuel Macron, président de la République

“L'un ne va pas sans l'autre.  
Sans nucléaire civil, pas de nucléaire militaire,  
sans nucléaire militaire, pas de nucléaire civil”

Discours au Creusot, 8 décembre 2020



© Soazig de la Moissonnière



ESA Sentinel-2 / via Reuters

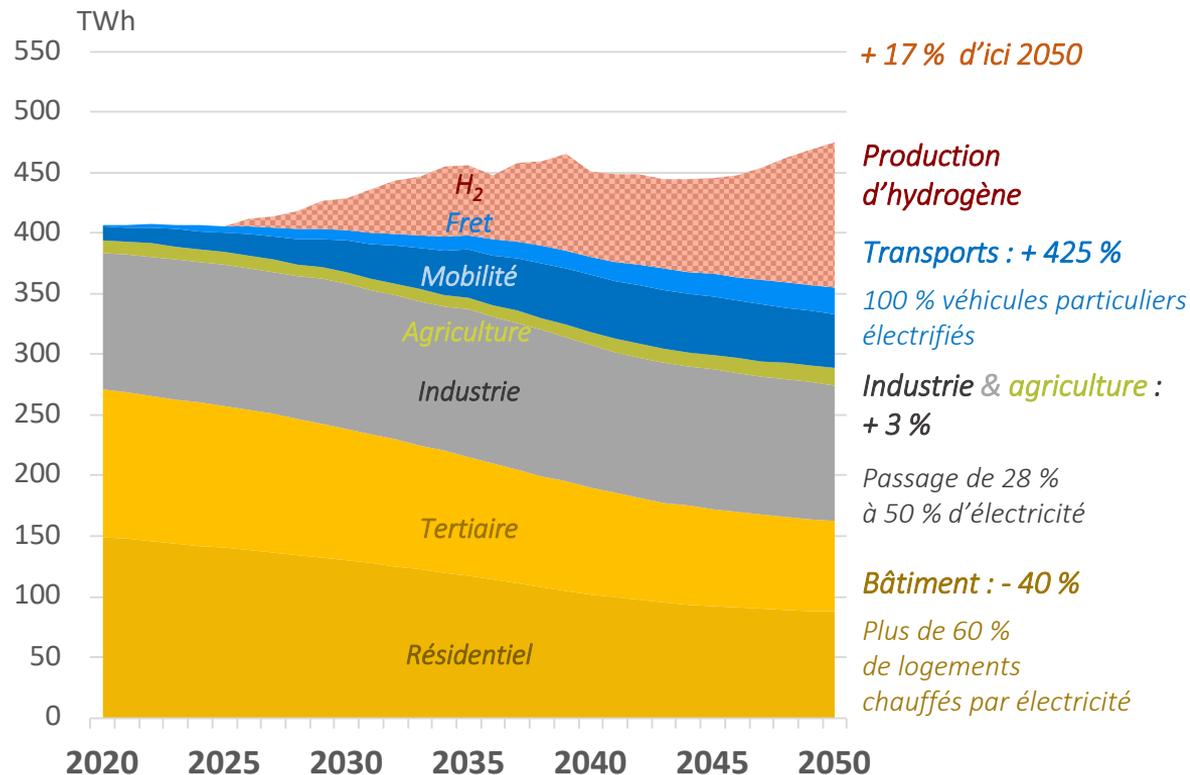
Centrale nucléaire de Zaporijjia, sous occupation militaire russe



Spumik/SIPA

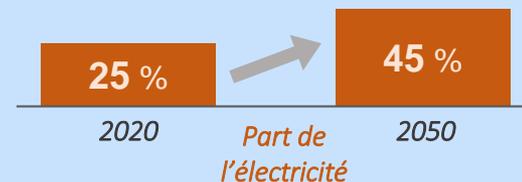
# Une trajectoire de demande électrique maîtrisée

## Évolution de la demande d'électricité

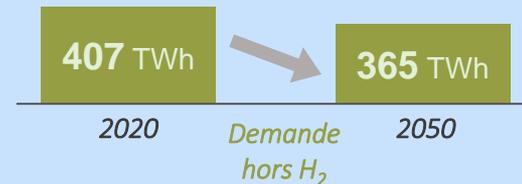


### Points clés

- Électrification des usages



- Maîtrise en énergie

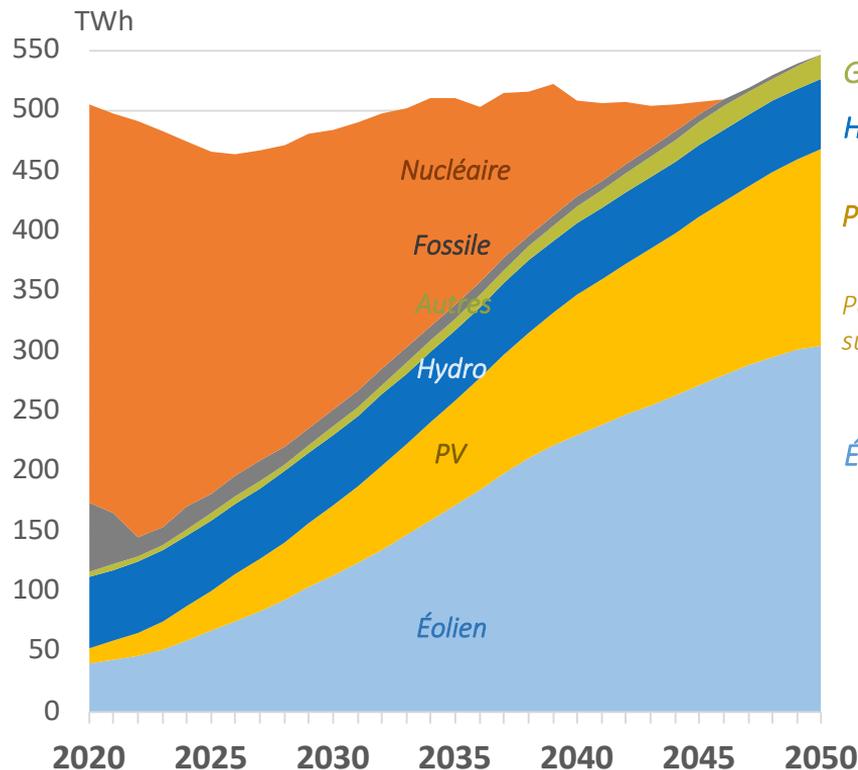


- Contrôle de la pointe



# Un déploiement des renouvelables sécurisé

## Évolution de la production d'électricité



Gaz renouvel. : 13 TWh

Hydraulique: 54 TWh

PV : 168 TWh

- 139 GW
- Pas besoin de nouvelles surfaces artificialisées

Éolien : 305 TWh

- 61 GW terrestre, 18 000 mâts
- 38 GW en mer

## Équilibre électrique

### Modélisation

Équilibrage horaire  
2020–2050



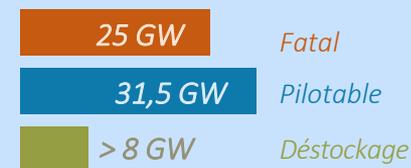
EOLES : 20 années météo



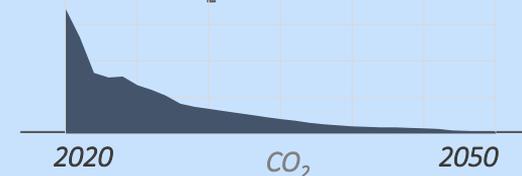
### Puissance

Maximum appelé < 63 GW

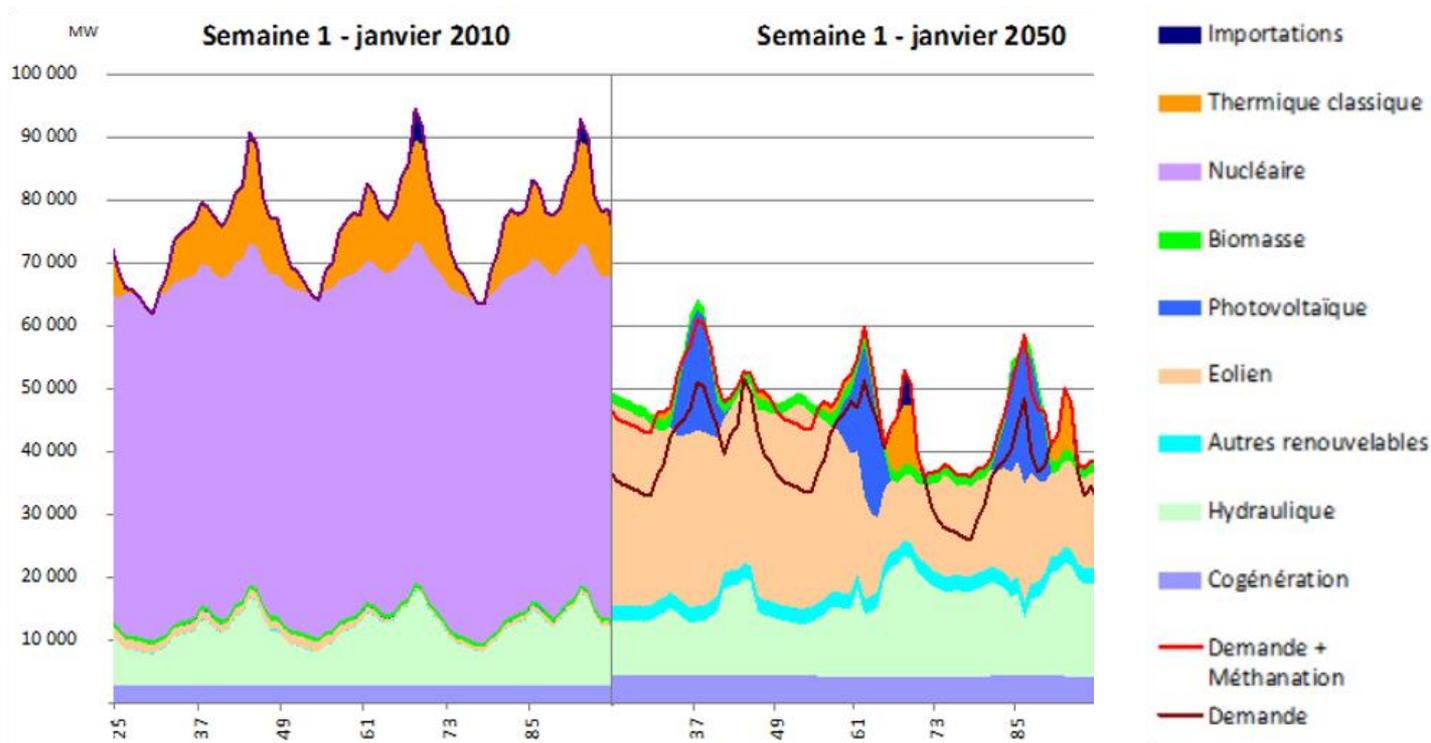
Réserve mobilisable > 64,5 GW



### Émissions CO<sub>2</sub> de l'électricité



Évolution d'une semaine hivernale type de production et de consommation électrique dans le scénario négaWatt 2022



- Ressource épuisant un stock (uranium)
- Risque intergénérationnel (matières / déchets)
- Risque territorial majeur (accident)
- Risque géopolitique (sécurité, prolifération)



*Une option de production décarbonée  
intrinsèquement moins soutenable  
et moins facilement déployable  
que les énergies renouvelables*

## 1 Séparation du nucléaire militaire et civil

*Dissociation structurelle et opérationnelle  
permettant la séparation démocratique des choix*

## 2 Pas de nouveaux réacteurs

*Ni EPR, ni nouvel EPR, ni SMR...*

## 3 Gestion du parc existant

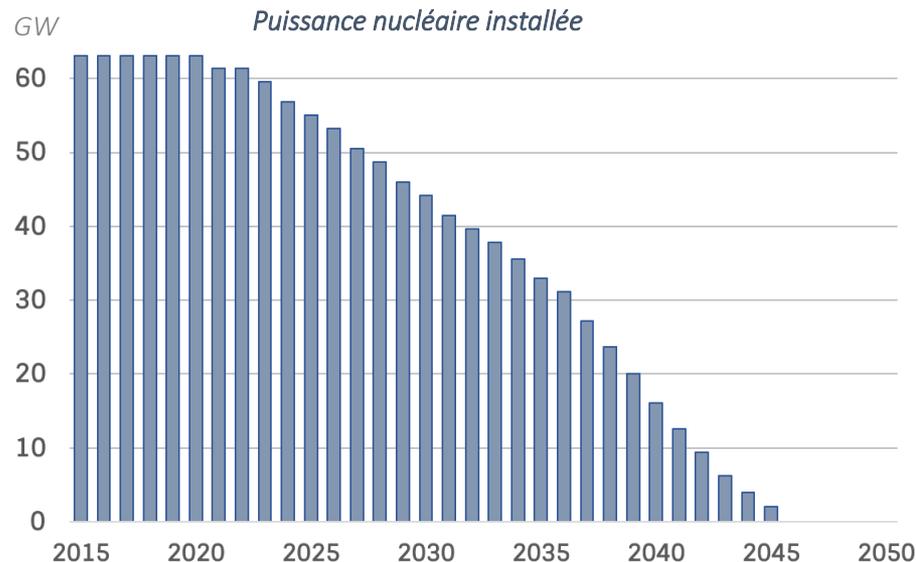
*Pas de pari post 50 ans*

*Lissage et flexibilité de la fermeture*

*Fermeture coordonnée des usines  
du combustible (amont et aval)*

*Minimisation des inventaires  
de déchets et matières sans emploi*

*Étalement des fermetures par site*





# 4.

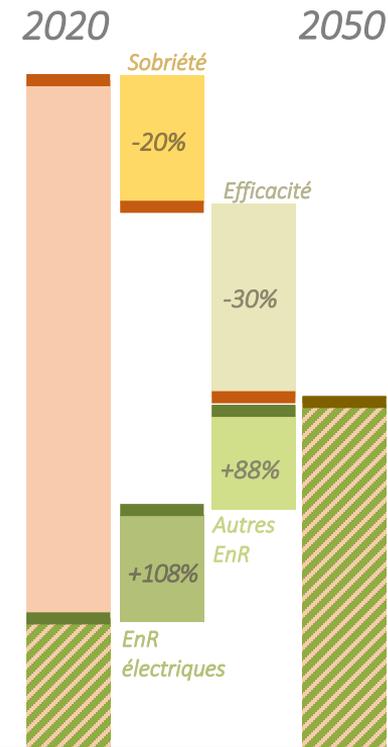
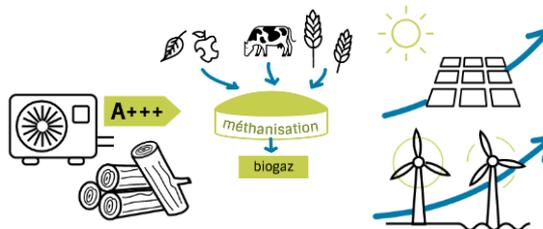
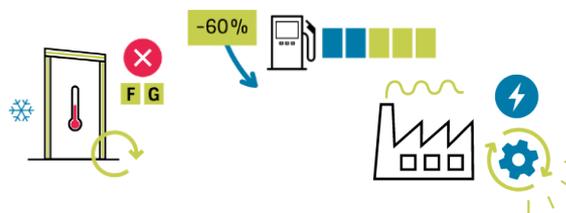
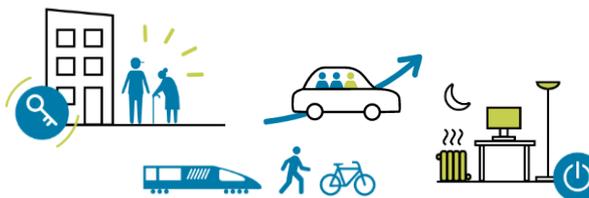
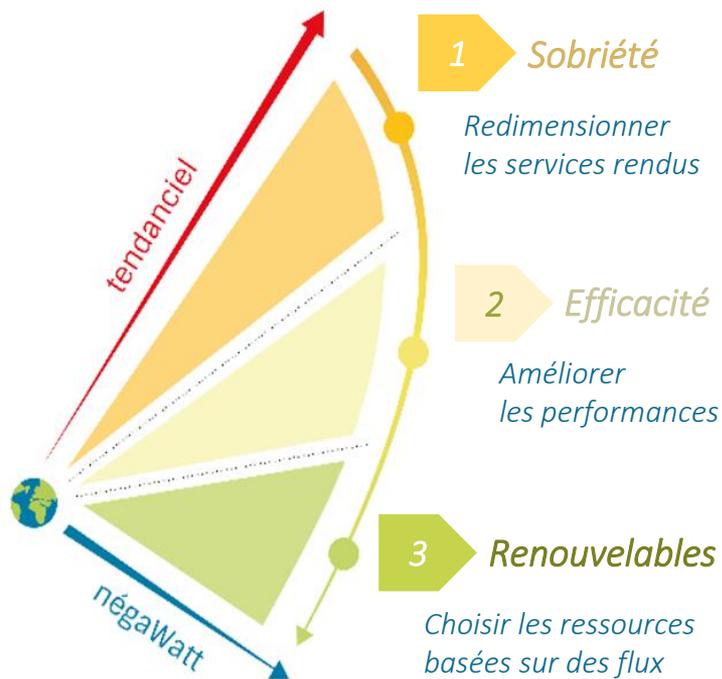
## *Le choix négaWatt*

---

- *Bilan global du scénario*
- *Cobénéfices et soutenabilité*
- *nW versus nouveau nucléaire*

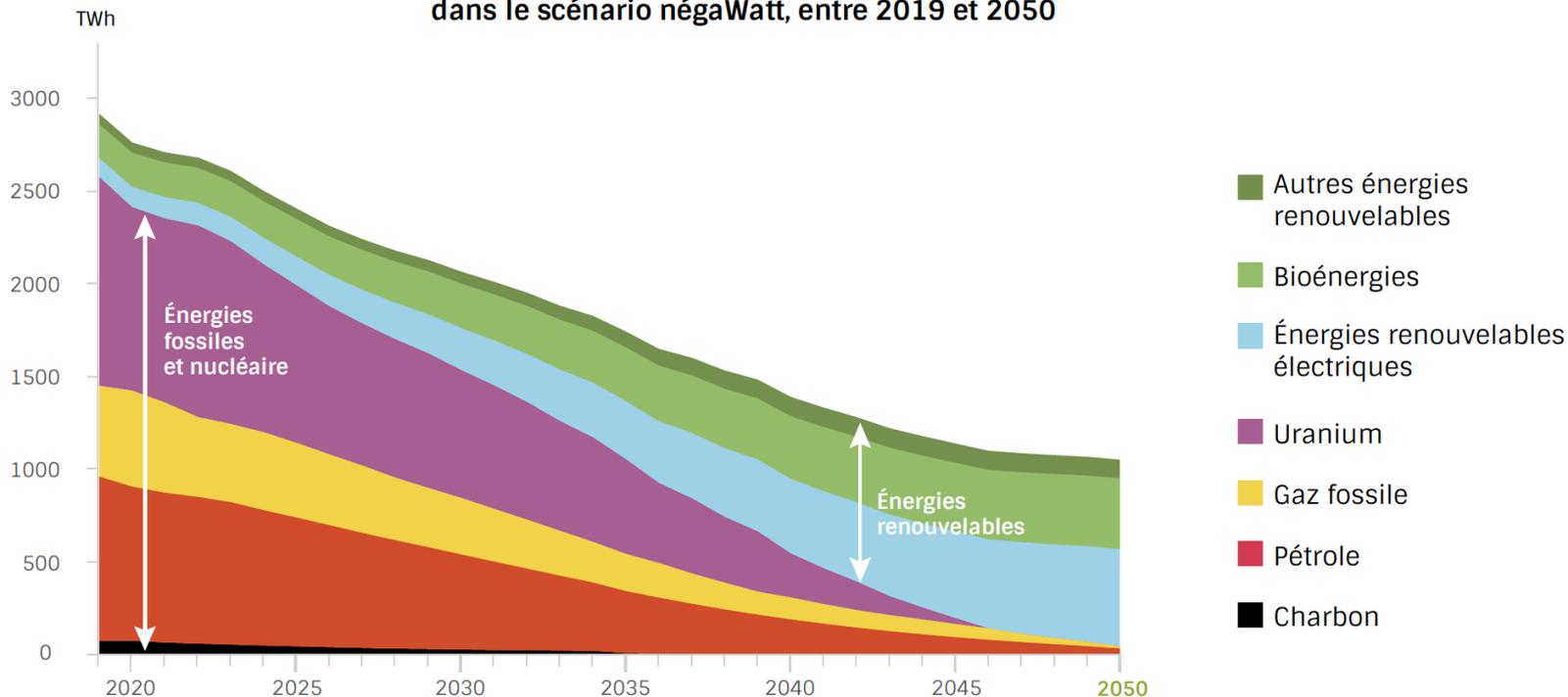
# Une action sur les usages, les performances et les ressources

## La "démarche négaWatt"



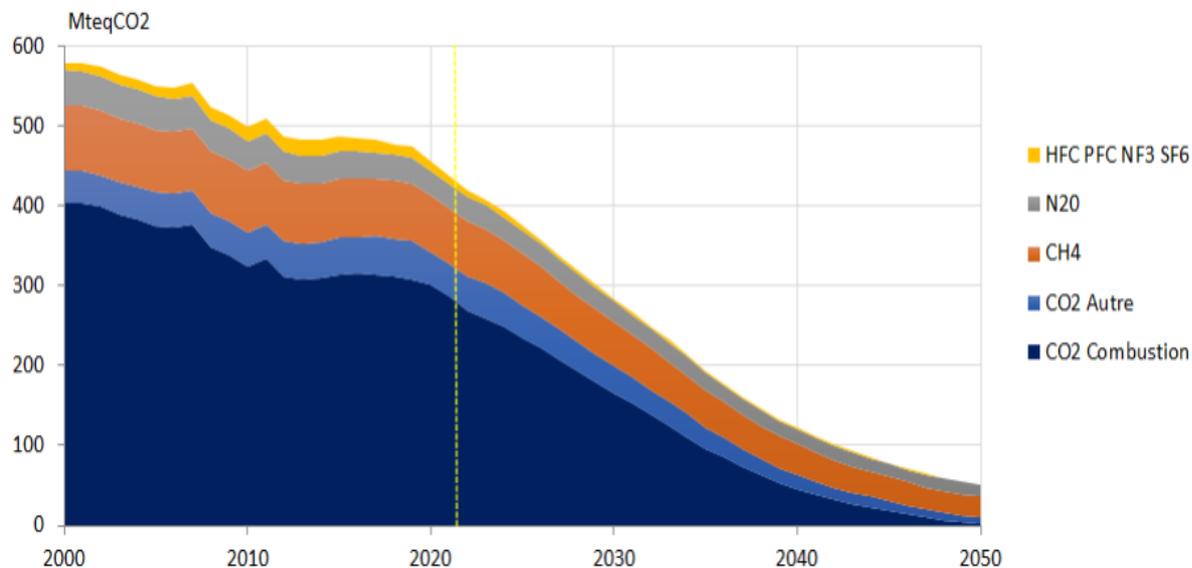
Consommation d'énergie, et part des renouvelables

### Évaluation de la consommation d'énergie primaire pour les usages énergétiques et les usages matières dans le scénario négaWatt, entre 2019 et 2050



## ↘ Une forte décarbonation permet la neutralité carbone

### Emissions de GES par gaz à effet de serre



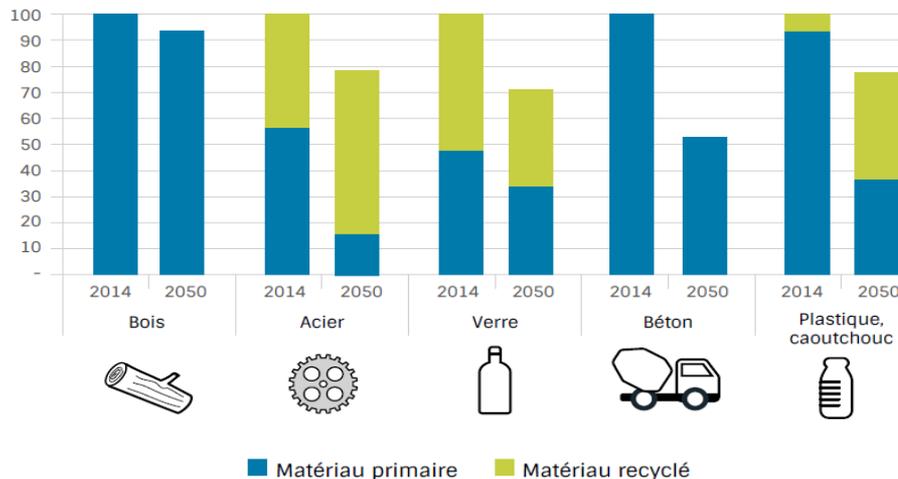
Neutralité  
climatique  
en 2050

Émissions dues à la combustion divisées par 20 entre 2019 et 2050  
+ émissions résiduelles dues aux process industriels, à l'agriculture, aux déchets  
Au total, les émissions passent de 474 Mt à 52 Mt soit un facteur 9

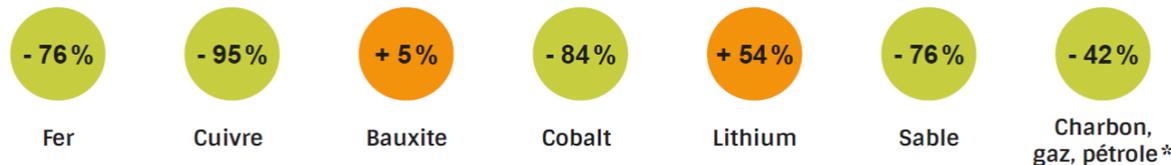


# Une consommation de matériaux en baisse

Evolution de la consommation de matériaux primaires et recyclés



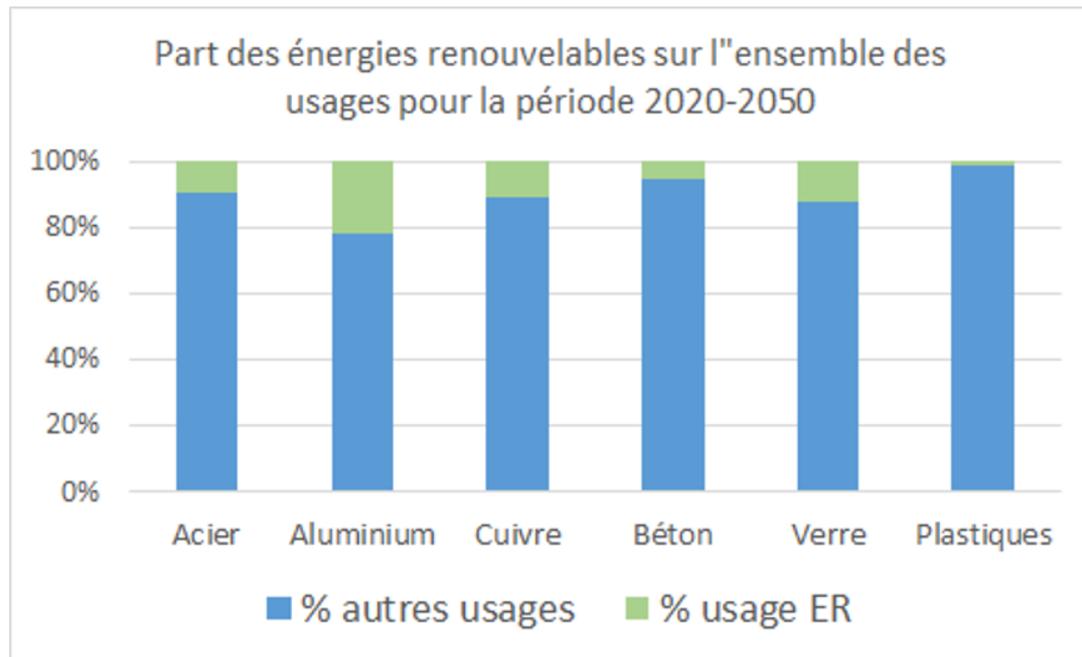
Évolution de la quantité de matières premières extraites annuellement pour les besoins de la population française



\* Usages non énergétiques

Avec l'hypothèse que les taux d'incorporation de matière recyclée dans le monde suivent une évolution identique à celle de la France

Poids des énergies renouvelables dans la consommation cumulée de matériaux dans le scénario négaWatt 2022



Contrairement à certaines idées reçues, un scénario 100% renouvelable, à savoir :

- Éolien PV, méthaniseurs
- Électrolyseurs et Power to Gas
- Adaptation des réseaux

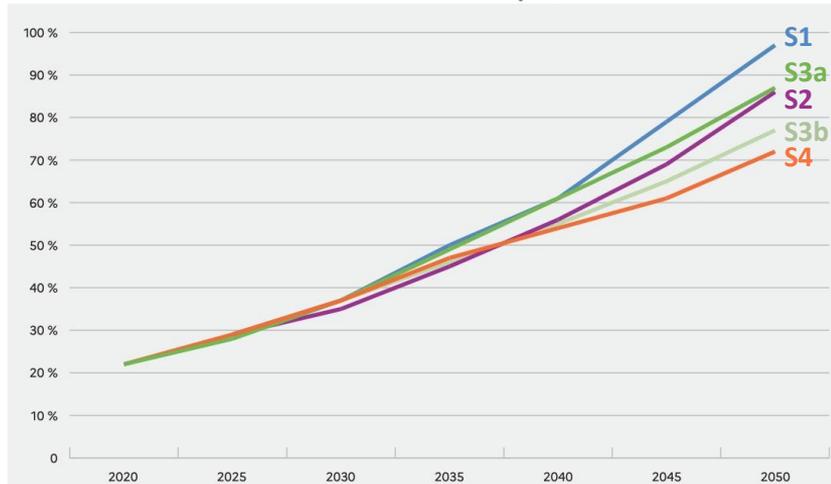
requiert moins de 15% par rapport aux besoins de matériaux usuels sur l'ensemble des usages.

Pour les terres rares, les renouvelables représentent :

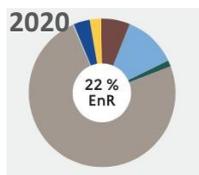
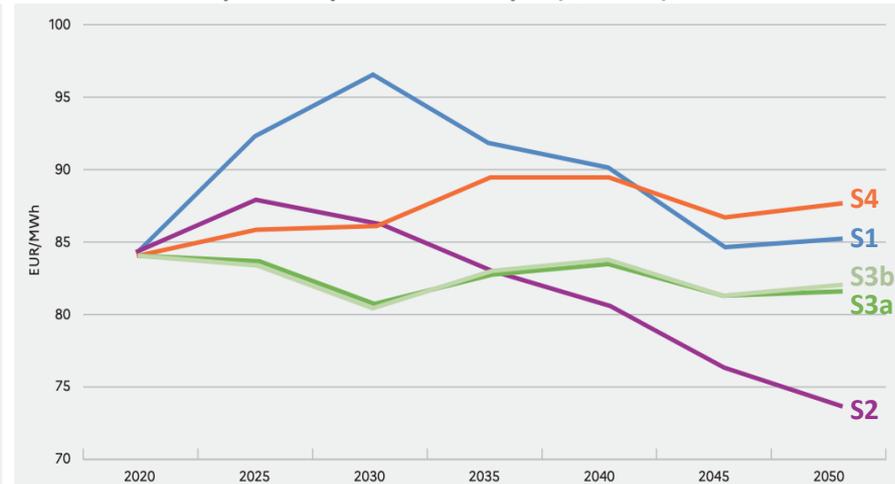
- 10% pour l'éolien
- 0% pour le PV au silicium

## Avantage économique aux scénarios 100 % renouvelables

### Part de renouvelables dans le mix électrique, 2020-2050

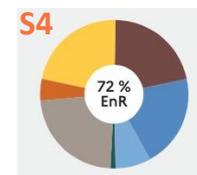
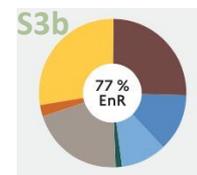
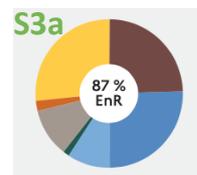
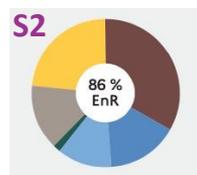
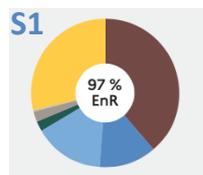


### Coût annuel complet du système électrique (€/MWh), 2020-2050

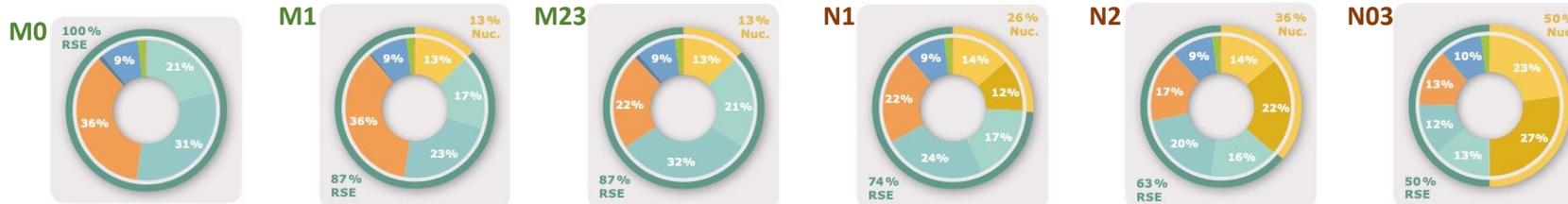


468 TWh

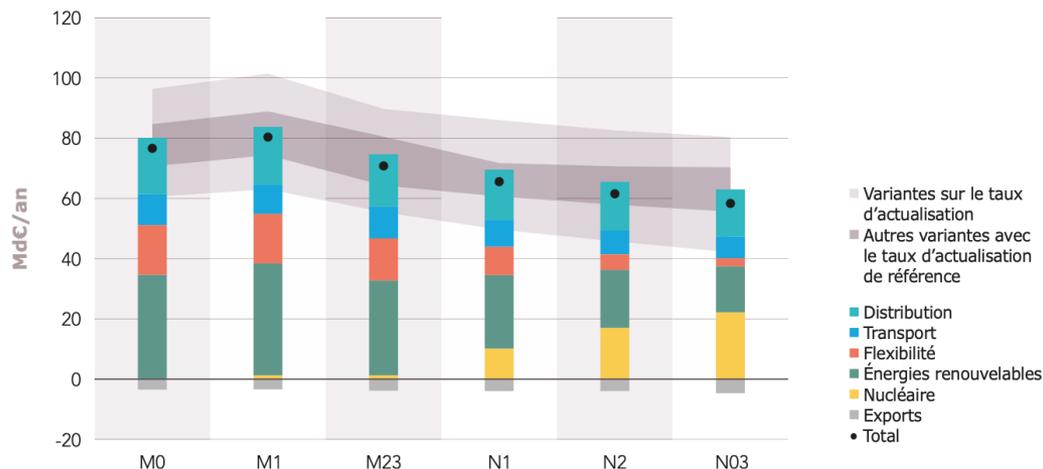
- Nucléaire
- Turbine gaz
- Thermique autre
- PV
- Éolien terrestre
- Éolien offshore
- Hydro
- Autres renouv.



## Faisabilité de scénarios 100 % renouvelables



## Proximité des coûts complets en regard des incertitudes



- Hypothèses conservatrices sur les renouvelables et leur progrès
- Hypothèses officielles EDF / Gouv. sur le nucléaire
- Hypothèses très favorables au nucléaire sur les conditions de financement
- Gain associé à un effort de sobriété au moins égal au différentiel sur le coût de production

## Rapports RTE et ADEME

- Des scénarios 100 % renouvelables sont possibles
- Ils sont conformes aux objectifs climatiques et de sécurité électrique
- Combinés à des options d'efficacité et de sobriété, ils réduisent l'empreinte environnementale
- Les scénarios avec et sans renouvelables présentent des coûts globalement proches, plus sensibles à de nombreux autres paramètres et incertitudes qu'à ce choix

### Emmanuel Macron

Président de la République, 2017- ...



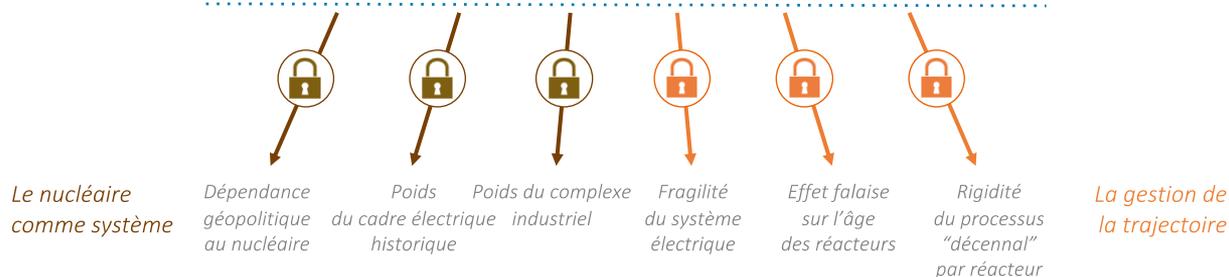
© Soazig de la Moissonnière

Ni 100% nucléaire ni 100% renouvelables...

“Aucun expert ne dit que de ces deux schémas sont réalistes, sérieux, possibles pour la nation”

Discours à Belfort, 10 février 2022

### Effets multiples de verrouillage



# ↘ Horizon(s) d'attente du programme EPR2...



## 1. Construction

30 ans



Aujourd'hui  
vu de ~1990

## 2. Exploitation

90 ans



Aujourd'hui  
vu de ~1930

## 3. Héritage

180 ans



Aujourd'hui  
vu de ~1840

2022  
Discours  
de Belfort

Mise en service  
du 6<sup>ème</sup> EPR2

Arrêt du  
6<sup>ème</sup> EPR2

Fin du démantèlement

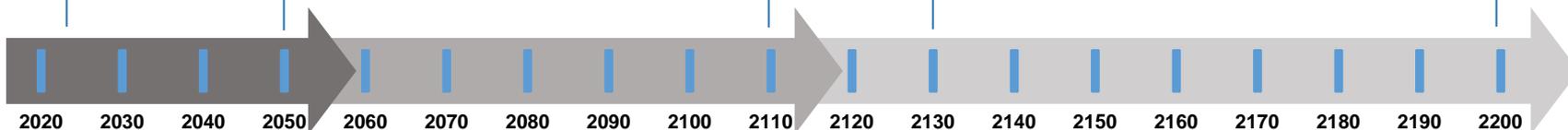
Fin de la mise  
en stockage

Construction

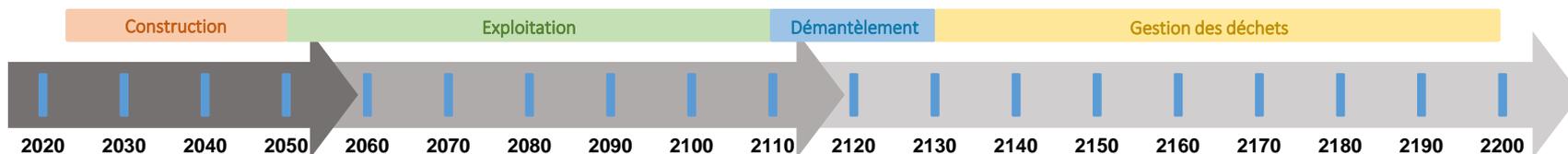
Exploitation

Démantèlement

Gestion des déchets



	Vu de  1990	Vu de  1930	Vu de  1840
<b>Technologie</b>	Avant... <i>internet les mobiles puis les smartphones les renouvelables compétitives le "smart grid"</i>	Avant... <i>le nucléaire civil les panneaux photovoltaïques</i>	Avant... <i>la découverte de la radioactivité la production d'électricité</i>
<b>Institutions</b>	Avant... <i>l'ouverture des marchés le changement de statut d'EDF la création de l'ASN la crise financière (2008) l'objectif 50 % pour le nucléaire</i>	Avant... <i>la 4<sup>ème</sup> République la création d'EDF l'Union Européenne</i>	Avant... <i>la 2<sup>ème</sup> République</i>
<b>Environnement</b>	Avant... <i>la tempête de 1999 la catastrophe de Fukushima la pandémie mondiale (Covid)</i>	Avant... <i>la notion de pic (Hubbert) le rapport Meadows la notion de limites planétaires</i>	Avant... <i>l'atteinte des pôles l'anthropocène</i>
<b>Géopolitique</b>	Avant... <i>le 11 septembre 2001 l'Accord de Paris la crise ukrainienne et l'occupation de Zaporijia</i>	Avant... <i>la Seconde Guerre mondiale la création de l'ONU la bombe atomique les chocs pétroliers</i>	Avant... <i>trois guerres sur le sol français et des changements de frontières</i>



### Scénario négaWatt 2022-2050

*Dimensionnement raisonnable,  
recours diversifié à des solutions  
diffuses et maîtrisables*

*Coûts compétitifs,  
assurés et  
orientés à la baisse*

*Réduction progressive des risques  
de sûreté et de sécurité  
Moins de matières sans emploi  
et de déchets en héritage*

*Réduction globale des impacts,  
nouveaux modes de développement local,  
et de coopération internationale*



### Scénario “programme 6 EPR”

*Développement exposé aux aléas  
de la prolongation de réacteurs  
et de la construction  
de nouveaux réacteurs*

*Coûts non compétitifs,  
incertains et  
orientés à la hausse*

*Exposition **pour plus d’un siècle**  
au risque sûreté et sécurité  
Accumulation croissante  
de matières et de déchets*

*Impacts incertains,  
pas de changement du cadre centralisé  
ou de la vision géopolitique*



## *Paysage des scénarios*

---



## *Conclusion*

---

→ De nombreuses ressources disponibles sur :

[www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)

*Synthèse du scénario*

*Rapport complet*

*Graphiques dynamiques*

*Replay de la présentation complète*

*Soutenez négaWatt*

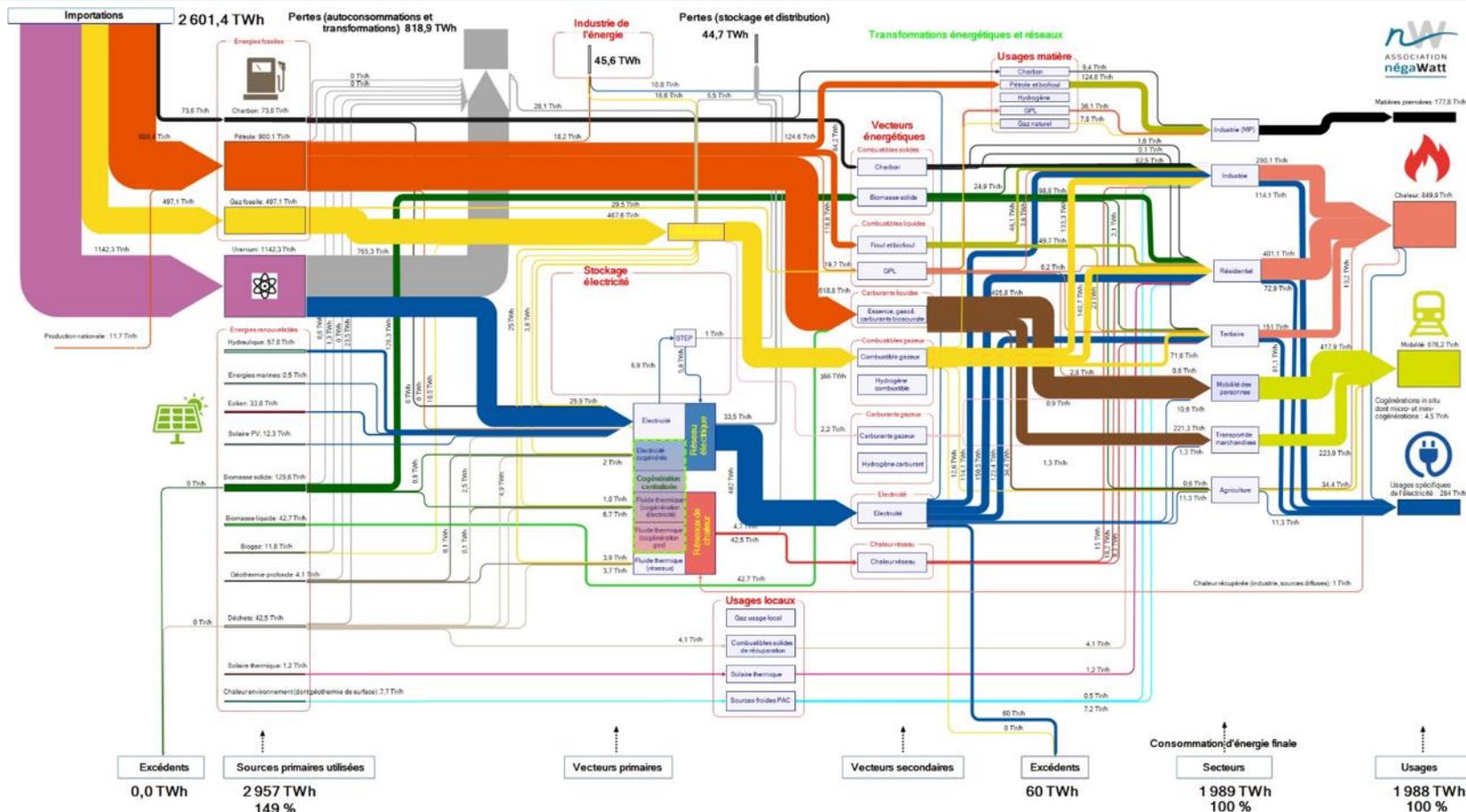
*Adhérez ou faites  
un don sur [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)*

→ Des réponses aux idées reçues sur la transition énergétique sur :

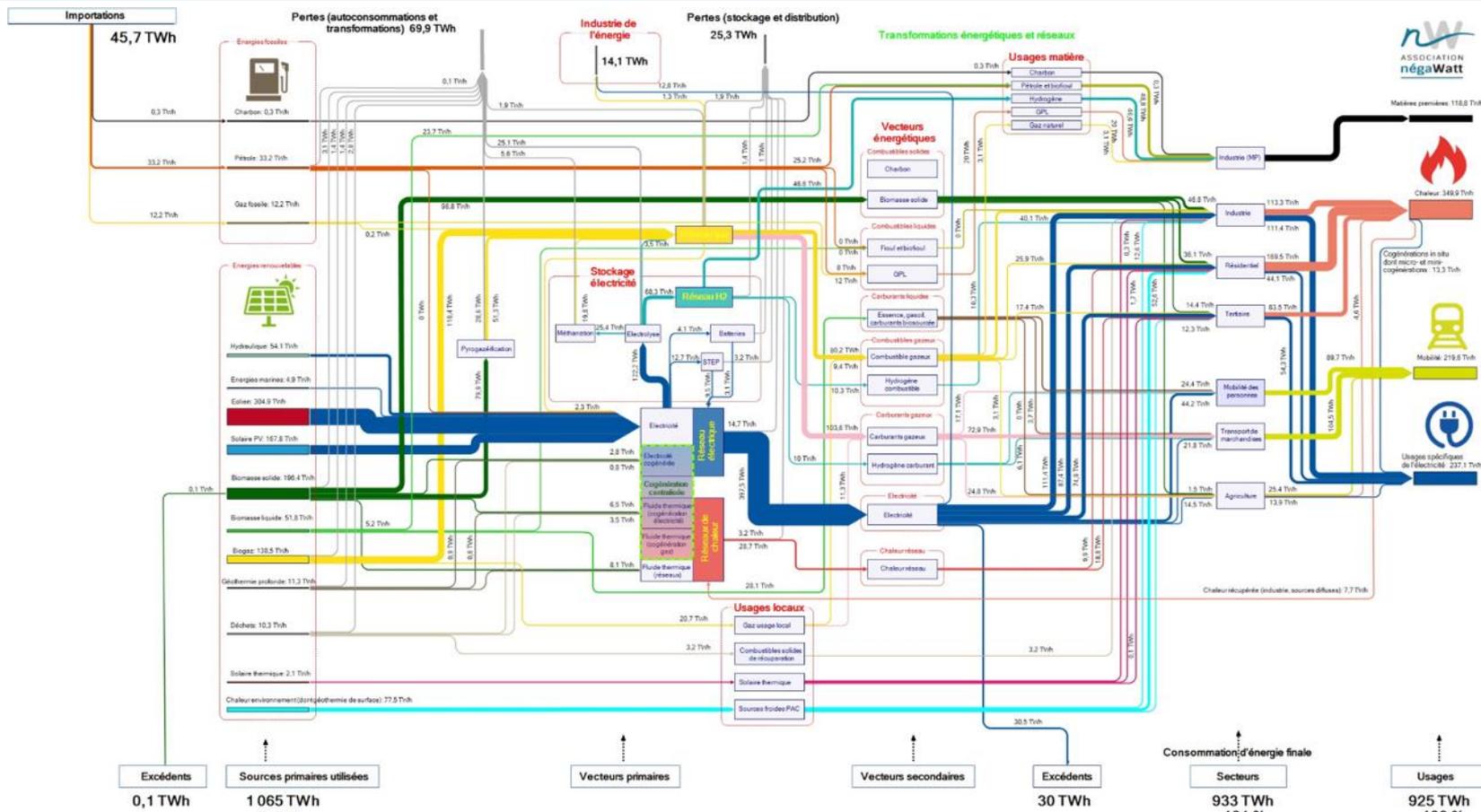


[www.decrypterlenergie.org](http://www.decrypterlenergie.org)

# Bilan énergie France 2019



# Bilan énergie France 2050





*Une association, créée en 2001  
par des professionnels de l'énergie*

**Mission :**

*Expertise et prospective énergétique*

*Plaidoyer à l'échelle nationale*

*15 salariés*

*Plusieurs dizaines de bénévoles actifs*

*~ 1500 adhérents*



*Un institut, créé en 2009*

*Filiale et outil opérationnel de  
l'association*

**Mission :**

*Accompagner les acteurs de terrain  
(collectivités, entreprises, etc.)  
dans la mise en œuvre de la transition*

*16 salariés*



*Une entreprise de l'ESS, créée en 2017*

*Filiale dédiée à la rénovation performante  
des maisons individuelles*

**Mission :**

*Former des groupements d'artisans*

*Accompagner les territoires*

*46 salariés*

*5 agences régionales*

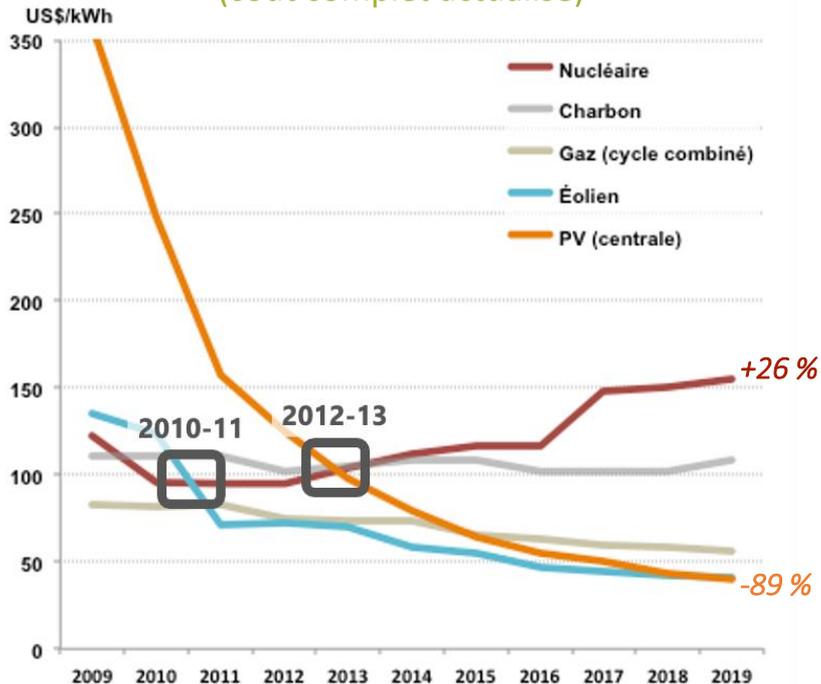


*Visions monde*

---

## ↘ Coût de production - état des lieux

Coût de production “sortie centrale”  
des projets mis sur le marché aux États-Unis  
(coût complet actualisé)



Source : Lazar, LCOE Analysis (2020)

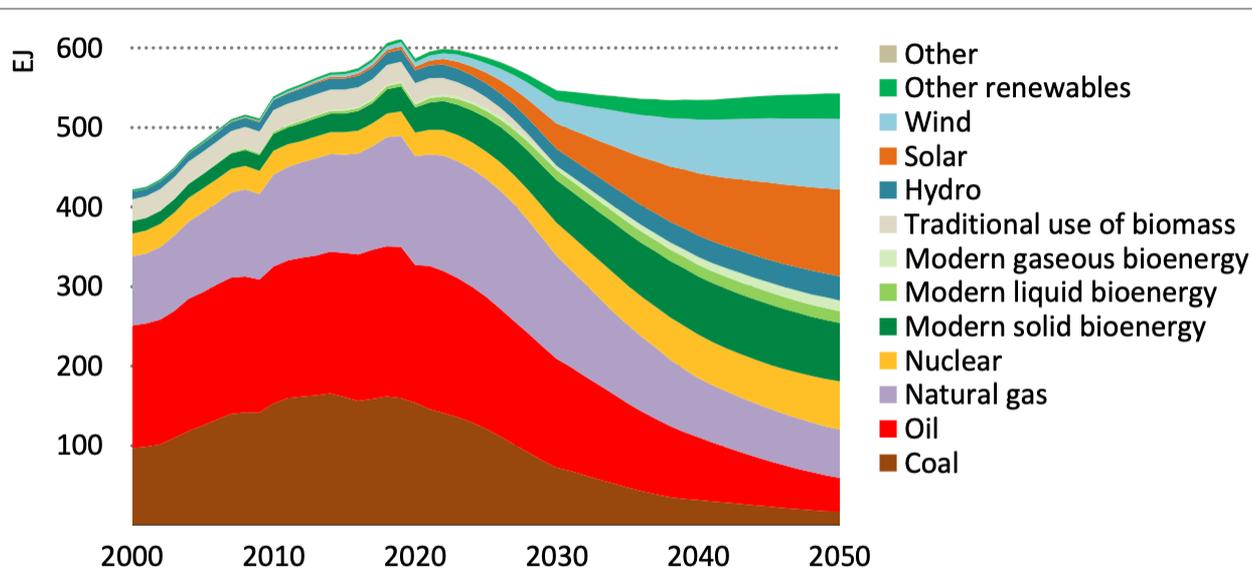
- *Dernier appel d'offre CRE :*
  - éolien (08/21) : **60,8 €/MWh**
  - PV (12/21) : **76,6 €/MWh**
- *Projet EPR à Hinkley Point : **120 €/MWh***
- *Une tendance qui va s'accroître avec la hausse des facteurs de charge des EnR variables*

# Options de réduction des émissions



Figure SPM.7: Overview of mitigation options and their estimated ranges of costs and potentials in 2030.

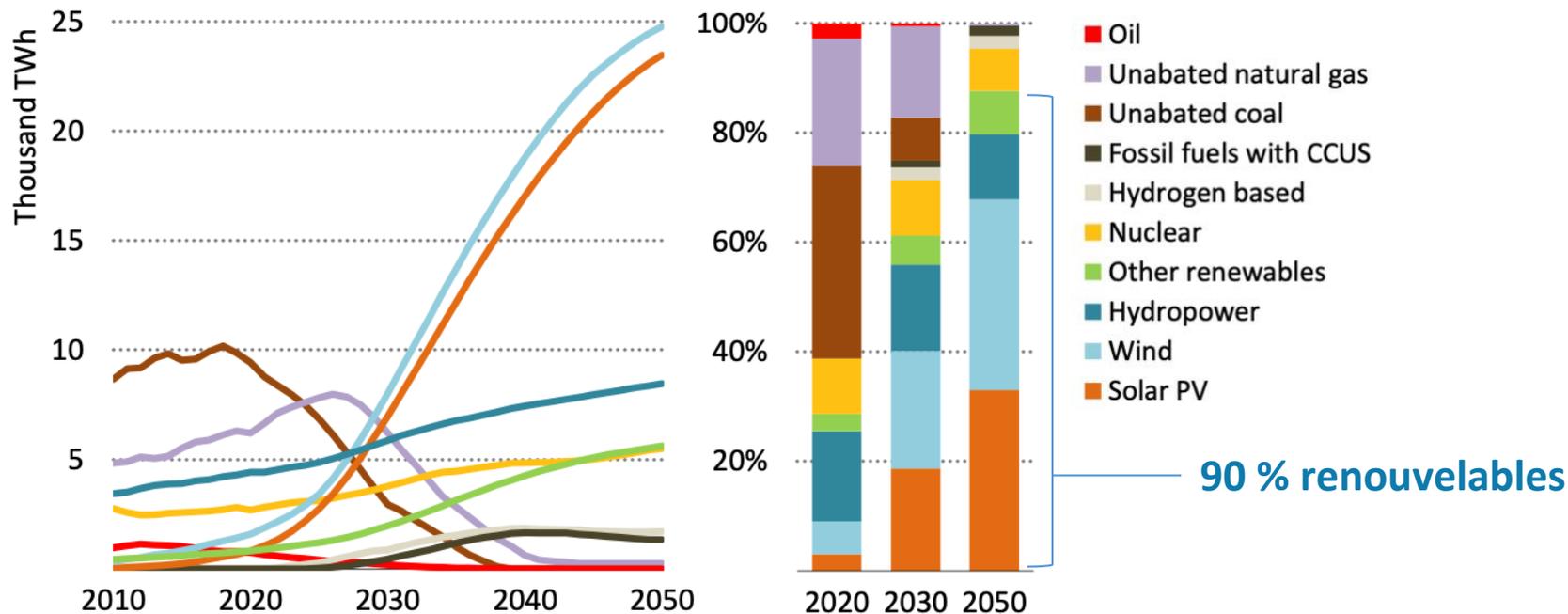
**Figure 2.5** ▶ Total energy supply in the NZE



IEA. All rights reserved.

**Renewables and nuclear power displace most fossil fuel use in the NZE, and the share of fossil fuels falls from 80% in 2020 to just over 20% in 2050**

Projection de la production mondiale d'électricité et de la part dans la production par filière à 2050





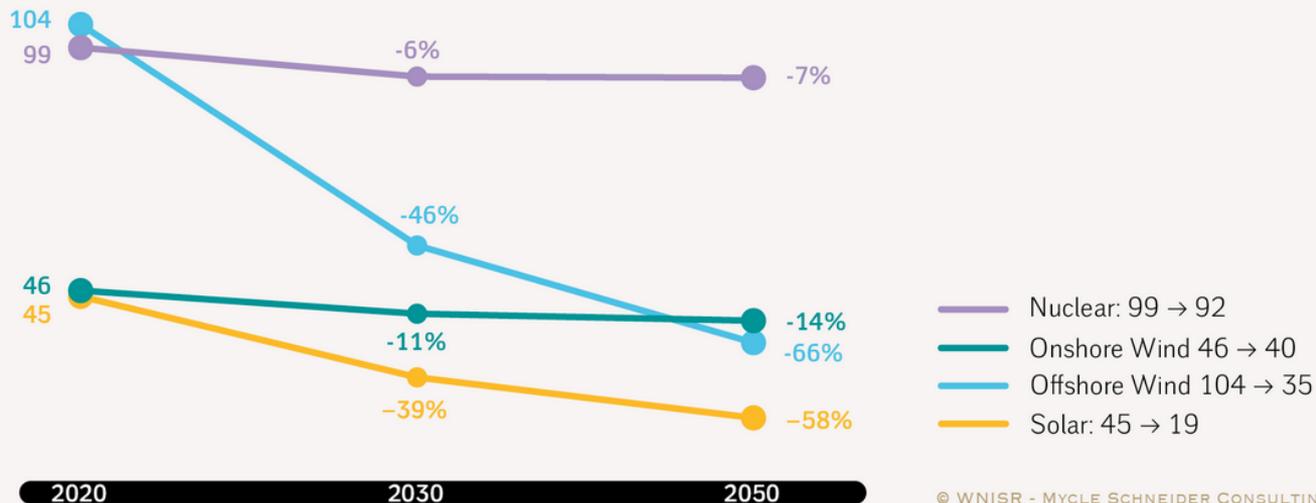
*Nucléaire / renouvelables*

---

### Évolution projetée des coûts de production de l'électricité d'origine nucléaire et renouvelable

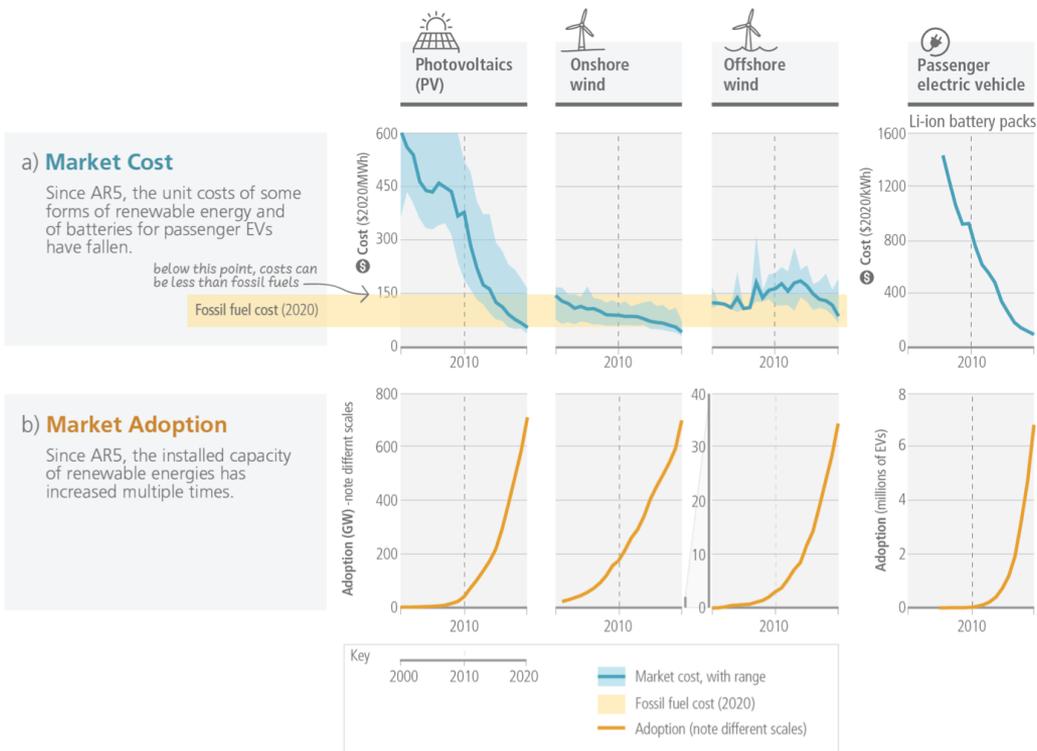
#### 2050 Forecasted Average Cost of Electricity from Nuclear and Renewables

in US\$/MWh



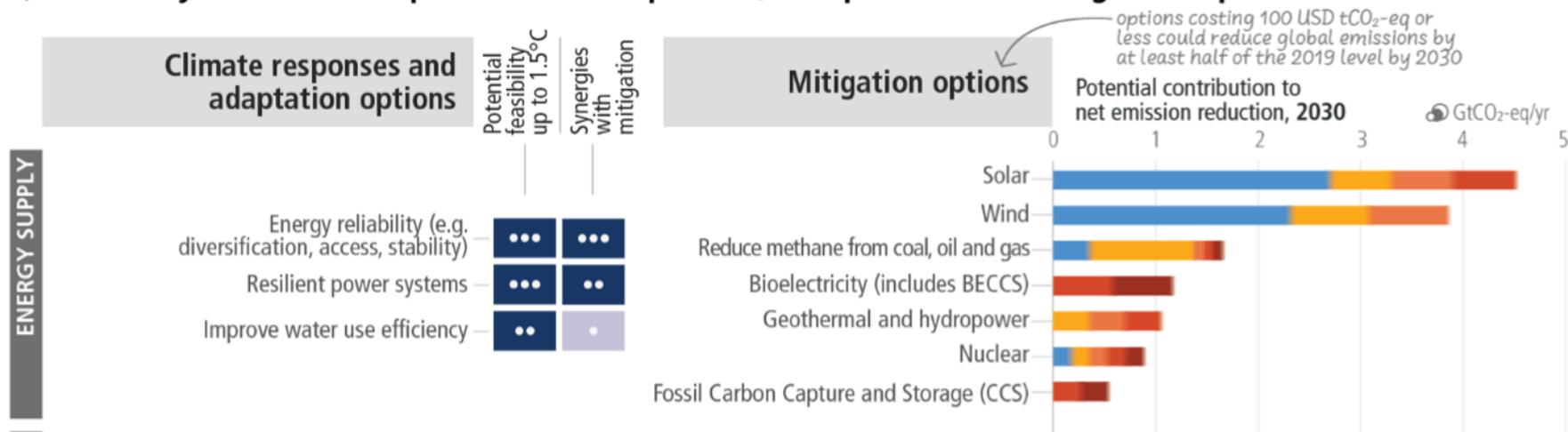
Source : Mycle Schneider Consulting, d'après AIE, *NEt Zero Roadmap* (2021)

## Renewable electricity generation is increasingly price-competitive and some sectors are electrifying



# There are multiple opportunities for scaling up climate action

## a) Feasibility of climate responses and adaptation, and potential of mitigation options in the near-term





# *Mix électrique*

---



*Visions France*

---



## Stratégie nationale bas-carbone

La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone

Horizon 2050

Basée sur scénario AMS  
"avec mesures supplémentaires"

Modélisation  
énergie - GES - air

Traduction  
en budgets carbone

Mars 2020



## Futurs énergétiques 2050

Horizon 2050-2060+

Modélisation  
du système électrique  
cohérente avec SNBC

6 scénarios offre  
3 trajectoires demande  
(et 4 variantes)

Sécurité électrique

Analyse multicritères  
économie, matières...

Octobre 2021



## Scénario négaWatt 2022

La transition énergétique  
au cœur d'une transition sociétale

Horizon 2050+

Modélisation  
sectorielle  
énergie,  
matières premières,  
usages biomasse  
Périmètre domestique  
et empreinte

Analyse multicritères  
emplois, empreinte,  
cobénéfices...

Octobre 2021



## TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT  
AGIR POUR LE CLIMAT

Horizon 2050

4 scénarios  
Cadrage commun

Modélisations  
sectorielles

+

Outil intégrateur  
énergie, GES, matières, sols

Analyse multicritères  
économie, empreinte,  
robustesse...

Novembre 2021



Climat, crises:

Le plan de transformation  
de l'économie française



Horizon 2050 ?

~ 15 plans sectoriels  
secteurs "usages",  
"services", "amont"

Chantiers transverses

emploi, finance,  
bouclage énergétique,  
bouclage matières,  
villes et territoires

Février 2022

## > RTE : scénarios électriques

RTE conso	RTE mix production					
Sobriété	Sans nouveau nucléaire			Avec nouveau nucléaire		
Référence	M0	M1	M23	N1	N2	N03
Réindustrialisation profonde	100% EnR en 2050	EnR diffuses	EnR grands parcs	8 EPR2	14 EPR2	14 EPR2 + SMR

## > ADEME et négaWatt : scénarios énergétiques

négaWatt	ADEME				
SnW 2022	S1	S2	S3EnR	S3Nuc	S4
Scénario négaWatt 2022-2050 + Scénario négaMat + Scénario Afterres	Génération frugale	Coopération territoriale	Technologies vertes orienté renouvelables	Technologies vertes orienté nucléaire	Pari réparateur



## S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Villes moyennes  
et zones rurales

Frugalité contrainte

Rénovation massive

Localisme

Nouveaux indicateurs  
de prospérité

3x moins de viande



## S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Coopérations  
entre territoires

Économie du partage

Modes de vie  
soutenables

Réindustrialisation  
ciblée

Fiscalité  
environnementale

Gouvernance  
ouverte

Mobilité maîtrisée



## S3 TECHNOLOGIES VERTES

Hydrogène

Métropoles

Déconstruction / reconstruction

Technologies  
de décarbonation

Régulation minimale

Consumérisme  
vert



## S4 PARI RÉPARATEUR

Captage du CO<sub>2</sub>  
dans l'air

Agriculture  
intensive

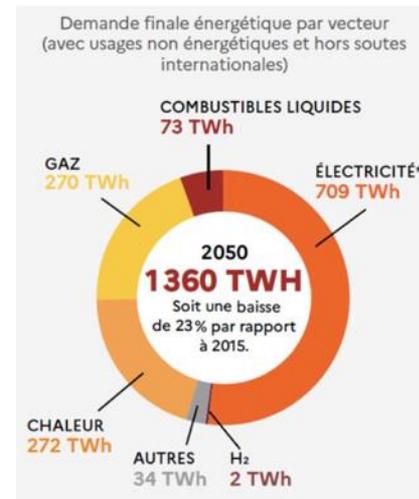
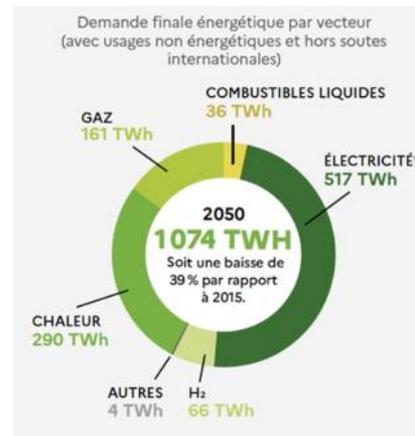
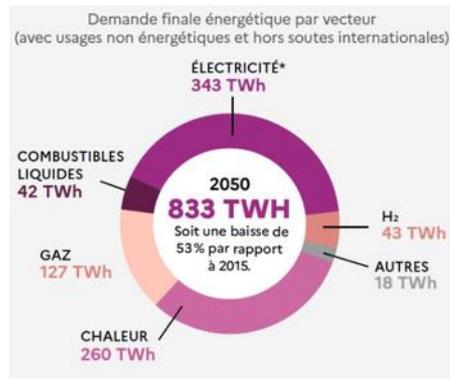
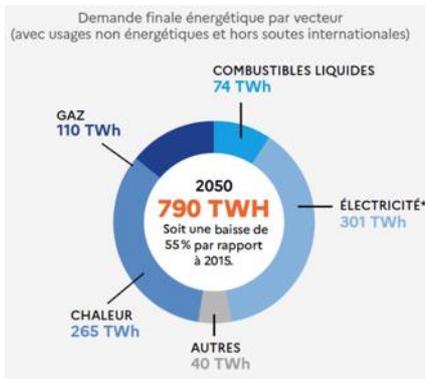
Étalement urbain

Consommation  
de masse

Économie  
mondialisée

Technologies  
incertaines

Intelligence  
artificielle





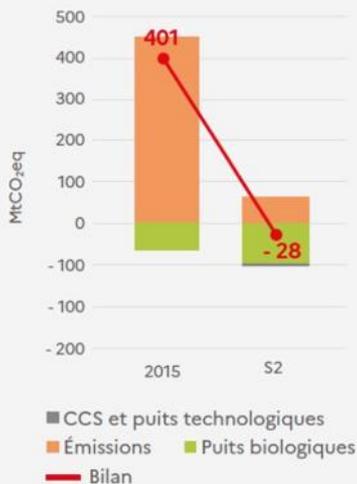
## S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



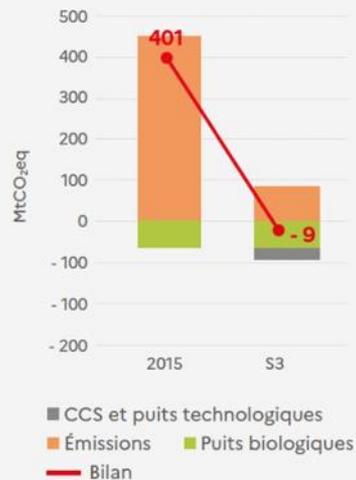
## S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



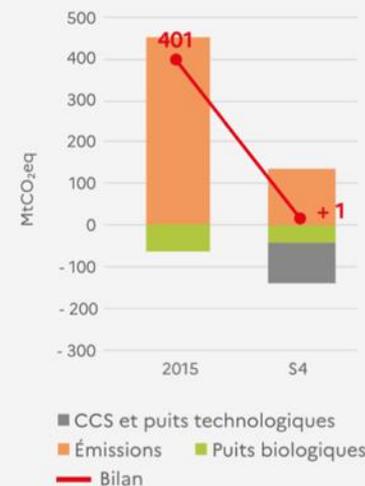
## S3 TECHNOLOGIES VERTES

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



## S4 PARI RÉPARATEUR

Bilan des émissions et des puits de CO<sub>2</sub> en 2015 et 2050



- Une réduction de 20% à 50% de la consommation d'énergie finale

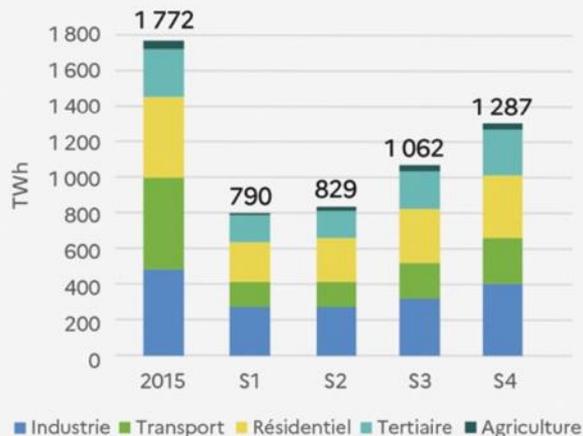
- Une part de 70% à 90% d'énergies renouvelables

- Part croissante de l'électricité mais pas nécessairement en valeur absolue

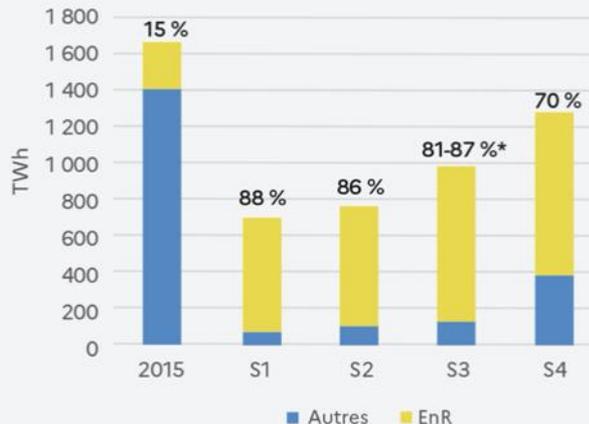
- Rôle des renouvelables hors réseau

- Talon gaz décarboné, limitation du potentiel biocarburants

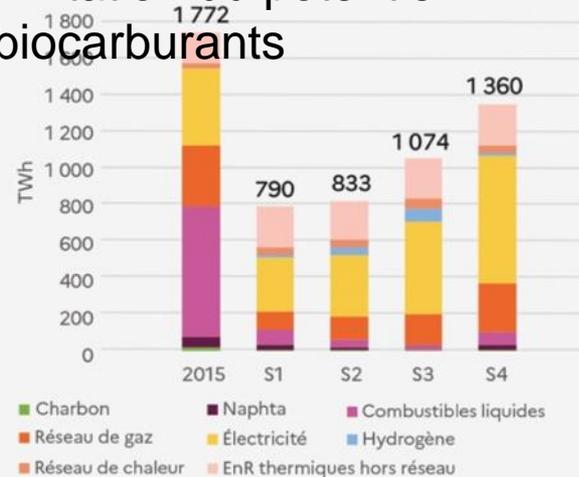
Consommation finale d'énergie par secteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors sources internationales)



Consommation d'énergie et part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2015 et 2050



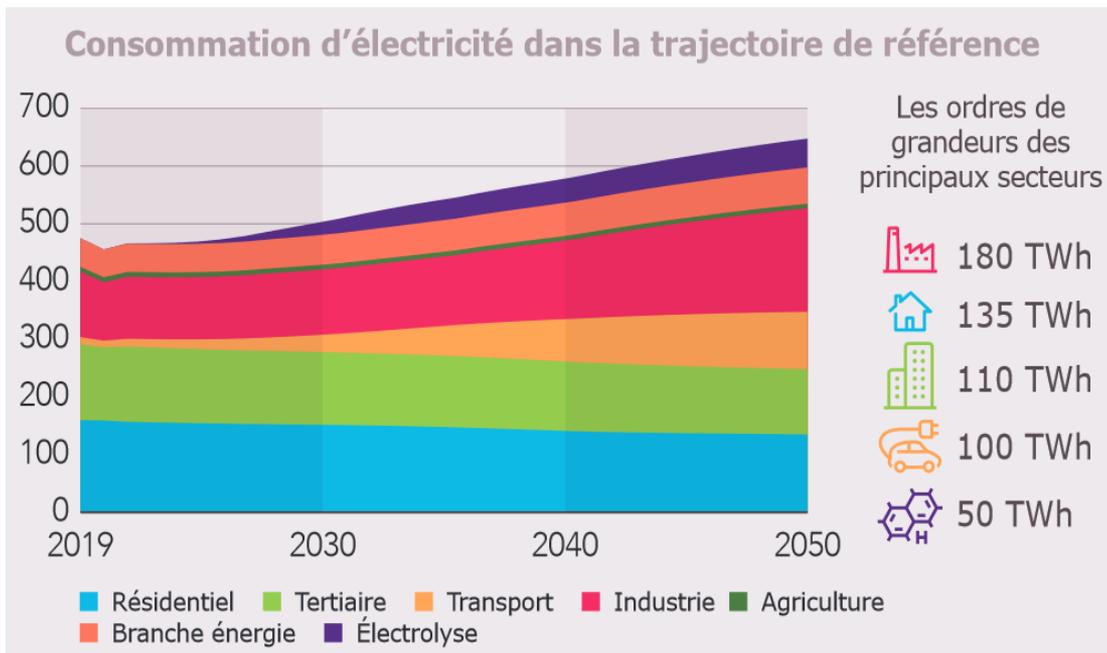
Demande finale énergétique par vecteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors sources internationales)



# LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION À L'HORIZON 2050

Consommation finale d'électricité par secteur :

- Industrie
- Résidentiel
- Tertiaire
- Transport
- Hydrogène



	NIVEAU 2050	PRINCIPALES ÉVOLUTIONS
Référence	<b>645 TWh</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li> 180 TWh</li> <li> 134 TWh</li> <li> 113 TWh</li> <li> 99 TWh</li> <li> 50 TWh</li> </ul>
Sobriété	<b>555 TWh</b> (-90 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> <li> 160 TWh (-20 TWh)</li> <li> 111 TWh (-23 TWh)</li> <li> 95 TWh (-18 TWh)</li> <li> 77 TWh (-22 TWh)</li> <li> 47 TWh (-3 TWh)</li> </ul>
Réindustrialisation profonde	<b>752 TWh</b> (+107 TWh)	<ul style="list-style-type: none"> <li> 239 TWh (+59 TWh)</li> <li> 134 TWh (0 TWh)</li> <li> 115 TWh (+2 TWh)</li> <li> 99 TWh (0 TWh)</li> <li> 87 TWh (+37 TWh)</li> </ul>

## LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050

Filières : Flexibilités de la demande (hors V2G) Nouveau thermique décarboné Véhicule-to-grid Batteries

**NIVEAU 2050**  
(par rapport à la référence)

**645 TWh**

**555 TWh**  
(-90 TWh)

**752 TWh**  
(+107 TWh)

## LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION

	NARRATIF	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050	
		Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire		
<b>M0</b> 100% EnR en 2050	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.	100% EnR	~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 29 GW 26 GW
<b>M1</b> Répartition diffuse	Développement très important des énergies renouvelables réparties de manière diffuse sur le territoire national et en grande partie porté par la filière photovoltaïque. Cet essor soutient une mobilisation forte des acteurs locaux participatifs et des collectivités locales.	87% EnR, 13% Nuc.	~ 214 GW (soit x22)	~ 59 GW (soit x3,5)	~ 45 GW	16 GW	/	17 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 21 GW
<b>M23</b> EnR grands parcs	Développement très important de toutes les filières renouvelables, porté notamment par l'installation de grands parcs éoliens sur terre et en mer. Logique d'optimisation économique et ciblage sur les technologies et les zones bénéficiant de meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.	87% EnR, 13% Nuc.	~ 125 GW (soit x12)	~ 72 GW (soit x4)	~ 60 GW	16 GW	/	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 20 GW 13 GW

	NARRATIF	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050	
		Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire		
<b>N1</b> EnR + nouveau nucléaire 1	Lancement d'un programme de construction de nouveaux réacteurs, développés par paire sur des sites existants tous les 5 ans à partir de 2035. Développement des énergies renouvelables à un rythme soutenu afin de compenser le déclassement des réacteurs de deuxième génération.	74% EnR, 26% Nuc.	~ 118 GW (soit x11)	~ 58 GW (soit x3,3)	~ 45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 11 GW 9 GW
<b>N2</b> EnR + nouveau nucléaire 2	Lancement d'un programme plus rapide de construction de nouveaux réacteurs (une paire tous les 3 ans) à partir de 2035 avec montée en charge progressive. Le développement des énergies renouvelables se poursuit mais moins rapidement que dans les scénarios N1 et M.	63% EnR, 36% Nuc.	~ 90 GW (soit x8,5)	~ 52 GW (soit x2,9)	~ 36 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)	15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 5 GW 2 GW
<b>N03</b> EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR)	50% EnR, 50% Nuc.	~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)	13 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 1 GW

### Hypothèses communes

Hydraulique  
~22 GW

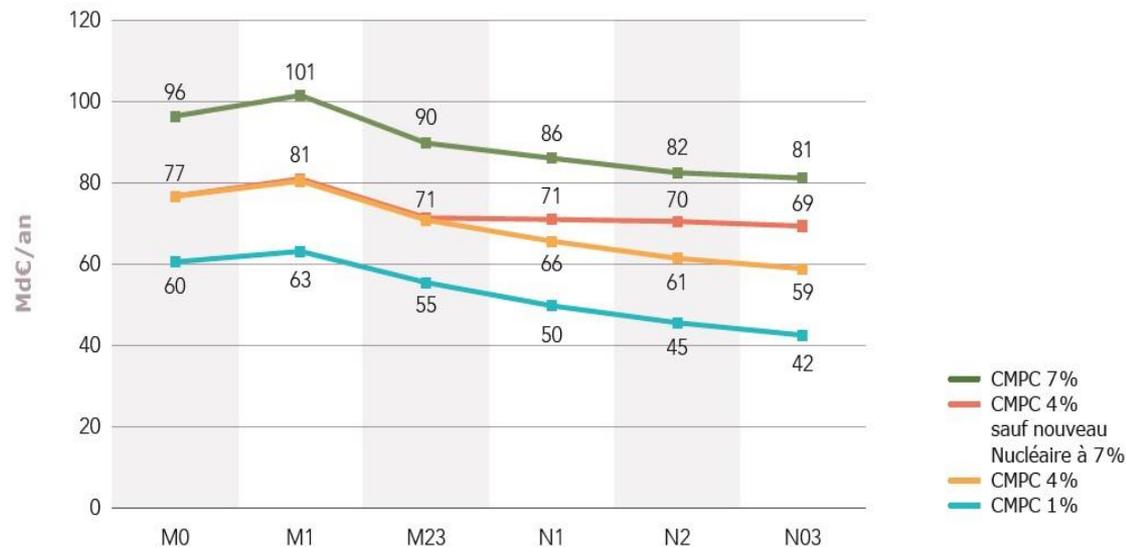
Énergies marines  
Entre 0 et 3 GW

Bioénergies  
~2 GW

Imports  
39 GW

STEP  
8 GW

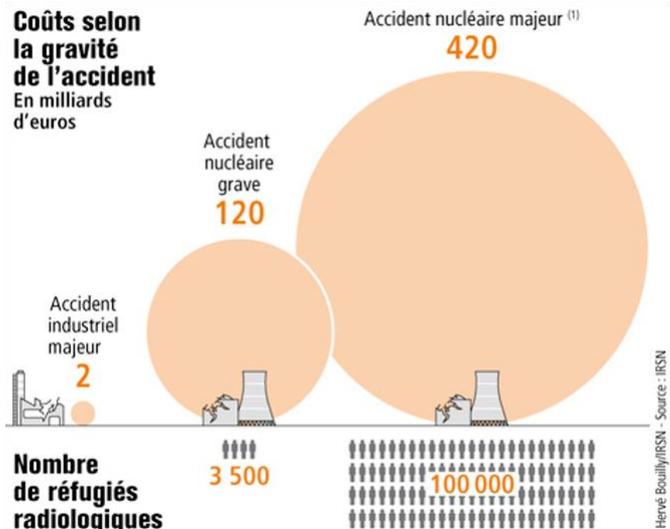
- Les énergies renouvelables constituent au moins 70% du mix électrique
- Avec un taux de rémunération du capital réaliste (4% pour les EnR et 7% pour le nucléaire), le coût d'un mix 100% EnR est équivalent à celui d'un mix avec nucléaire



- Les trajectoires de sobriété coûtent moins cher au système global

# Autres coûts - risques spécifiques

**Coûts selon la gravité de l'accident**  
En milliards d'euros

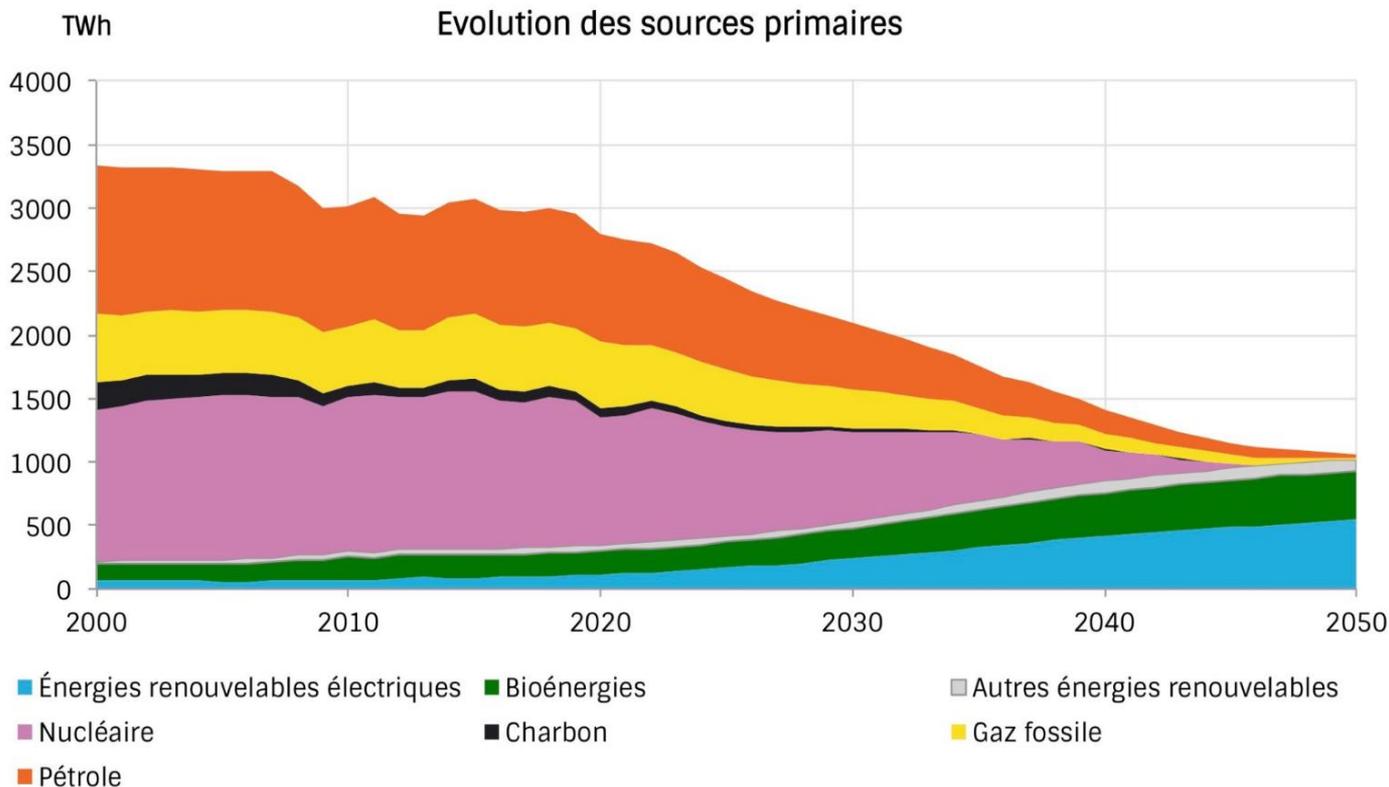


**120 milliards d'euros en cas d'accident nucléaire grave (1)**

Répartition du coût en milliards d'euros



(1) Fusion du cœur d'un réacteur de 900 MWe, avec rejets contrôlés pour l'accident grave et rejets massifs pour l'accident majeur.  
(2) Décontamination, démantèlement, électricité non produite. (3) Coût de santé, pertes agricoles.





## *Choix politique*

---

## “La France a besoin de sortir de la double dépendance au pétrole et au nucléaire”

Débat télévisé, 2 mai 2012



**François Hollande**

Président de la République, 2012-2017

© DILA-La Documentation française.  
Photo Raymond Depardon

- 2012** *Introduction de l'objectif de réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % d'ici 2025*
- 2015** *Adoption de l'objectif de 50 % de nucléaire en 2025 dans la loi*
- 2017** *Plan stratégique de fermeture de 14 réacteurs d'ici 2035 impliquant l'extension de durée de vie à 50 ans ou plus de l'essentiel des 44 autres*
- 2019** *L'échéance d'atteinte des 50 % repoussée à 2035 par une nouvelle loi*
- 2020** *Fermeture de deux réacteurs (Fessenheim)*
- 2022** *Politique de prolongation de tous les réacteurs à 60 ans sauf empêchement pour raisons de sûreté  
Annonce d'un programme de 6 + 8 nouveaux réacteurs EPR2*

## “L'avenir énergétique et écologique de la France passe par le nucléaire”

Discours au Creusot, 8 décembre 2020

**Emmanuel Macron**  
Président de la République, 2017- ...



© Soazig de la Moissonnière

- Une situation et une évolution en dissonance croissante avec les tendances observées en termes de dynamiques des énergies renouvelables et nucléaire
- Des décisions visant en priorité à prolonger l'option nucléaire, annoncées sans débat, qui sont la manifestation d'un verrouillage aux origines multiples

### Effets multiples de verrouillage

*Le nucléaire  
comme système*

*Dépendance  
géopolitique  
au nucléaire*

*Poids  
du cadre électrique  
historique*

*Poids du complexe  
industriel*

*Fragilité  
du système  
électrique*

*Effet falaise  
sur l'âge  
des réacteurs*

*Rigidité  
du processus  
"décennal"  
par réacteur*

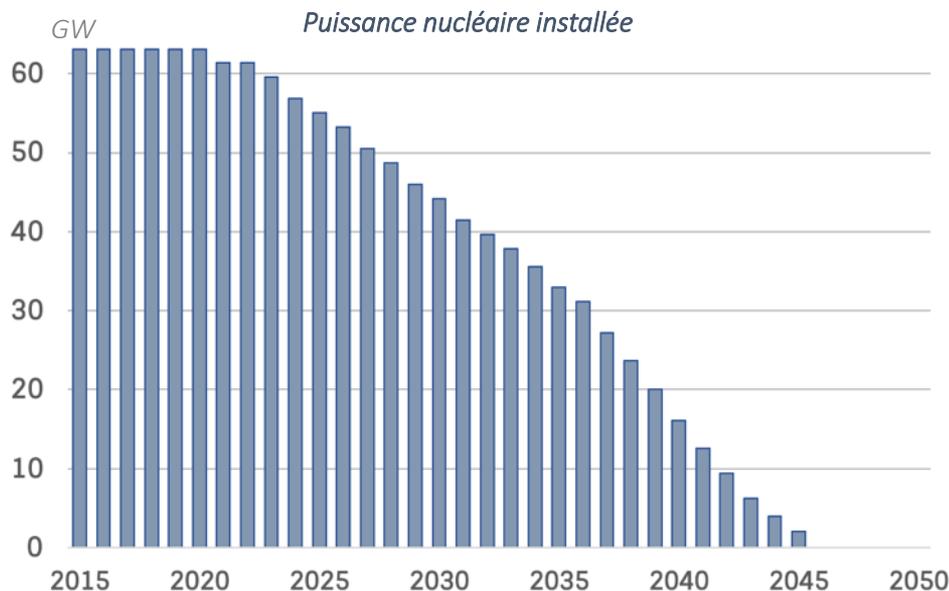
*La gestion de  
la trajectoire*

## ↘ Une “descente” nucléaire contrôlée

- Ressource épuisant un stock (uranium)
- Risque intergénérationnel (matières / déchets)
- Risque territorial majeur (accident)
- Risque géopolitique (sécurité, prolifération)



Une option de production décarbonée  
intrinsèquement **moins soutenable**  
et **moins facilement déployable**  
que les énergies renouvelables



1

### Pas de nouveaux réacteurs

Ni EPR, ni nouvel EPR, ni SMR...

2

### Gestion du parc existant

Pas de pari post 50 ans

Lissage et flexibilité de la fermeture

Fermeture coordonnée des usines  
du combustible (amont et aval)

Minimisation des inventaires  
de déchets et matières sans emploi

Étalement des fermetures par site

Vu de  1990

Avant... internet  
les mobiles puis les smartphones  
les renouvelables compétitives  
le smart grid

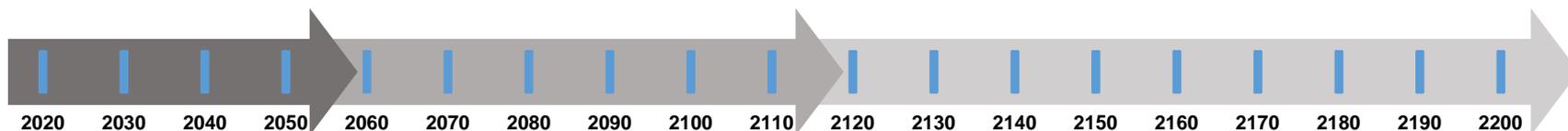
Vu de  1930

Avant... le nucléaire civil  
les panneaux photovoltaïques

Vu de  1840

Avant... la production d'électricité

- Une solution rigide, une exposition forte au risque d'échec de chaque projet
- Une technologie figée dans un environnement électrique en profonde transformation
- Une filière fortement exposée au risque d'obsolescence
- Une forte dépendance à la reconduction d'une infrastructure industrielle spécifique



Vu de  1990

Avant... l'ouverture des marchés  
la changement de statut d'EDF  
la création de l'ASN  
la crise financière (2008)  
l'objectif 50 % pour le nucléaire

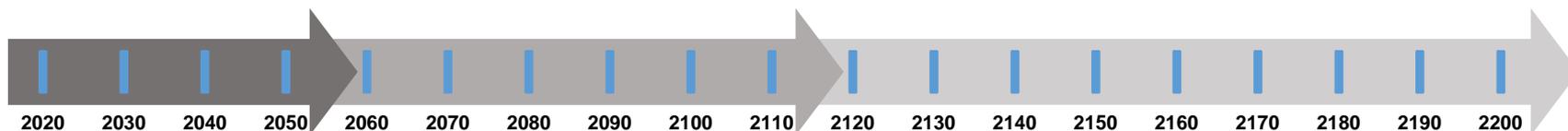
Vu de  1930

Avant... la 4<sup>ème</sup> République  
la création d'EDF  
l'Union Européenne

Vu de  1840

Avant... la 2<sup>ème</sup> République

- Un risque démocratique, le plan de construction dépendant d'une continuité sur cinq mandats
- Une incertitude majeure sur l'évolution du cadre régalién nécessaire sur le plan institutionnel et du financement
- Un risque élevé de rupture institutionnelle susceptible de remettre en cause les plans à long terme



Vu de  1990

Avant... *la tempête de 1999  
la catastrophe de Fukushima  
la pandémie mondiale (Covid)*

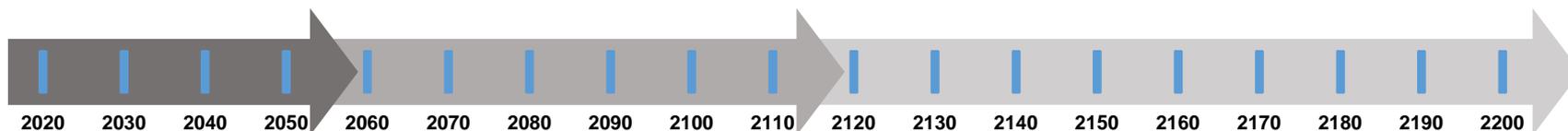
Vu de  1930

Avant... *la notion de pic (Hubbert)  
la notion de limites planétaires*

Vu de  1840

Avant... *l'anthropocène*

- *Des incertitudes majeures sur l'impact des bouleversements en cours (climat, biodiversité)*
- *Une impossibilité à intégrer dès la conception une robustesse à "l'inimaginable" à un tel horizon*
- *Un risque résiduel irréductible d'accident pour l'environnement, la population et le patrimoine*



Vu de  1990

Avant... le 11 septembre 2001  
l'Accord de Paris  
la crise ukrainienne  
et l'occupation de Zaporijia

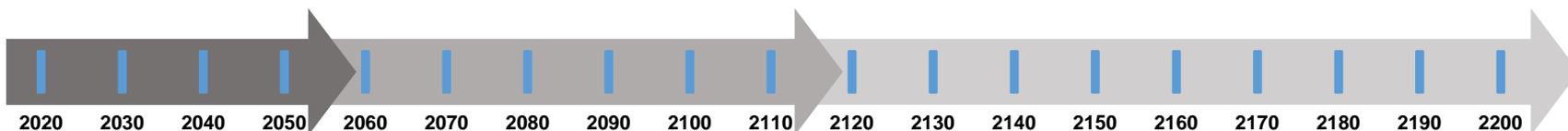
Vu de  1930

Avant... la Seconde Guerre mondiale  
la création de l'ONU  
la bombe atomique  
les chocs pétroliers

Vu de  1840

Avant... trois guerres sur le sol français  
et des changements de frontières

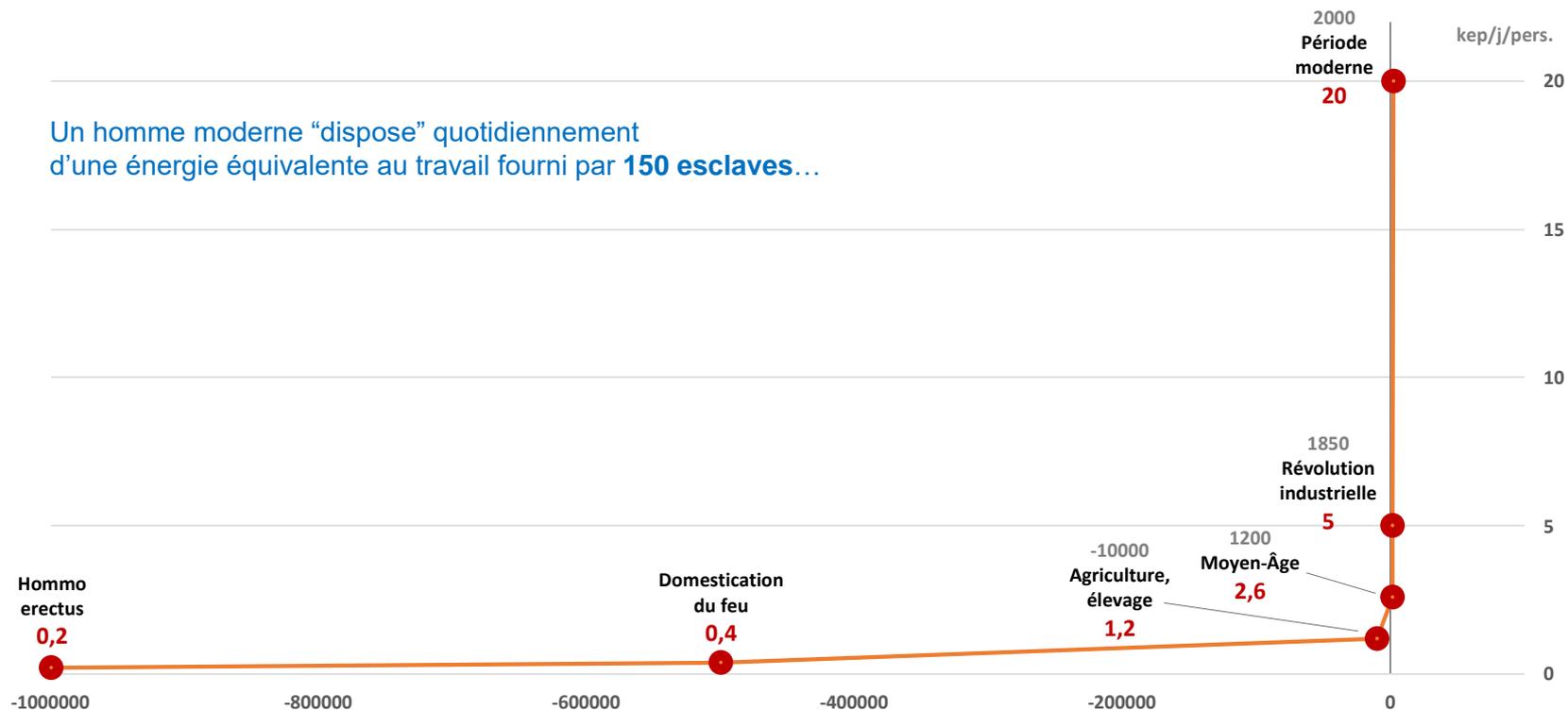
- Une technologie soumise par sa dualité civile / militaire à des enjeux géopolitiques irréductibles
- Une dépendance inévitable à une ressource en uranium importée vulnérable à l'évolution des pays fournisseurs
- Une vulnérabilité majeure en cas de conflit armé comme face aux évolutions de la menace terroriste





## Évolution de la consommation moyenne d'énergie par personne au fil des âges

Un homme moderne "dispose" quotidiennement d'une énergie équivalente au travail fourni par **150 esclaves**...



Une matrice “intégrée et indivisible” (Nations-Unies, 2015)



*Défis écologiques*

- Des objectifs directement quantifiés
- Des objectifs analysés qualitativement

*Progrès économique et social*

- Des choix économiques structurants
- Des principes directeurs de réduction des inégalités

*Amélioration de la vie*

- La recherche d'un cadre quotidien plus sain

*Gouvernance et institutions*

- Des cadres de gouvernance à la hauteur des enjeux
- Un objectif d'appropriation

**Années 1970 - 1980 : Déploiement du programme nucléaire**

- Surcapacité de production
- Déséquilibre de la pyramide des âges
- Dépendance au “gradient thermique”

**Années 1990 - 2000 : Financiarisation de la stratégie**

- Lancement de Flamanville-3 pour préparer le renouvellement
- Renoncement au renouvellement à 40 ans au profit de la prolongation
- Recherche de relais de croissance à l’exportation

**Années 2010 - 2020 : Fuite en avant face à la crise**

- Verrouillage technique de la trajectoire électrique
- Perte de capacités industrielles
- Perte de capacités d’auto-financement

# ➤ Action sur la demande

IPCC, 2022: “Demand-side mitigation can be achieved through changes in **socio-cultural factors**, **infrastructure design and use**, and end-use technology adoption by 2050”

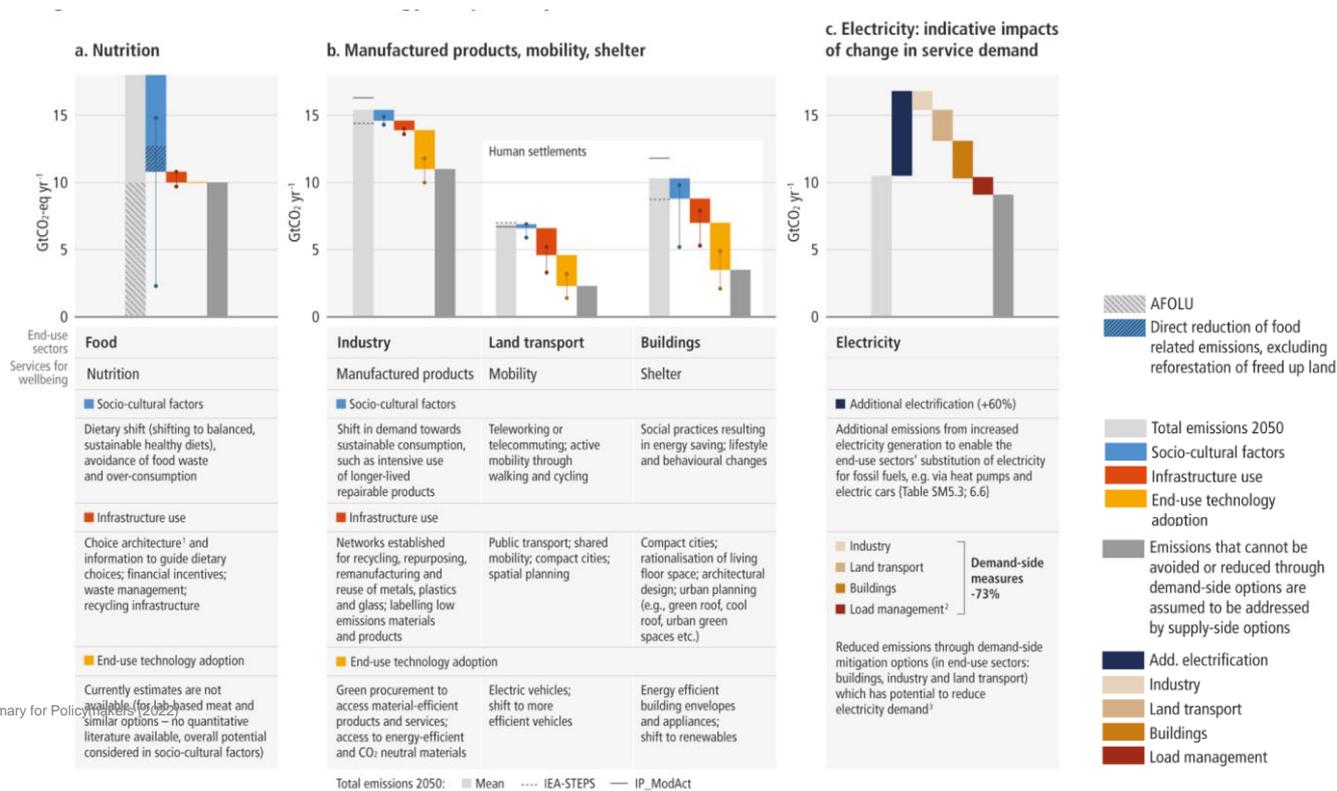
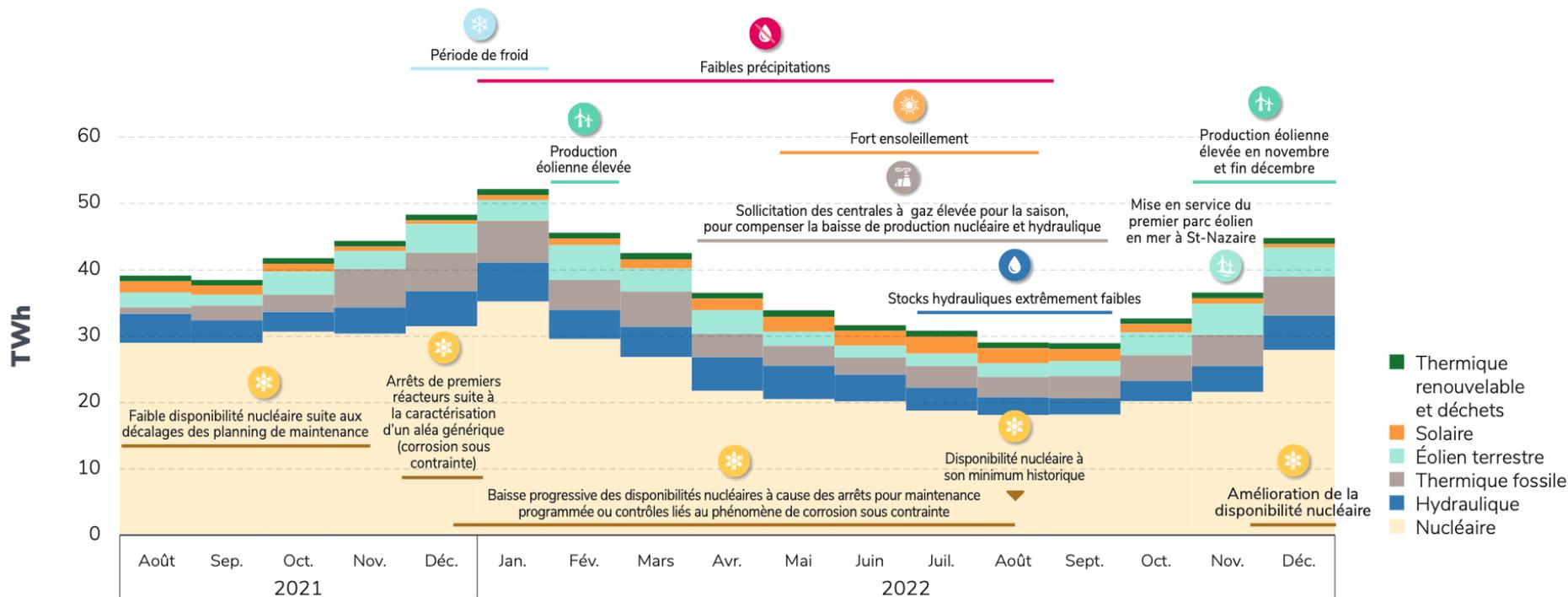


Figure 4 : Évolution de la production d'électricité en France par filière entre août 2021 et décembre 2022



# Options de réduction des émissions



Figure SPM.7: Overview of mitigation options and their estimated ranges of costs and potentials in 2030.

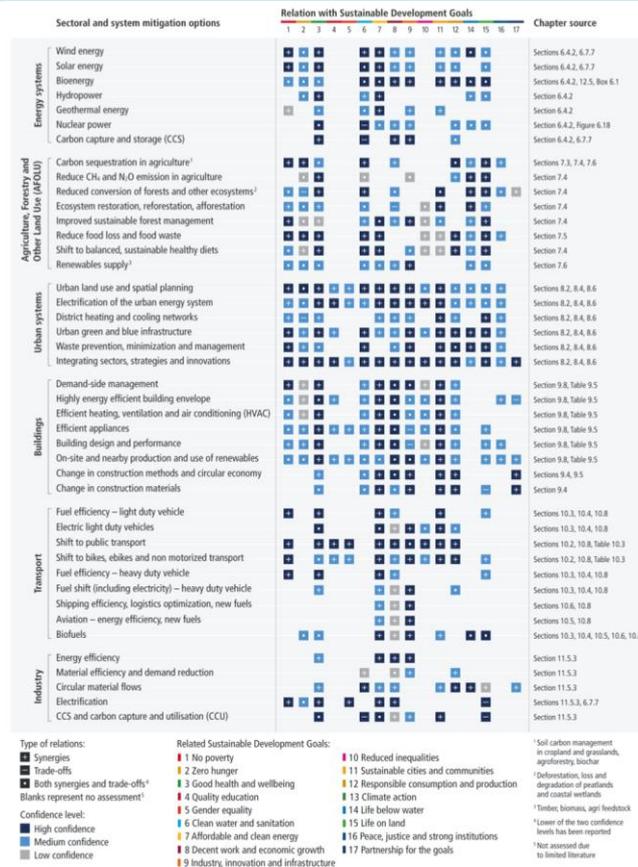


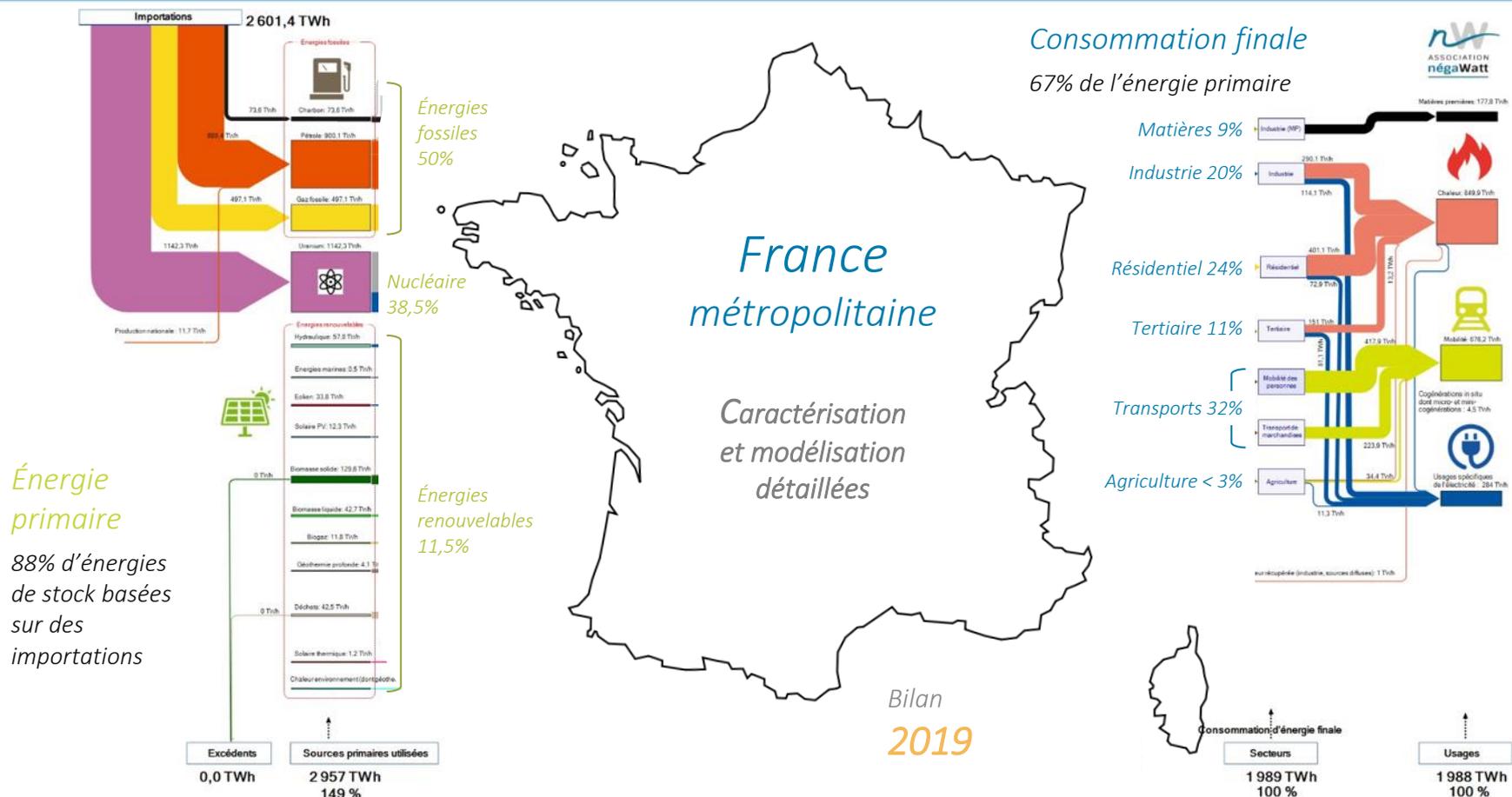
Figure SPM.8 Synergies and trade-offs between sectoral and system mitigation options and the SDGs



## *Contexte et objectifs*

---

# Une application au périmètre national





# 2.

## *Les orientations*

---

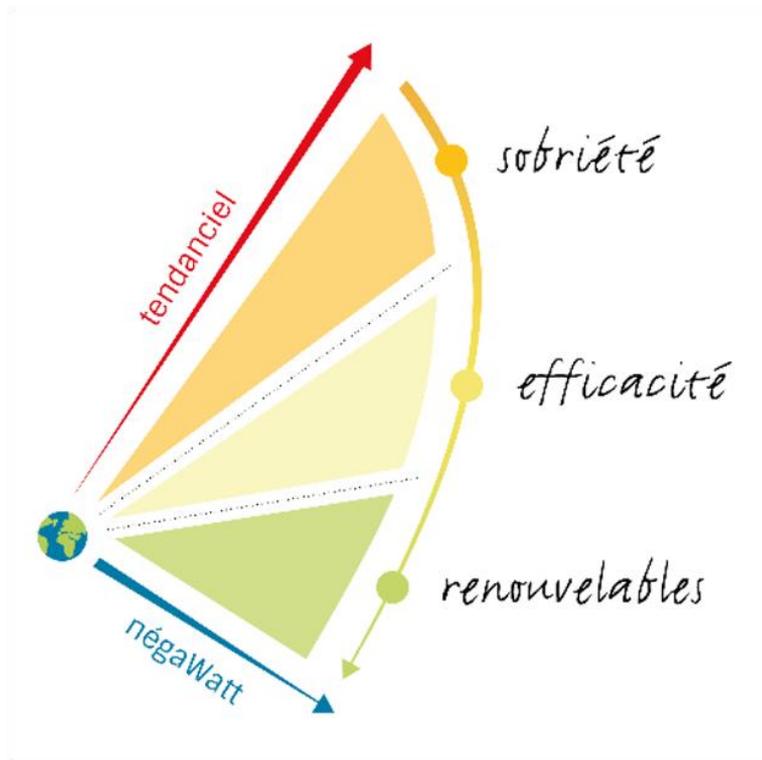
- *Leviers d'action*
- *Secteurs de consommation*
- *Évolution de la production*



## *Leviers d'action*

---

Une démarche systématique pour répondre à un problème systémique



*Partir des usages  
pour remonter aux ressources*

1

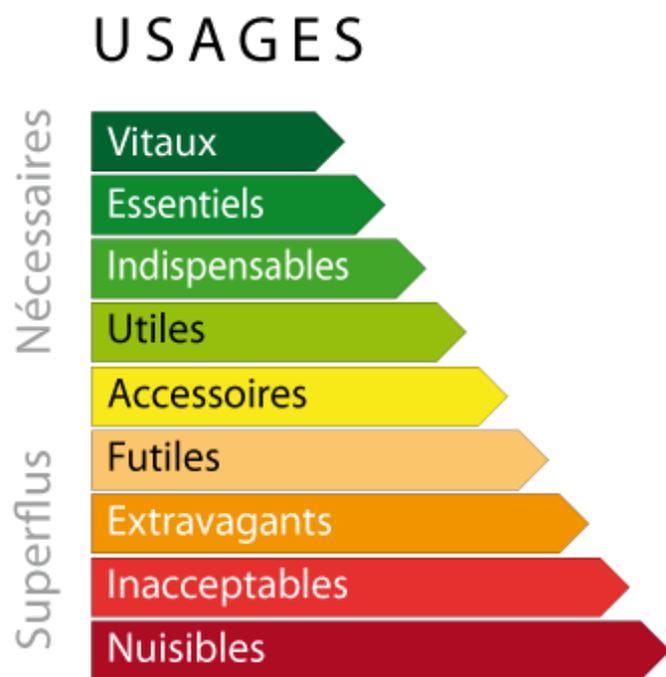
*Agir collectivement et individuellement  
sur le niveau d'usage en priorisant  
et redimensionnant les services rendus*

2

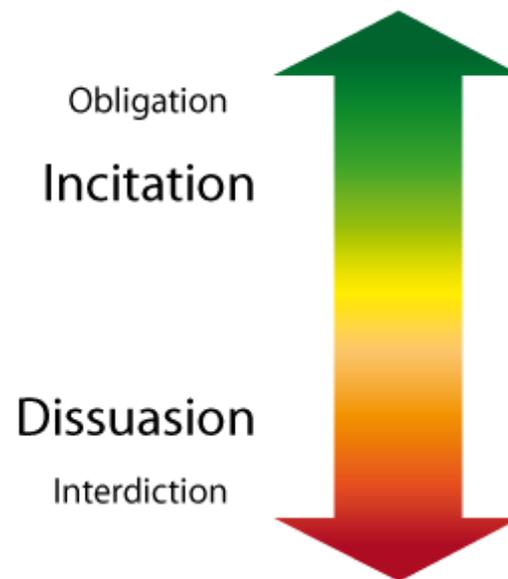
*Réduire le ratio ressources / usages  
en améliorant les performances  
à toutes les étapes de transformation*

3

*Remplacer les ressources moins  
soutenables (stocks) par des ressources  
plus soutenables (flux)*



### RÉGULATIONS



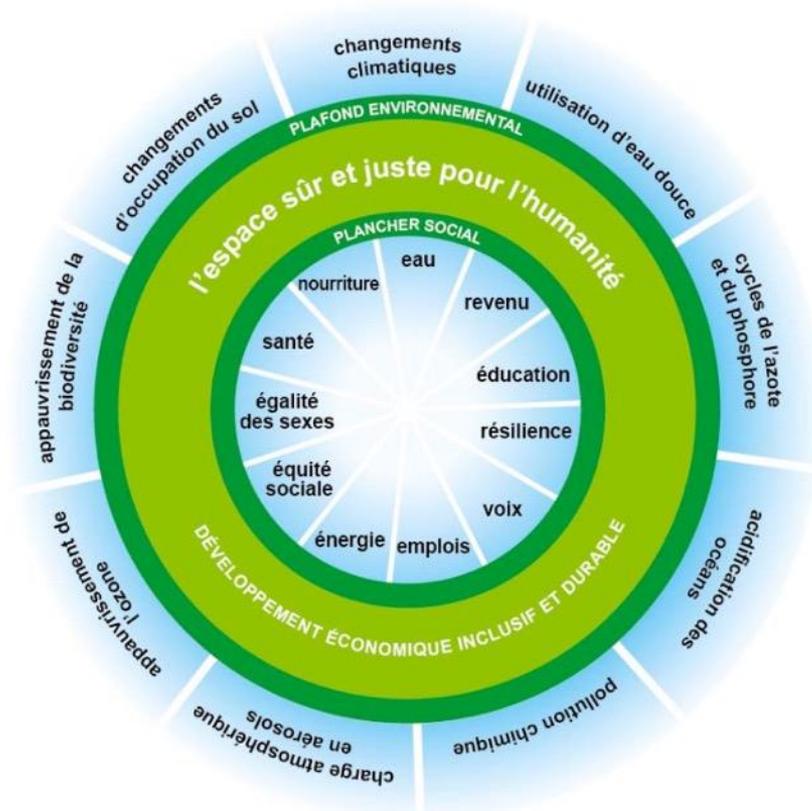
### Limiter le spectre des inégalités

#### Deux limites à ne pas dépasser :

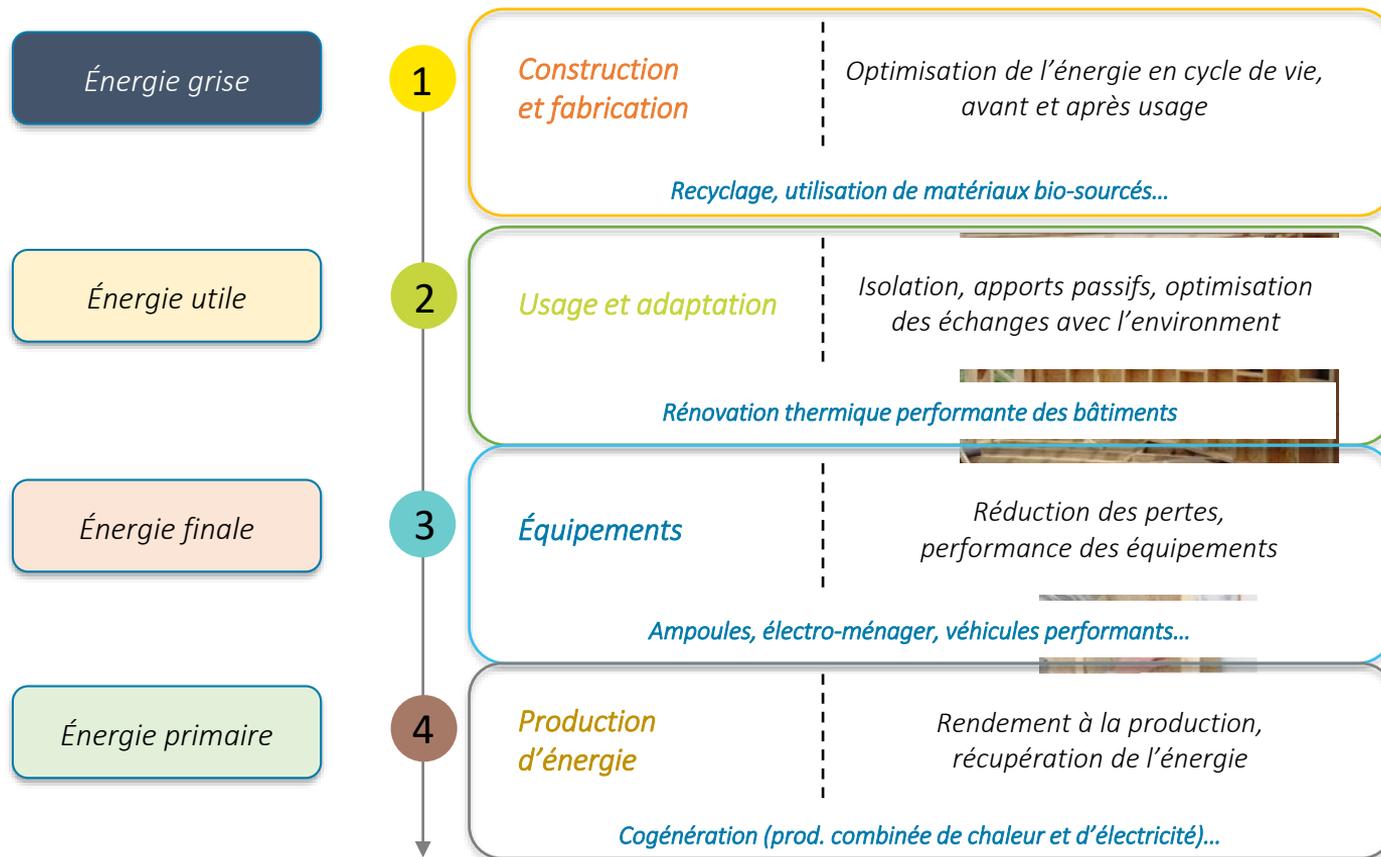
- **Un plancher :**  
les minimums sociaux au-dessous  
desquels la vie en société est dégradée
- **Un plafond :**  
les limites écologiques au-delà  
desquelles les conditions de vie sont menacées



modérer la consommation  
renforcer les logiques de solidarité  
et de redistribution



# ↳ Quatre étages d'efficacité

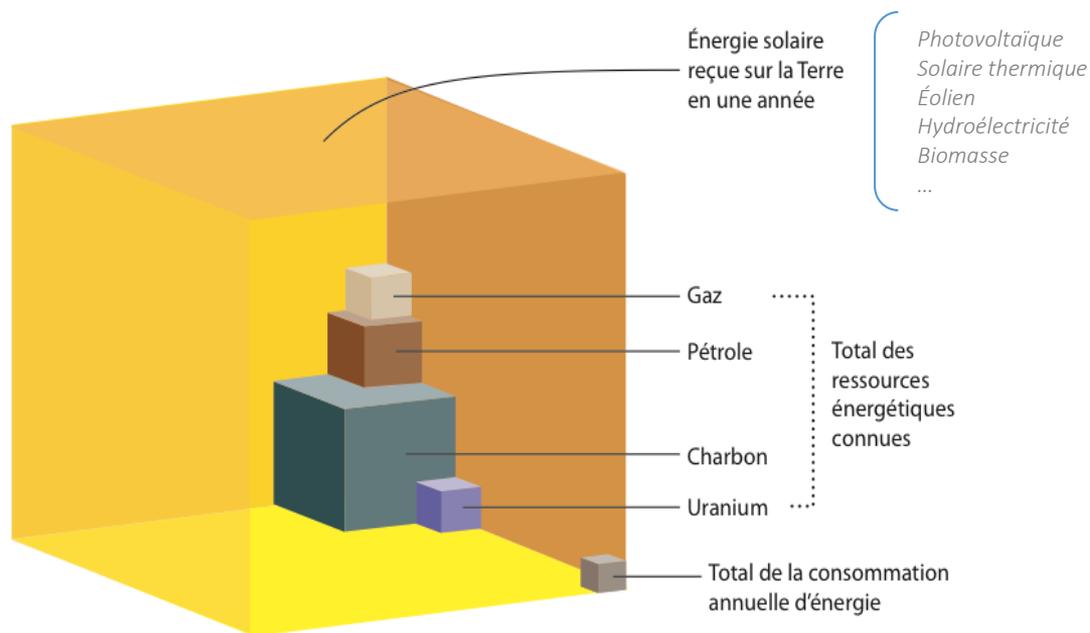


*Substitution*

Ressources  
basées sur des stocks



Ressources  
basées sur des flux



**La Terre reçoit en 1 heure  
la quantité d'énergie  
consommée en 1 an**

Représentation des quantités d'énergies disponibles sur Terre



## *Secteurs de consommation*

---

## Substitution



● Généralisation des **systèmes de chauffage** les plus performants

## Efficacité



● **Rénovation énergétique performante** de la quasi-totalité du parc

## Sobriété



● **Stabilisation** des m<sup>2</sup> par habitant et du nombre de personnes par logement



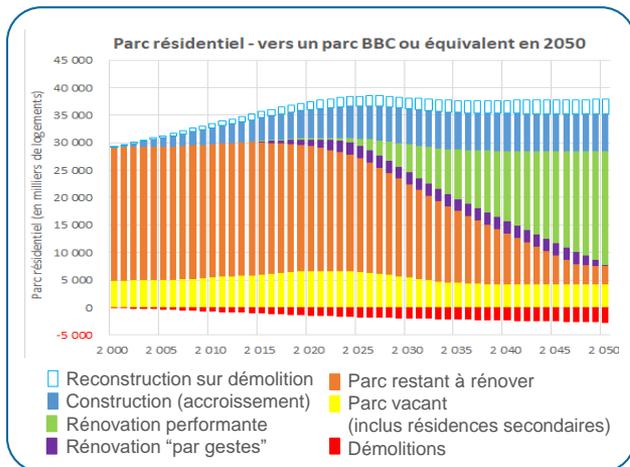
● **Réduction** de la part des maisons individuelles dans le neuf



● **Diminution** des surfaces **neuves** construites



● **Dimensionnement** et usage raisonnables des **équipements**

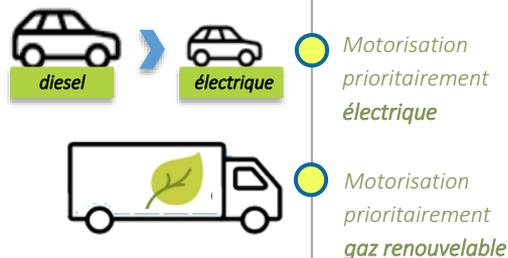


● **Obligation de haute performance** pour tous les bâtiments neufs

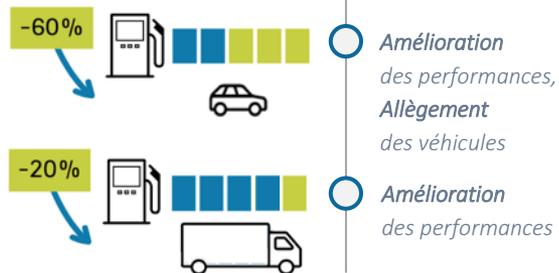


● **Utilisation privilégiée** de structures bois et de **matériaux à faible énergie grise**

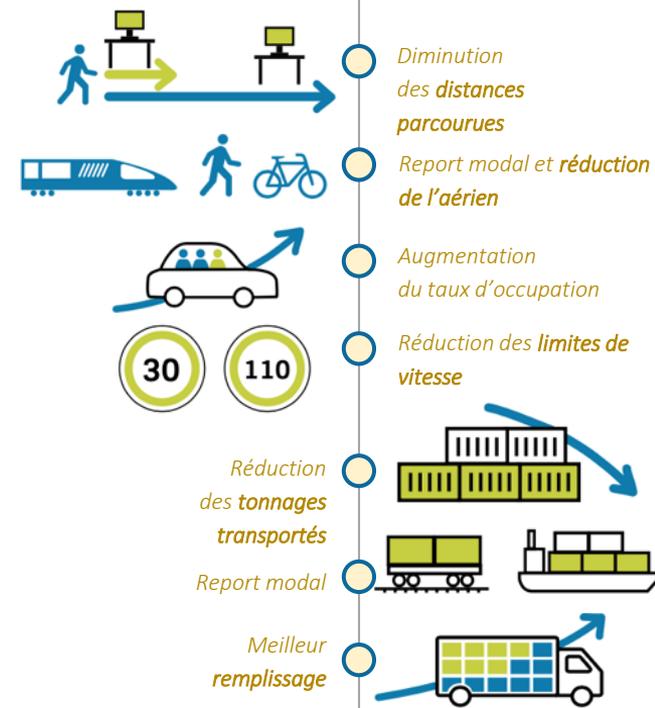
## Substitution



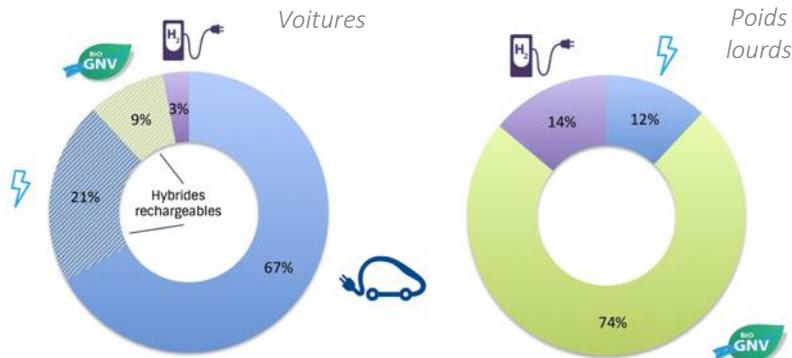
## Efficacité



## Sobriété



Répartition des motorisations en 2050



## Substitution



Utilisation croissante de **produits biosourcés**



Décarbonation de la sidérurgie et de la chimie grâce à l'**hydrogène**

## Efficacité



Amélioration des rendements des **process industriels** (électrification...)



Accélération des **innovations** et choix techno réduisant consommation et empreinte matières

## Sobriété



Diminution de la production d'**acier**, de **ciment**, de **plastique** et de la consommation d'énergie

**durabilité**

**réparabilité**



Des **produits plus durables**, plus réparables et plus réparés

**recyclage**



Une forte **augmentation des taux de recyclage** (métaux, verre, plastiques)

### Réindustrialisation vertueuse

Exemple du textile – évolution à 2050



**-30 %**

en volume (tonnage annuel)



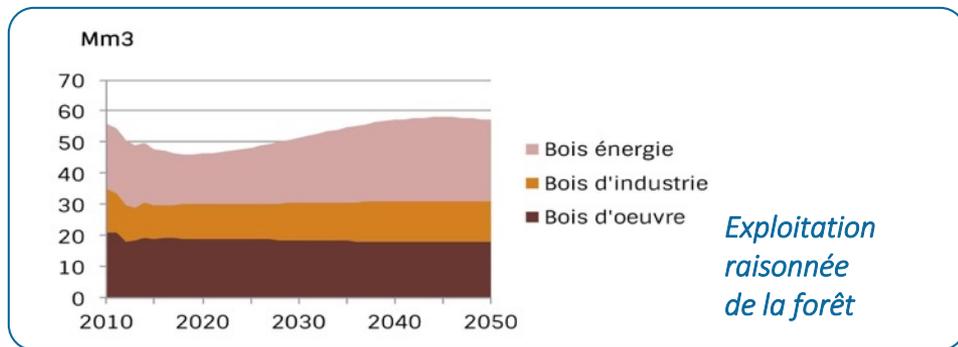
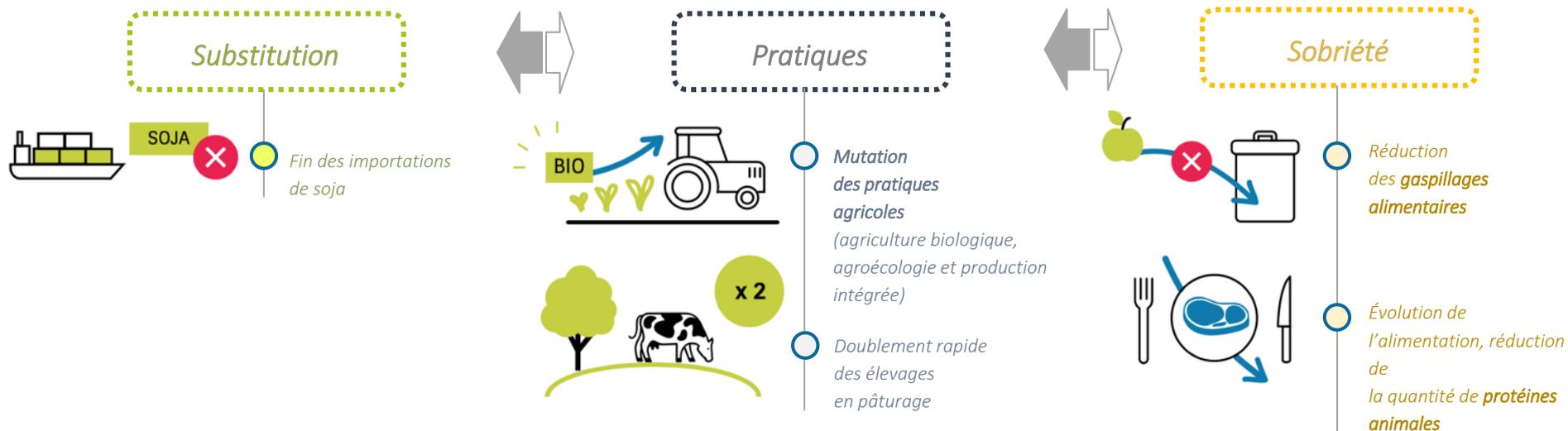
**30 %**

de production nationale (contre 15 %)



**50 %**

de recyclage (contre < 10 %)



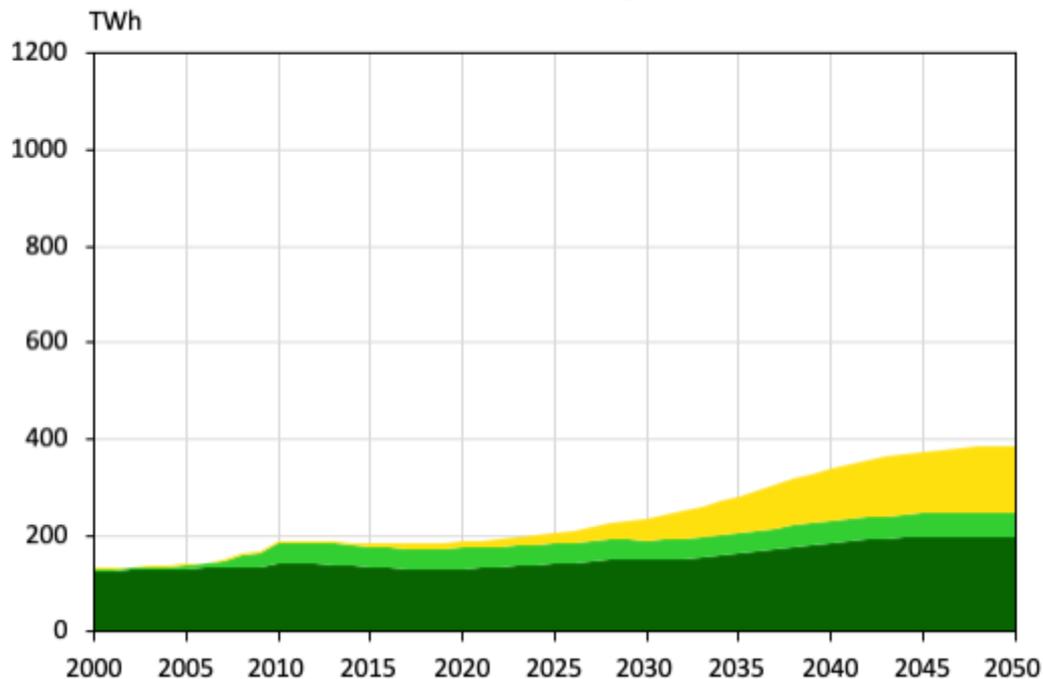


# *Évolution de la production*

---



## Bio-énergies



■ **Biogaz**

■ **Biomasse liquide**

■ **Biomasse solide**

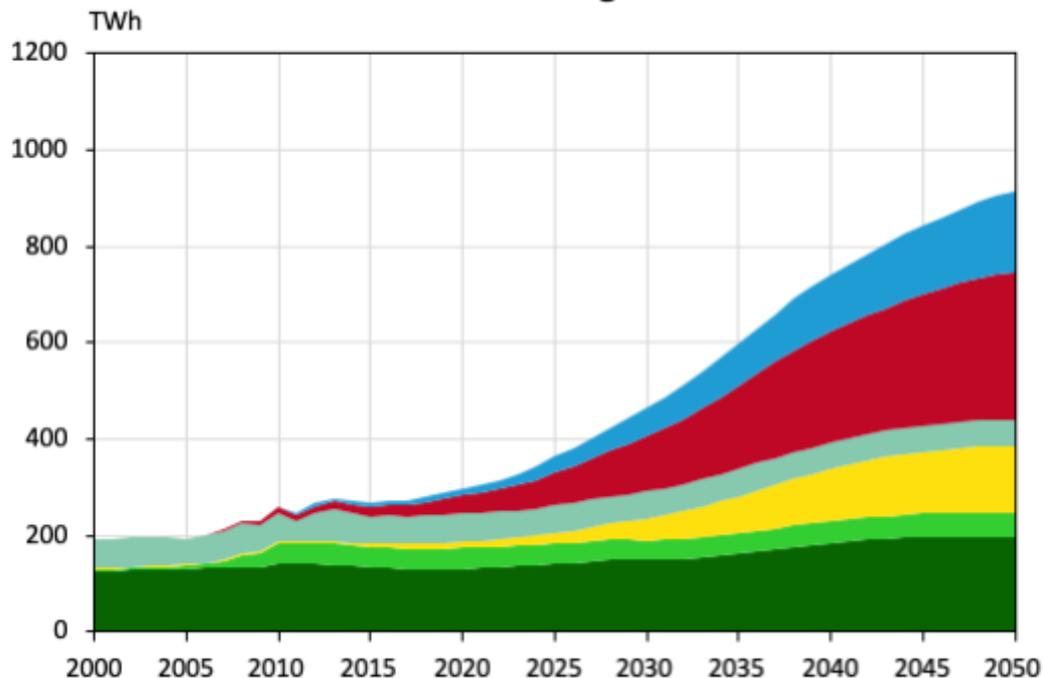
Déchets, résidus de culture, cultures intermédiaires, **pas de culture dédiée** pour la production de biogaz

Réduction du recours aux **agrocarburants** sous leur forme actuelle  
Développement de nouveaux agrocarburants pour l'aviation

**Exploitation raisonnée** de la forêt  
+ contribution croissante de l'agroforesterie



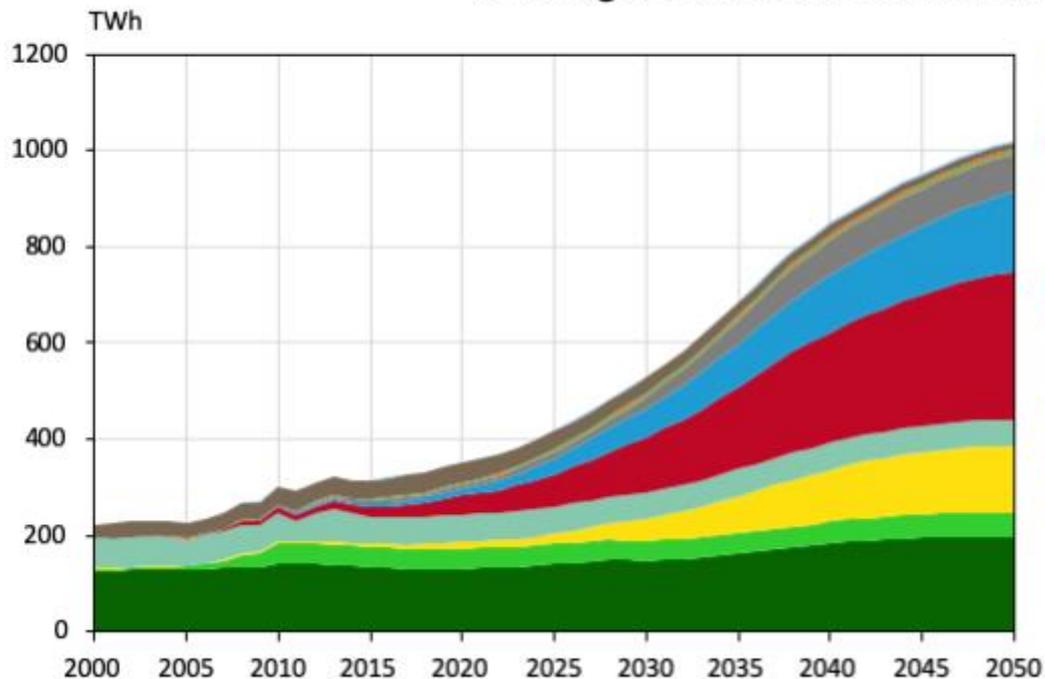
### Bio-énergies + électricité



- Solaire PV** : Développement diversifié du photovoltaïque, du *diffus* aux *parcs au sol*, sans concurrence avec les usages agricoles **144 GW au total en 2050**
- Eolien** : Développement de l'éolien *terrestre* (18 500 mâts) et *offshore* (3 500 mâts) posé et flottant **99 GW au total en 2050**
- Hydraulique** : Baisse tendancielle modérée de la production hydroélectrique
- Biogaz**
- Biomasse liquide**
- Biomasse solide**



### Bio-énergies + électricité + autres renouvelables



- Energies marines
- Déchets
- Solaire thermique
- Géothermie
- Chaleur environnement
- Solaire PV
- Eolien
- Hydraulique
- Biogaz
- Biomasse liquide
- Biomasse solide

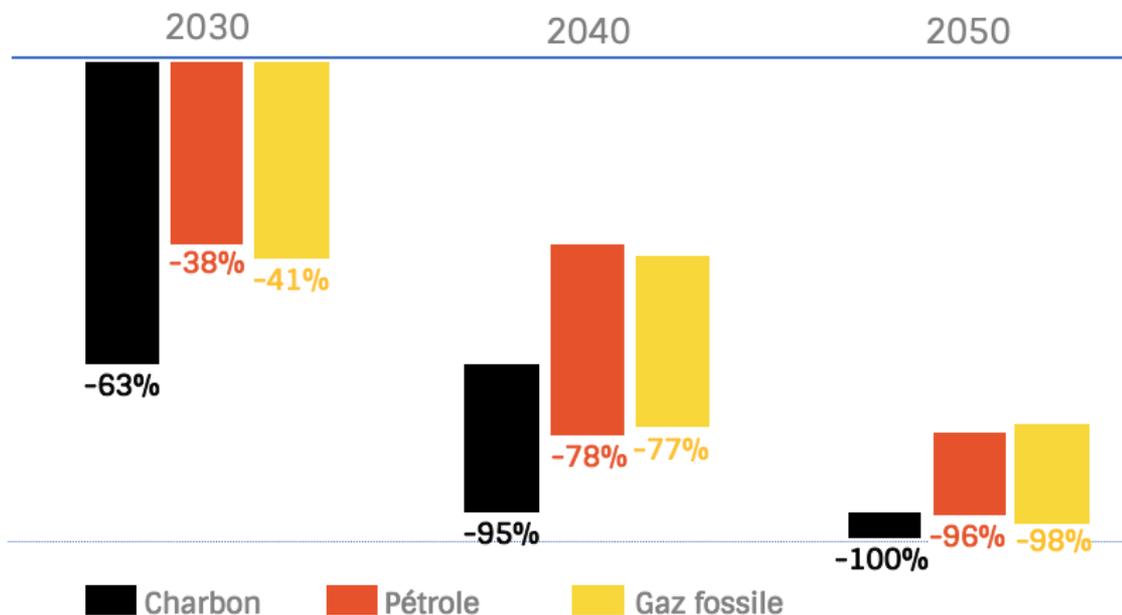
Pas de développement de filières nouvelles insuffisamment matures

Recours modéré aux filières matures à potentiel limité

Développement important des pompes à chaleur

- *Sortie progressive des énergies fossiles sauf usages résiduels marginaux de gaz fossile*
- *Talon d'usages non énergétiques*
- *Effort de substitution continu entre vecteurs et de remplacement du gaz fossile par du gaz vert*
- *Pas de pic temporaire lié à la transition*

Réduction de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2020

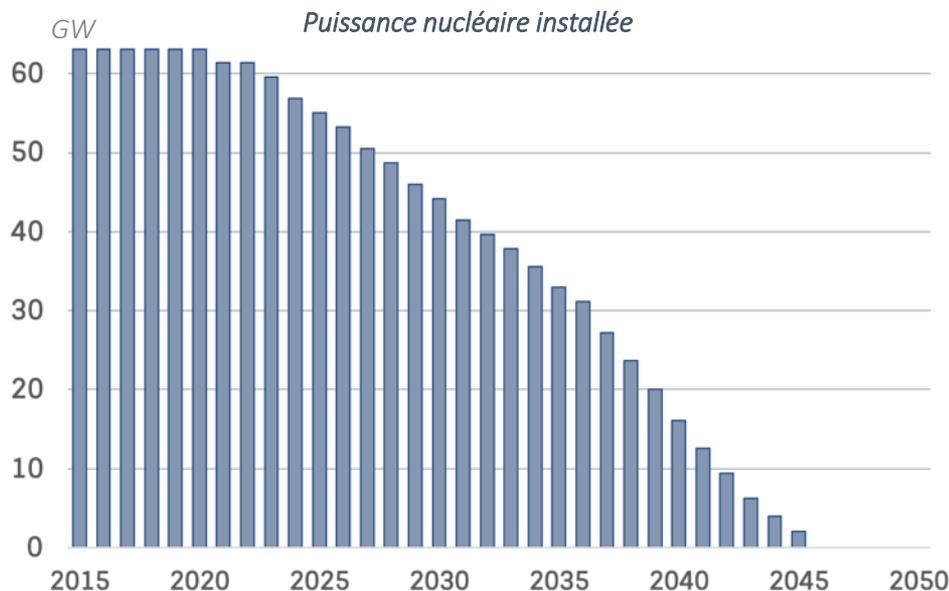


## ↳ Une “descente” nucléaire contrôlée

- Ressource épuisant un stock (uranium)
- Risque intergénérationnel (matières / déchets)
- Risque territorial majeur (accident)
- Risque géopolitique (sécurité, prolifération)



Une option de production décarbonée intrinsèquement **moins soutenable** et **moins facilement déployable** que les énergies renouvelables



1

### Pas de nouveaux réacteurs

Ni EPR, ni nouvel EPR, ni SMR...

2

### Gestion du parc existant

Pas de pari post 50 ans

Lissage et flexibilité de la fermeture

Fermeture coordonnée des usines  
du combustible (amont et aval)

Minimisation des inventaires  
de déchets et matières sans emploi

Étalement des fermetures par site

### *Scénario négaWatt 2022-2050*

*Dimensionnement raisonnable,  
recours diversifié à des solutions  
diffuses et maîtrisables*

*Coûts compétitifs,  
assurés et  
orientés à la baisse*

*Réduction progressive des risques  
de sûreté et de sécurité  
Moins de matières sans emploi  
et de déchets en héritage*

*Réduction globale des impacts,  
nouveaux modes de développement local,  
et de coopération internationale*



### *Scénario “programme 6 EPR”*

*Développement exposé aux aléas  
de la prolongation de réacteurs  
et de la construction  
de nouveaux réacteurs*

*Coûts non compétitifs,  
incertains et  
orientés à la hausse*

*Exposition **pour plus d’un siècle**  
au risque sûreté et sécurité  
Accumulation croissante  
de matières et de déchets*

*Impacts incertains,  
pas de changement du cadre centralisé  
ou de la vision géopolitique*



# 3.

## *Les enseignements*

---

- *Bilan chiffré*
- *Impact global*
- *Conclusions*

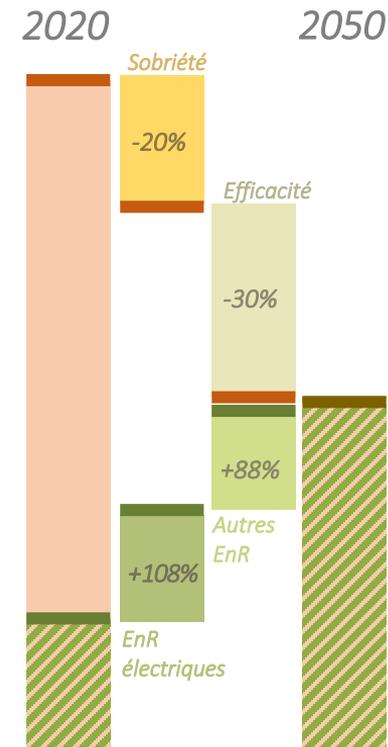
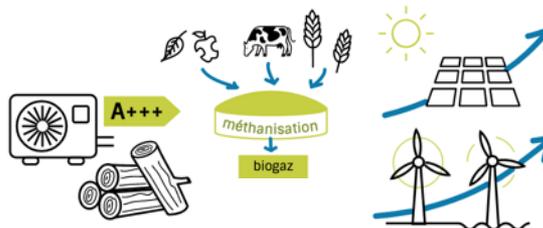
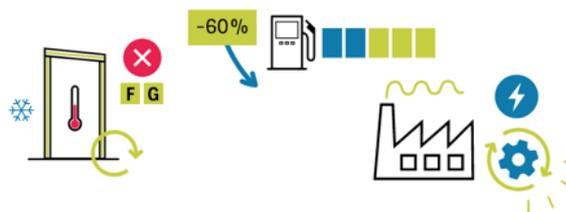
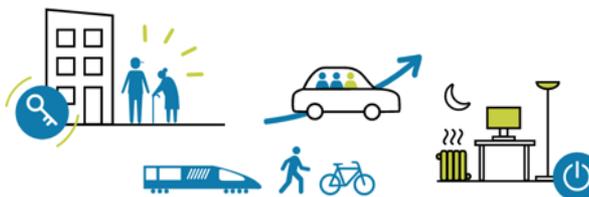
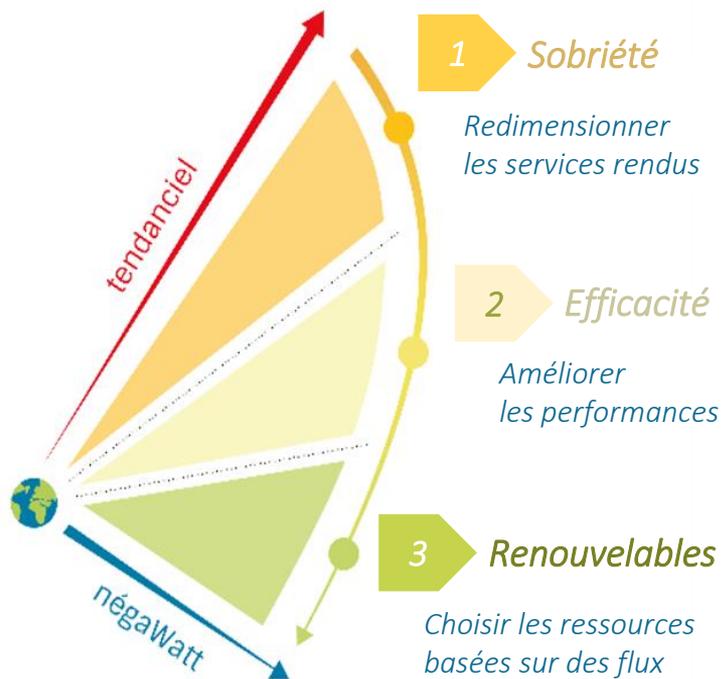


## *Bilan chiffré*

---

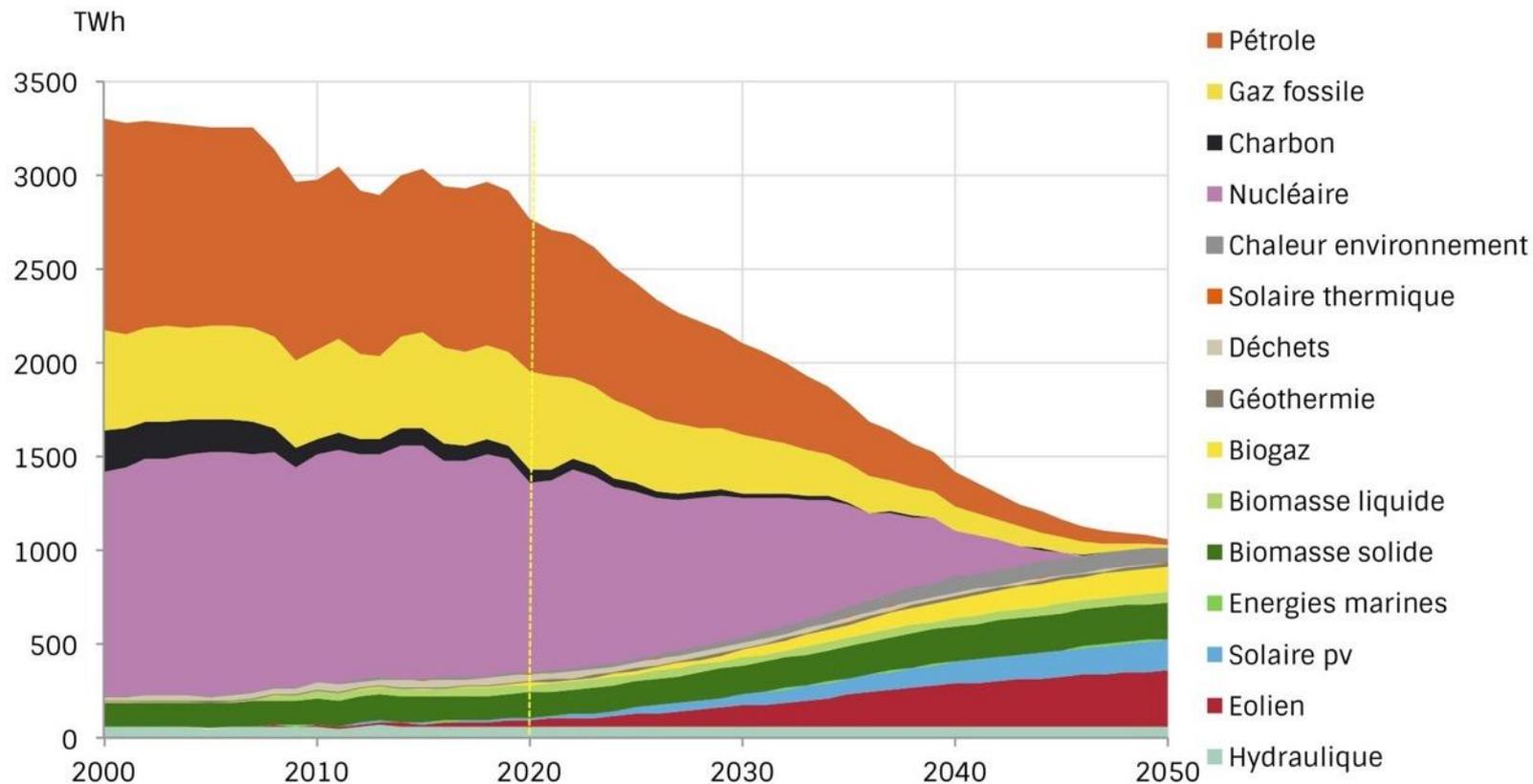
# Une action sur les usages, les performances et les ressources

## La "démarche négaWatt"



Consommation d'énergie, et part des renouvelables

↘ Bilan en énergie primaire : -64 %



7



ÉNERGIE  
PROPRE



*Impact global*

---



## *Conclusions*

---



## Un projet de société à construire

### Un nouveau paradigme

- Action au plus près de gisements localisés
- Cohérence des acteurs autour d'un projet commun
- Création de valeur dans l'économie des ressources
- Protection des communs
- Innovation dans le service



Source : Ecopolis

*Ce qu'on peut retenir de ce scénario :*

- *Un chemin possible vers une société plus respectueuse de la planète, des ressources et de l'humain*
- *Ce chemin implique une transition sociétale forte, mais une transition possible et progressive.*

*Les conséquences du dérèglement climatique sont déjà visibles, nous ne pouvons plus attendre...*

*→ Il nous faut agir vite pour limiter ces effets et préserver l'ensemble de la population, de manière socialement juste.*





*Annexe 1*

***Autres scénarios***

---



*Annexe 2*

***Nouveaux EPR2 & long terme***

---



*Annexe 3*

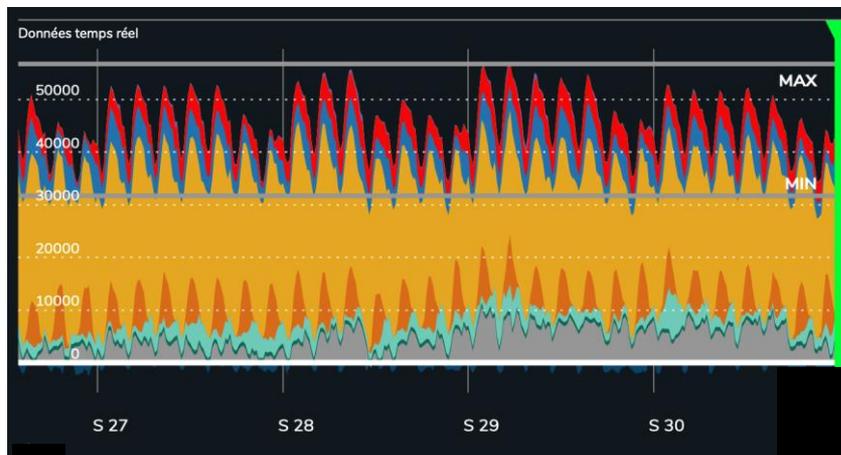
***Mix électrique***

---

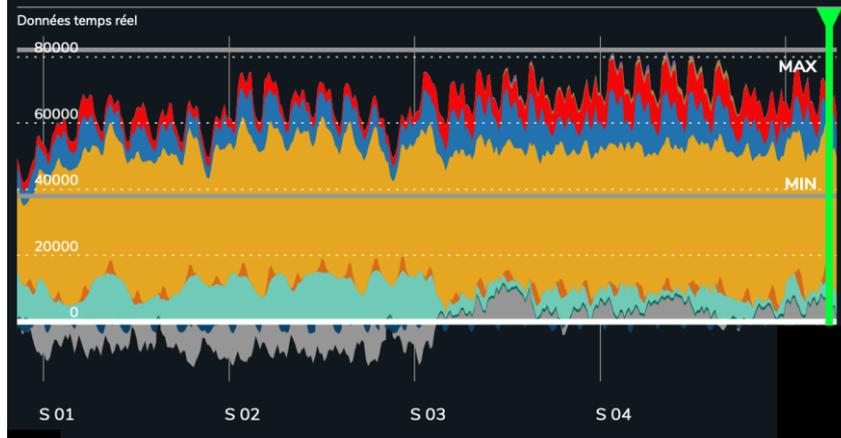
# ↘ Mix électrique de la France



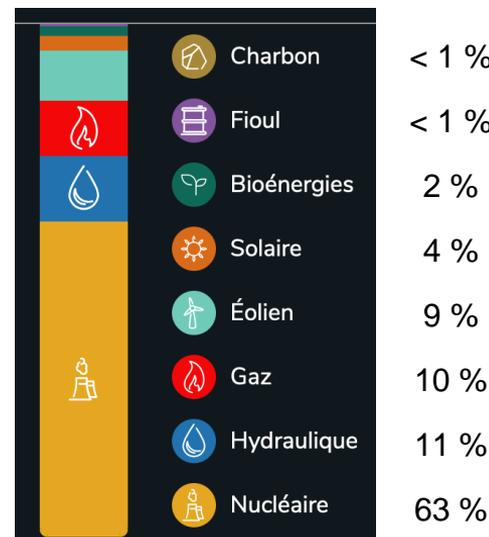
Juillet 2022



Janvier 2023



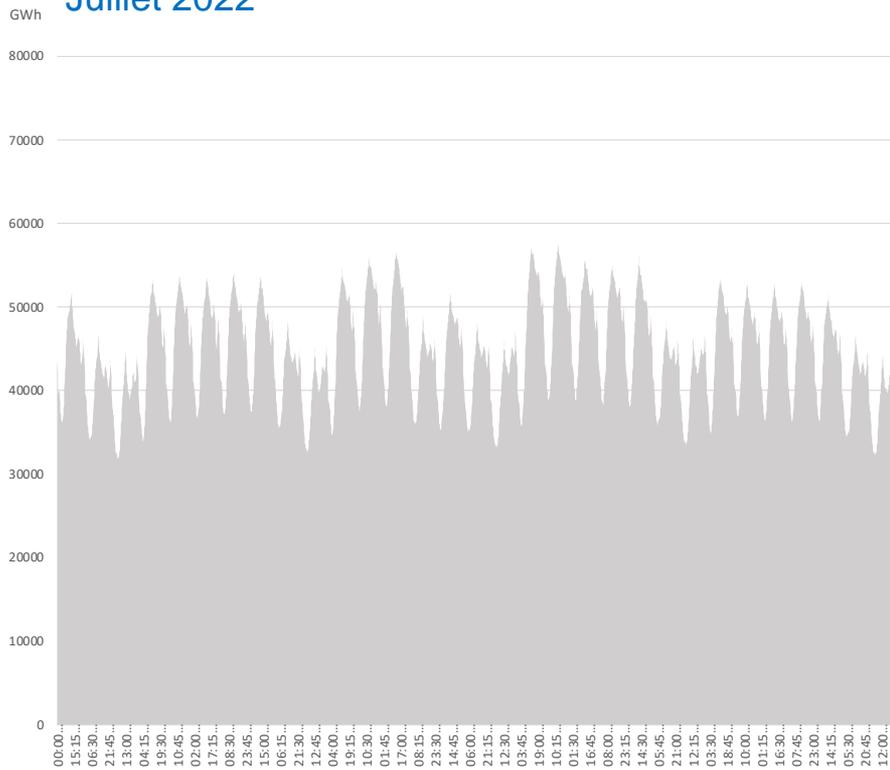
Part  
en 2022



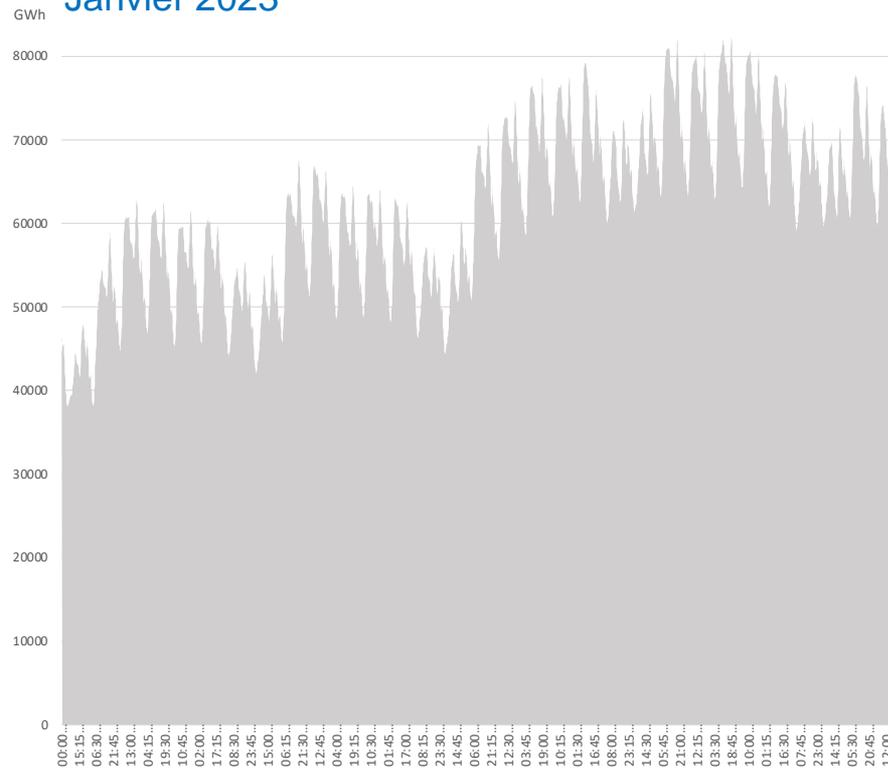
# ↘ Mix électrique France : demande



## Juillet 2022



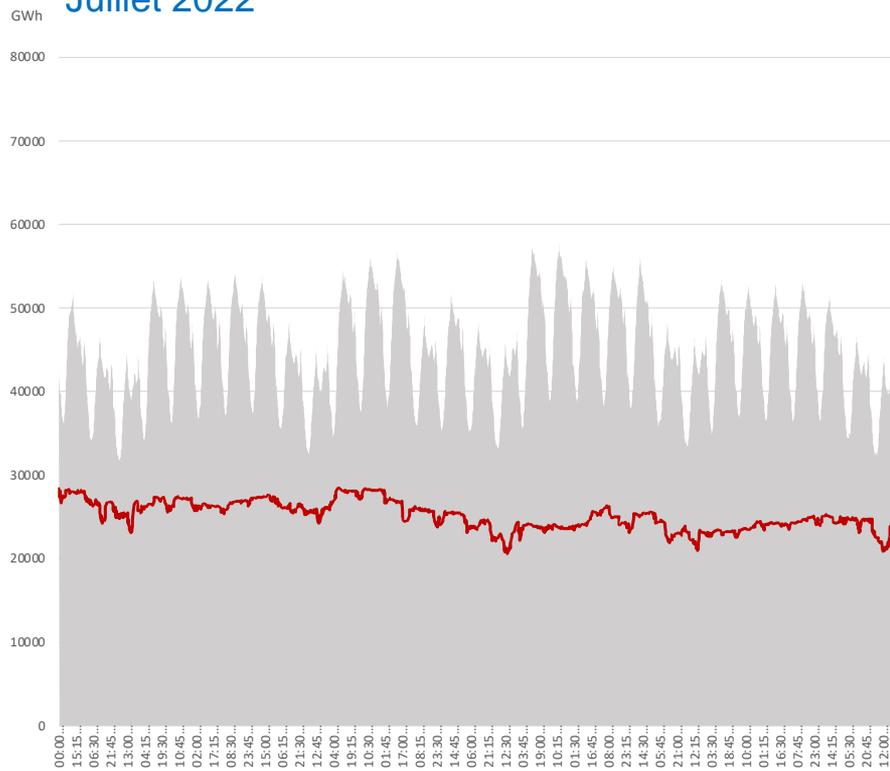
## Janvier 2023



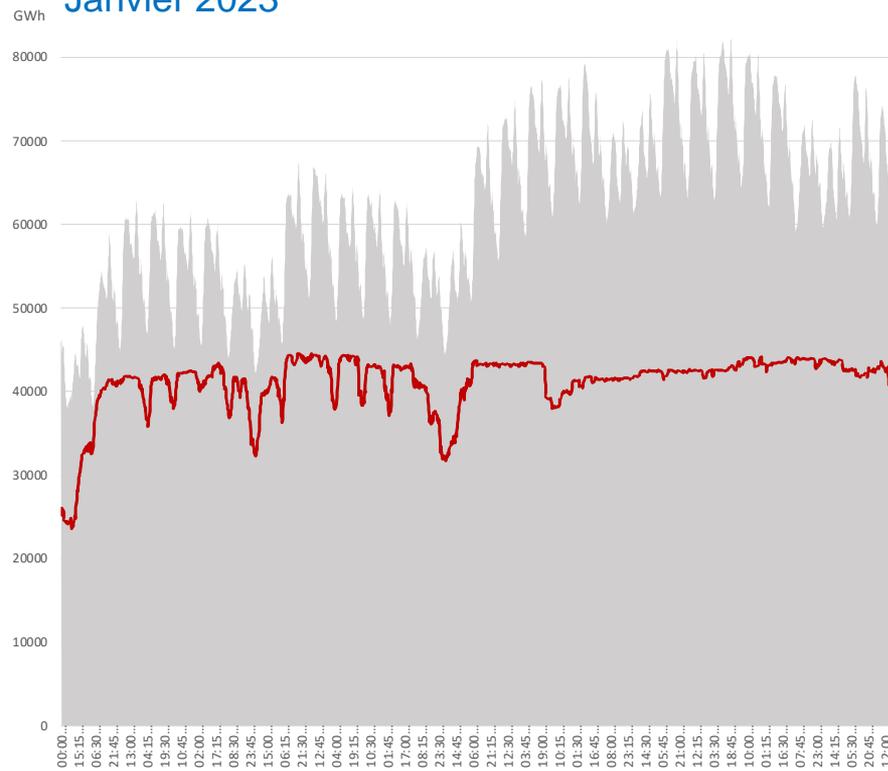
# ↘ Mix électrique France : production nucléaire



## Juillet 2022



## Janvier 2023

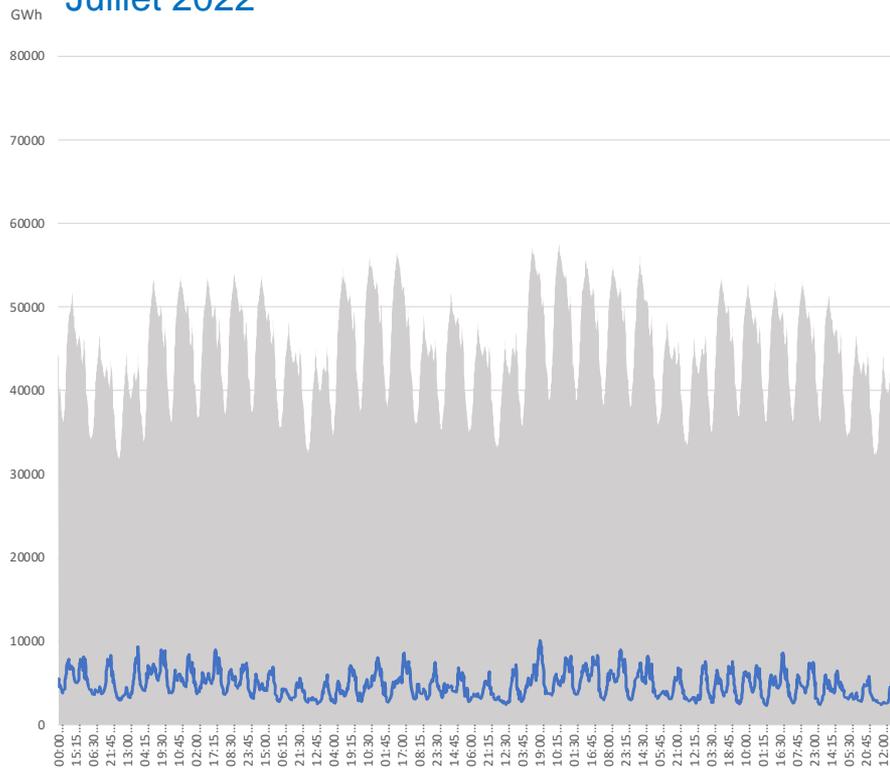


■ Consommation — Nucléaire

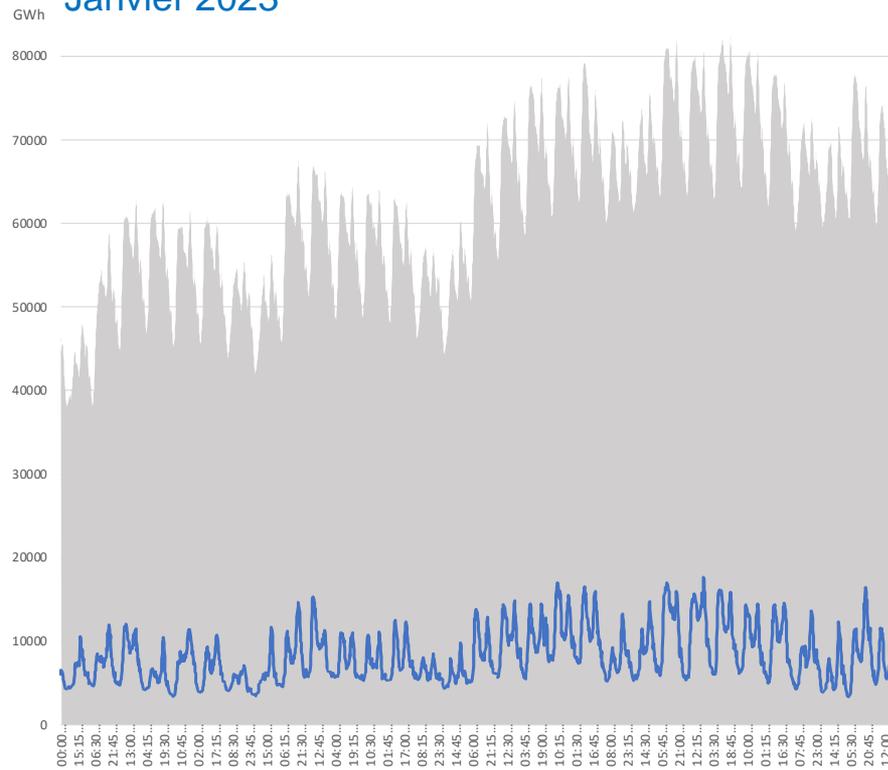
# ↘ Mix électrique France : production hydraulique



## Juillet 2022

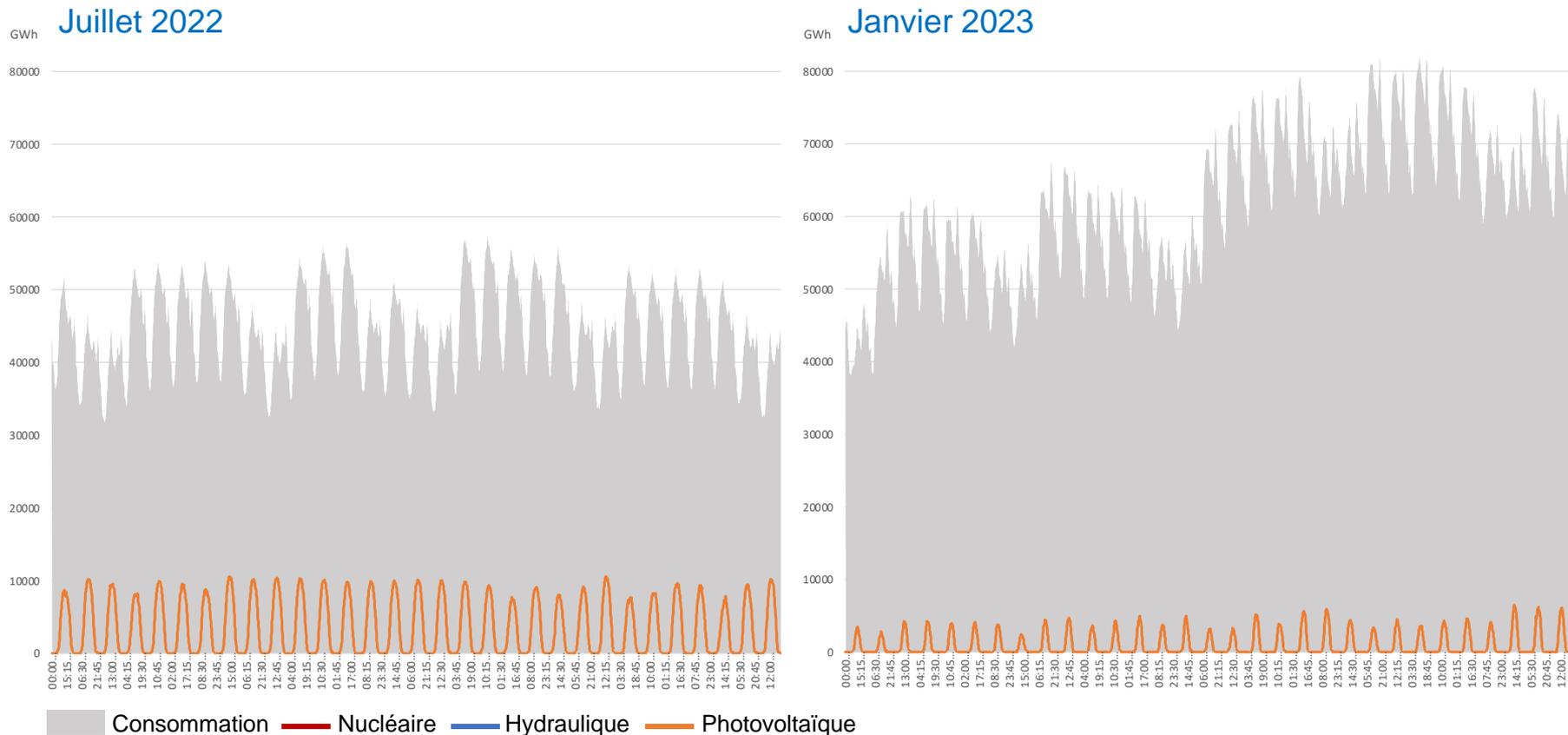


## Janvier 2023



■ Consommation ■ Nucléaire ■ Hydraulique

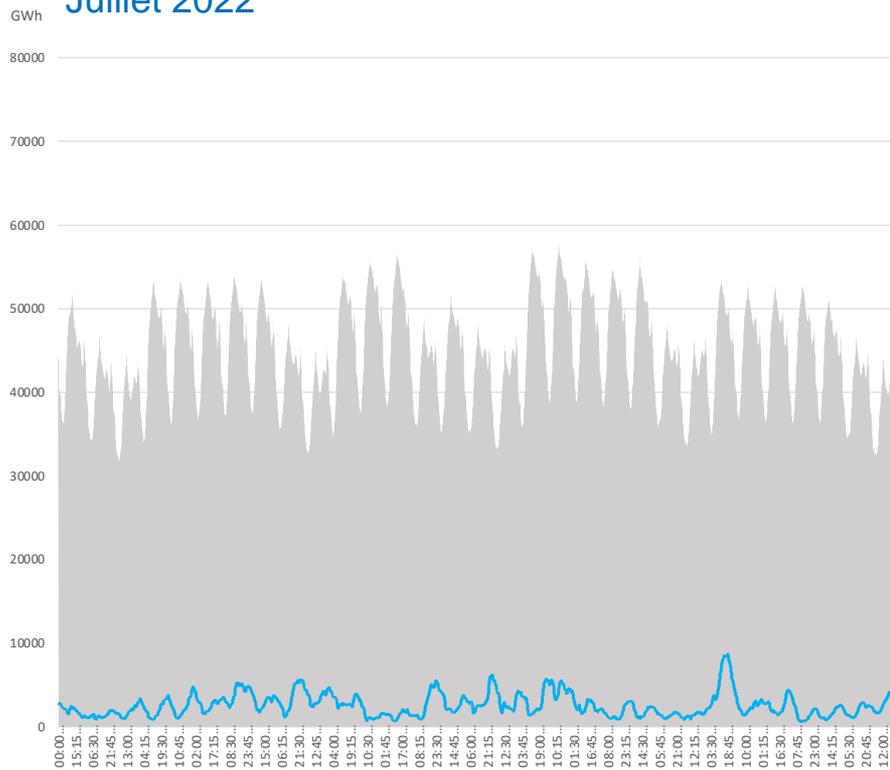
# ↘ Mix électrique France : production photovoltaïque



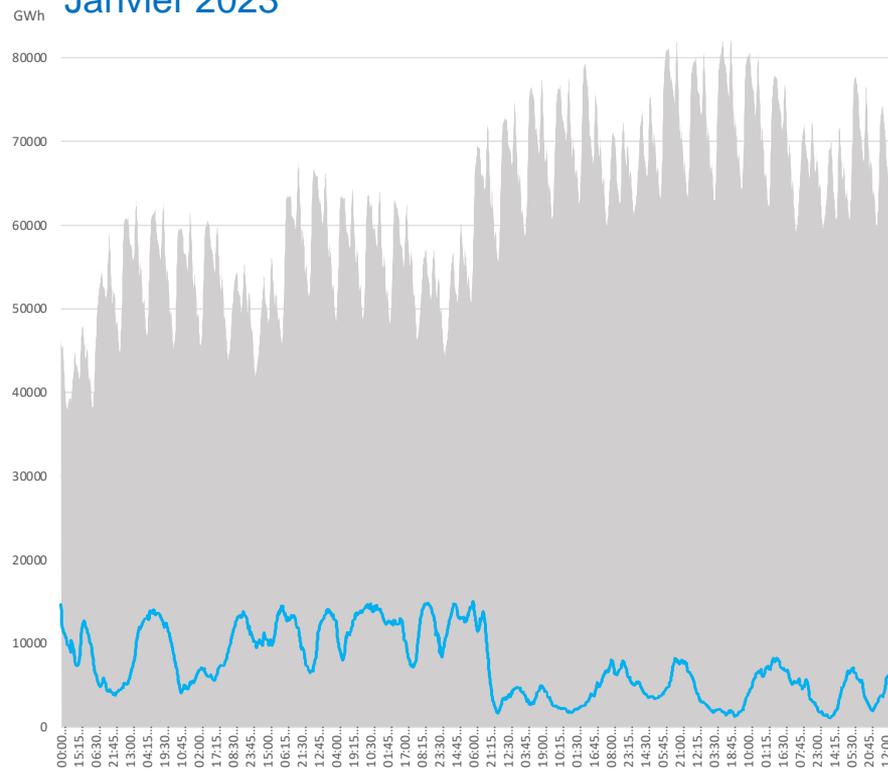
# ↘ Mix électrique France : production éolienne



## Juillet 2022



## Janvier 2023

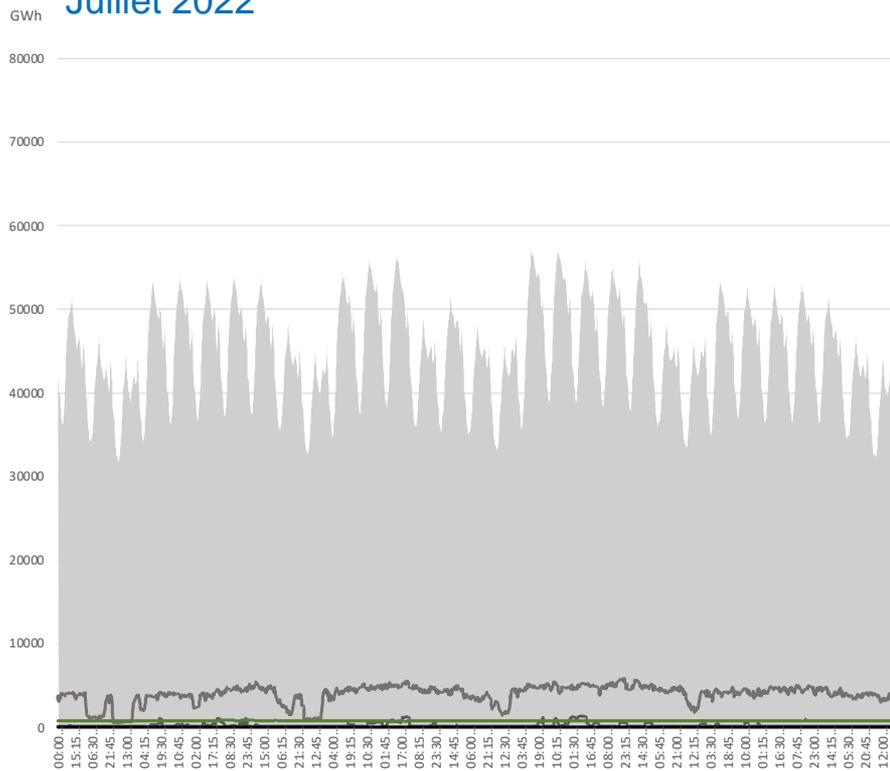


Consommation — Nucléaire — Hydraulique — Photovoltaïque — Éolien

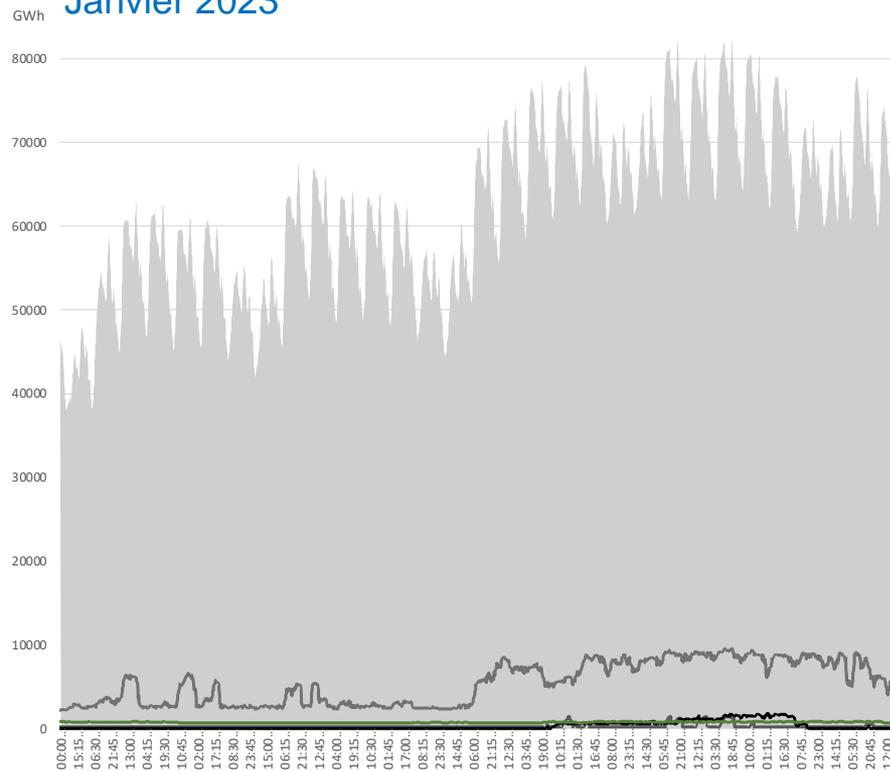
# ↘ Mix électrique France : production thermique



## Juillet 2022



## Janvier 2023



Consommation — Nucléaire — Hydraulique — Photovoltaïque — Éolien — Gaz — Fioul — Charbon — Biomasse

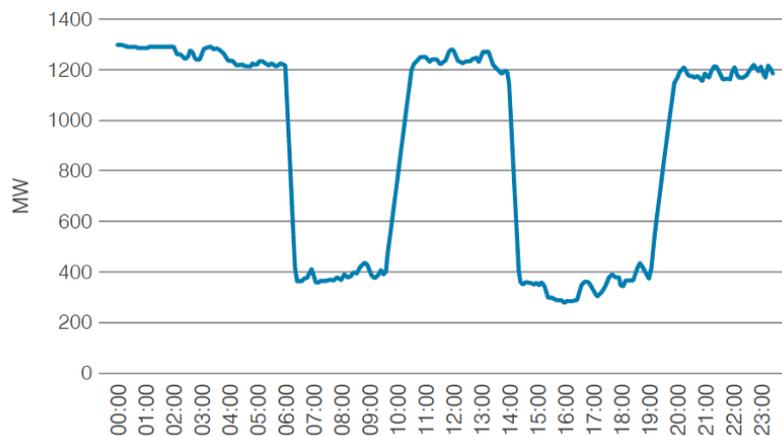
## Sécurité du système électrique



### Capacité de modulation des réacteurs

- Important potentiel en puissance
- Forte limitation en fréquence de suivi
- Impact négatif rapide sur la rentabilité
  
- Dépendance modifiée à la disponibilité des réacteurs pour la sécurité électrique

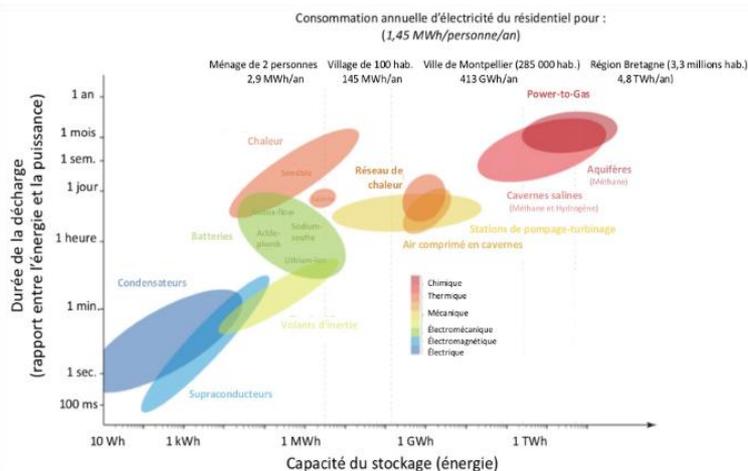
Example of power variations over one day Saint-Alban 2 (1335 MWe)



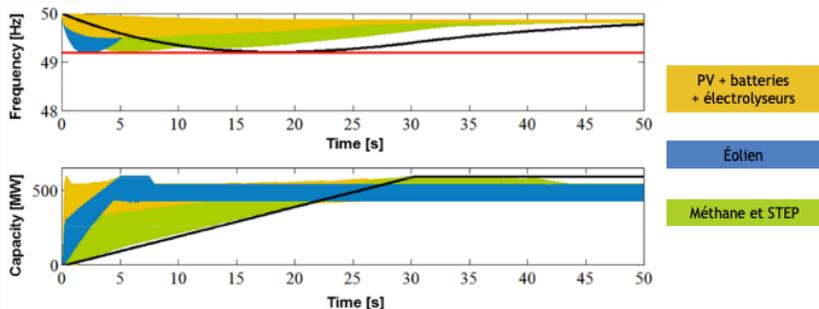
Most of the nuclear reactors in France can reduce their power twice a day, every day, going down to 20% of nominal power in half an hour. However, this theoretical capability is not always used. On average, a reactor performs 15 variations per year, but this figure is increasing because more and more renewable electricity is being injected into the grid.

Stephane Feutry,  
Head of Nuclear Power Performance, EDF

*Electric power output by Saint-Alban 2 nuclear power plant over one day in April 2016. Output was cut sharply twice, in the middle of the night and in the afternoon, with variations from 1,200 MW to 300 MW within half an hour. (Source: EDF)*



©Thema, Sterner, FENES, OTH Regensburg, 2014-, Traduction-adaptation Hespul



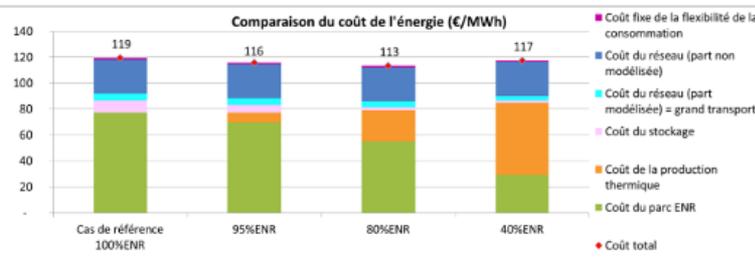
## Synthèse : les différentes solutions envisageables

- 1 Conserver une part de production classique dans le mix de production
- 2 Améliorer le contrôle des onduleurs *grid-following*, avec des contrôles du type inertie virtuelle
- 3 Installer des compensateurs synchrones
- 4 Avoir une partie des convertisseurs qui soient *grid-forming*.

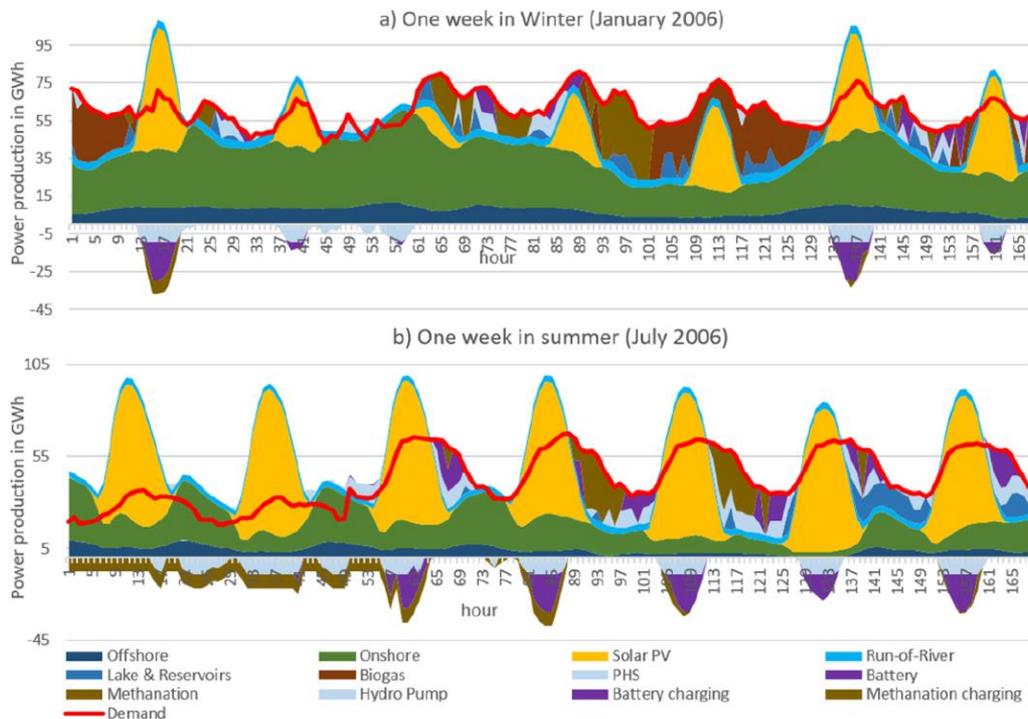
Solutions qui permettent d'atteindre 100% de production ENR à base de convertisseurs

➔ « La » solution résidera probablement dans un mix de ces solutions

La comparaison des coûts en matériel et pertes montre à ce stade que les ordres de grandeurs sont similaires entre l'utilisation de *grid forming* ou de compensateurs synchrones (analyses à prolonger)



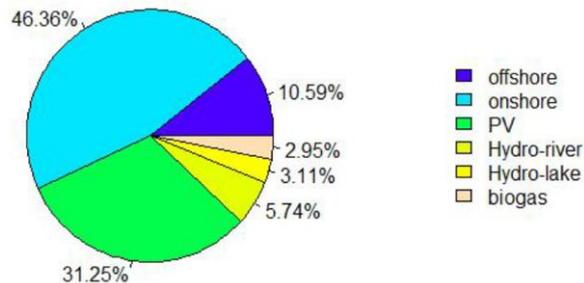
Modélisation : exemple de deux semaines type



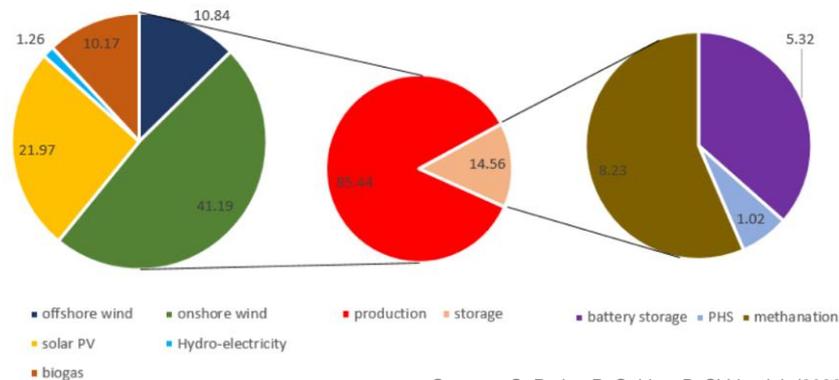
Source : Q. Perier, P. Quirion, B. Shirizadeh (2020)

Coût complet optimisé sur 18 ans

Répartition de la production



Coût total : 21,4 Mds €/an, 52 €/MWh



Source : Q. Perier, P. Quirion, B. Shirizadeh (2020)