



Capsule 1 : éolien

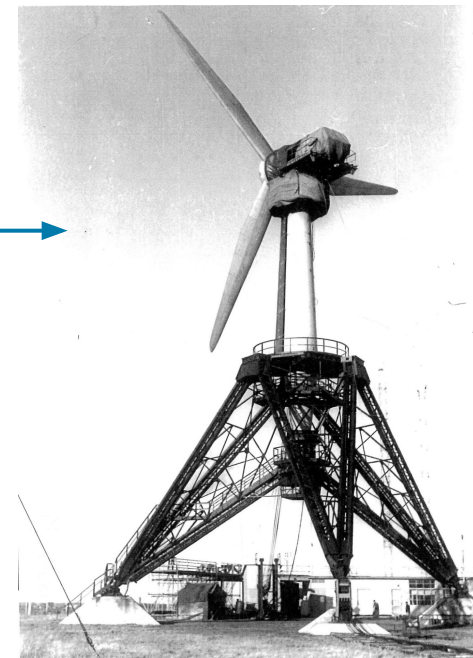
Le vent est utilisé depuis l'Antiquité (moulins), transposé pour l'électricité dès 1887 au Cap de la Hève

Une première éolienne "moderne" fonctionne de 1958 à 1962 (EDF) à Nogent-le-Roi (650 kW)

Programme Eole en 1996 puis tarif d'achat en 2001.

Puissance installée :

- France : 94 MW (2001) ; 1,5 GW (2006) ; 23,4 GW (2023)
- Allemagne : 9700 MW (2001) ; 18 GW (2006) ; 69 GW (2023)



www.eolienne.cavey.org/

La France dispose :

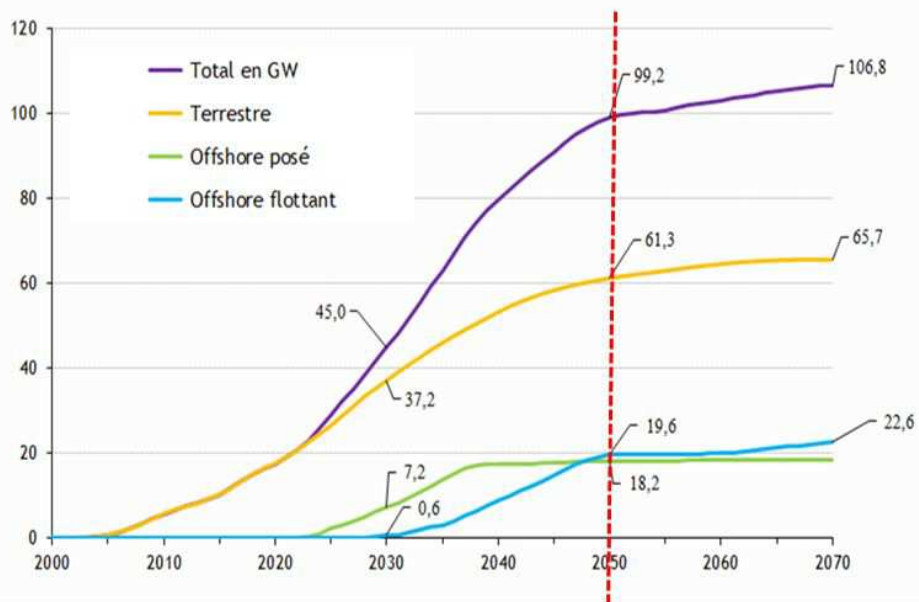
- de vents diversifiés qui en font le 2^e gisement d'Europe
- de la plus grande superficie d'Europe (1,5 fois l'Allemagne)
- d'une des plus grandes longueurs de littoral (5500 km)

= fort potentiel en quantité et en qualité



SCENARIO NEGAWATT 2022

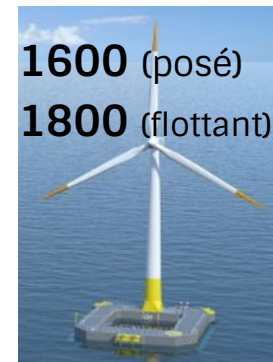
Puissance du parc éolien installé (GW) 2000-2070



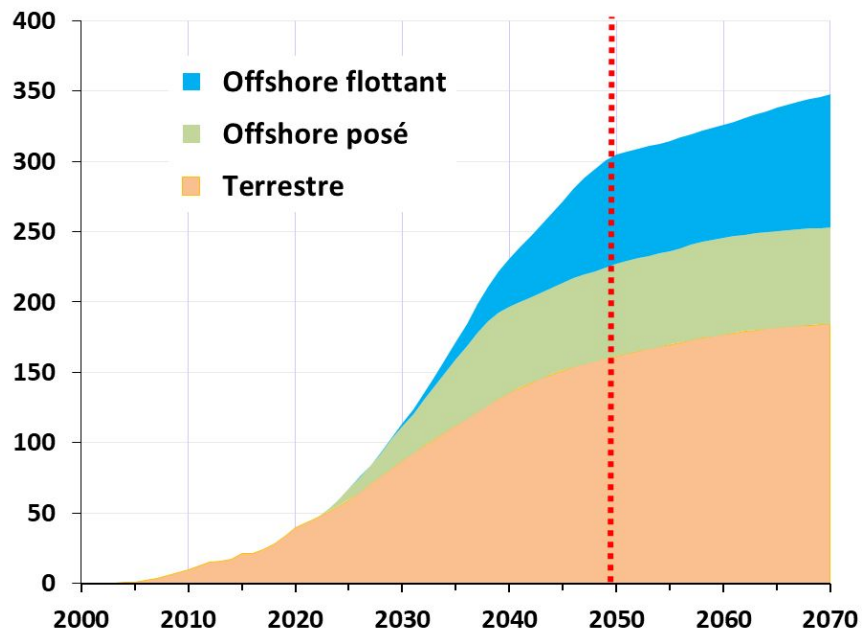
99 GW installés en 2050, dont :

- 61,3 GW sur terre
- 18,2 GW en mer posé
- 19,6 GW en mer flottant

Nombre de mâts :



Production du parc éolien (TWh)



Production de 305 TWh en 2050 :

- 162 TWh éolien terrestre
- 78 TWh éolien en mer flottant
- 65 TWh éolien en mer posé

Eolien = **57%** de la production d'électricité

Amélioration des facteurs de charge de :

- 25 à 30% - éolien terrestre
- 40 à 45% - éolien en mer flottant
- 37 à 40% - éolien en mer posé



Production VARIABLE

Prévisibilité

Observations météo globales et locales permettent de prévoir la production 24h à l'avance, avec une précision de 5%

Foisonnement

La variabilité locale est partiellement compensée par la diversité des régimes de vent au niveau national + la complémentarité avec le solaire photovoltaïque

Stockage

Excédents et déficits de production sont intégrables dans un système avec :

- stockage (batterie, STEP, power-to-gas)
- modulation de la consommation



Les éoliennes tournent 75% à 95% du temps, mais pas souvent à leur puissance nominale

Le facteur de charge exprime un équivalent de fonctionnement à pleine puissance

20% = facteur de charge ancien

En réalité :

	FC moyen actuel	FC nouveaux sites
Eolien terrestre	26%	30-48%*
Eolien en mer	35-40%	50-60%

Définition

**Facteur de charge =
ratio entre**

**la production
annuelle réelle**

**et la production
annuelle théorique
à pleine puissance**

* Source : Wind Europe



Trois réalités à modérer

Béton

Eolien terrestre :
800 tonnes / 3 MW
Scénario nW =
660 000 tonnes/an
soit moins de 1% de
la consommation
nationale de béton
Démantèlement
intégral obligatoire

Terres rares

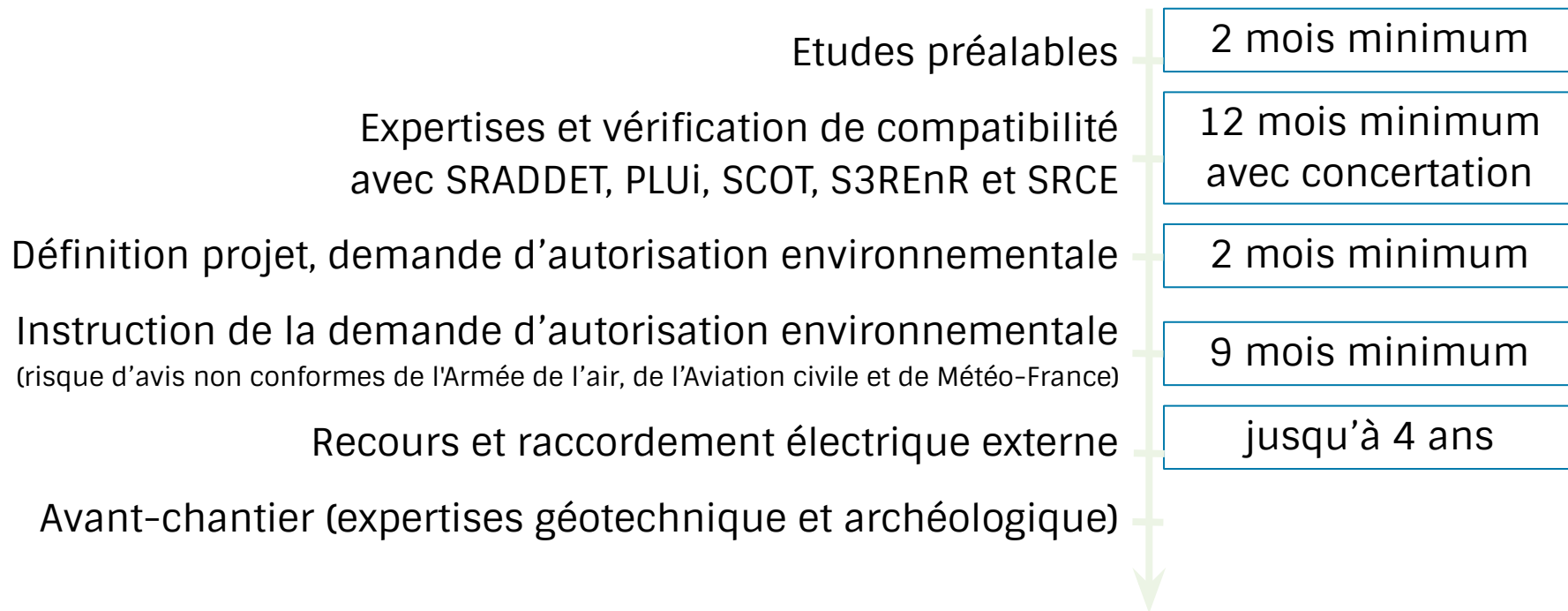
Métaux pas si rares
mais extraction sous
le monopole chinois
Éolien = 4% des
besoins mondiaux →
pour les aimants
permanents des
génératrices à
attaque directe

Recyclage

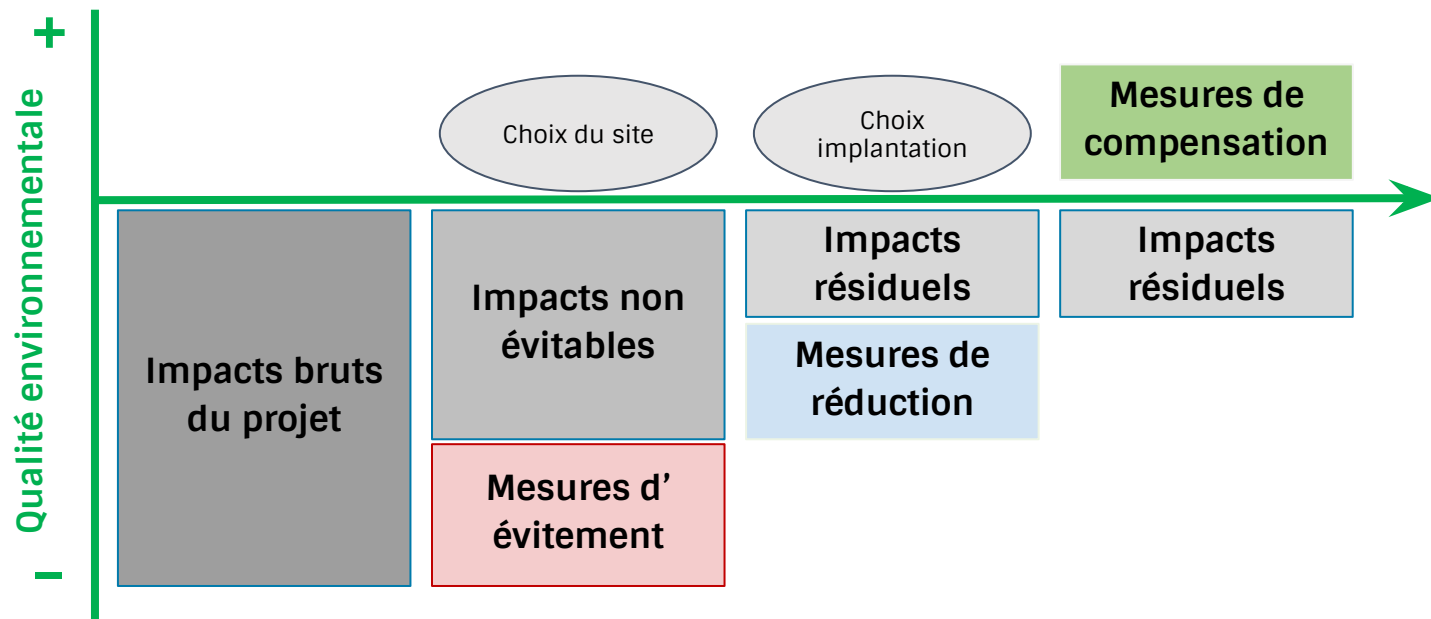
90% du poids d'une
éolienne se recycle
(acier, aluminium,
cuivre, béton*)
Pales en fibres de
verre : broyage
(remblais, incinération)
Nouvelles pales
recyclables en cours

* réutilisation en remblais

Montage d'un projet éolien (hors chantier) = ICPE



Etude d'impact sur l'environnement obligatoire si mâât+nacelle > 50m, avec application d'une séquence Eviter / Réduire / Compenser



Les éoliennes sont de nouveaux éléments dans le paysage

Leur impact paysager est pris en compte dans les études préalables

Des outils (cartographie, photomontage) alimentent la concertation



AVIFAUNE : Risques de collision, de perte de territoire ou d'épuisement par modification de trajectoire (migrations)

Mortalité = 5 à 7 oiseaux par an et par éolienne en moyenne. Beaucoup moins que routes, lignes électriques, pesticides, chasse, chats et immeubles

Niveau de mortalité variable selon les espèces

Approche par espèce selon leur importance pour le patrimoine, leur sensibilité à l'éolien et leur utilisation du site

Solutions : conception (création de couloirs, sens de migration), effarouchement sonore, arrêt préventif ou d'urgence



CHIROPTÈRES : Enjeu nouveau et espèces mal connues.
Besoin d'études complémentaires.

Paramètres importants : hauteur de vol, vitesse du vent, activité nocturne, présence de linéaires boisés.

Solution : arrêt préventif en périodes de vol



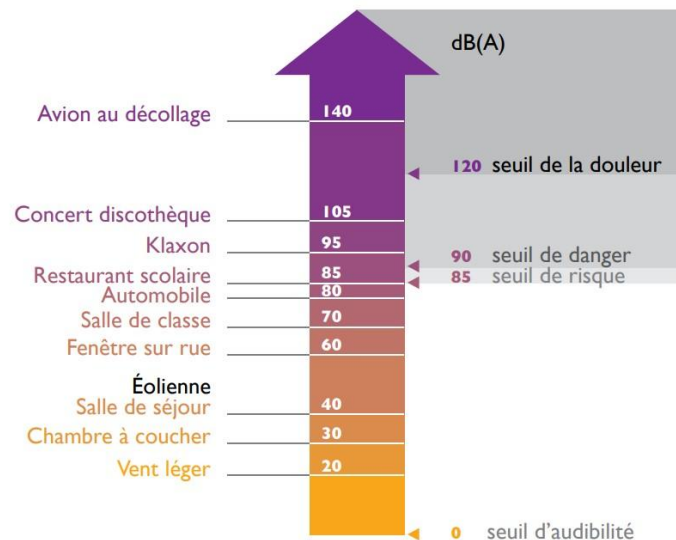
Crédits : Laurent Arthur

FAUNE MARINE : Même considération sur les oiseaux et chauves-souris

S'y ajoutent des problématiques pour la faune sous-marine :

- changement d'habitat : impact variable, possibilité de bio-colonisation
- émissions sonores en phase de travaux (effarouchement, rideaux de bulles)
- émissions électromagnétiques le long des câbles (enfouissement)

Échelle du bruit
(en dB)



Enjeu principal : le **BRUIT** = celui des pales
= 50 dB(A) à 250m ; 40 dB(A) à 500m.

Niveau faible mais perceptible
dans des zones rurales “calmes”.

En France, la réglementation la plus sévère
d'Europe impose :

- 500 m minimum des habitations
- “émergence” max de 3 à 5 dB(A)

- Pour réduire certains effets (bruit, biodiversité, ombres portées), les éoliennes peuvent être bridées par un ralentissement du rotor (donc de la puissance) ou par un arrêt complet
- Exemple sur l'impact sonore : l'éolienne GE 1.5 sl/sle diminue le bruit de ses pales de 3 dB(A) en réduisant sa puissance de 1400 à 900 kW
- Le bridage peut se faire de façon automatisée suite à la détection d'espèces volantes, ou dans des cas pré-identifiés (bruit la nuit, ombres sur des habitations, etc.)
- Impact sur la production d'électricité : 2,1% de production pour le bridage acoustique, moins de 0,5% pour les chiroptères.

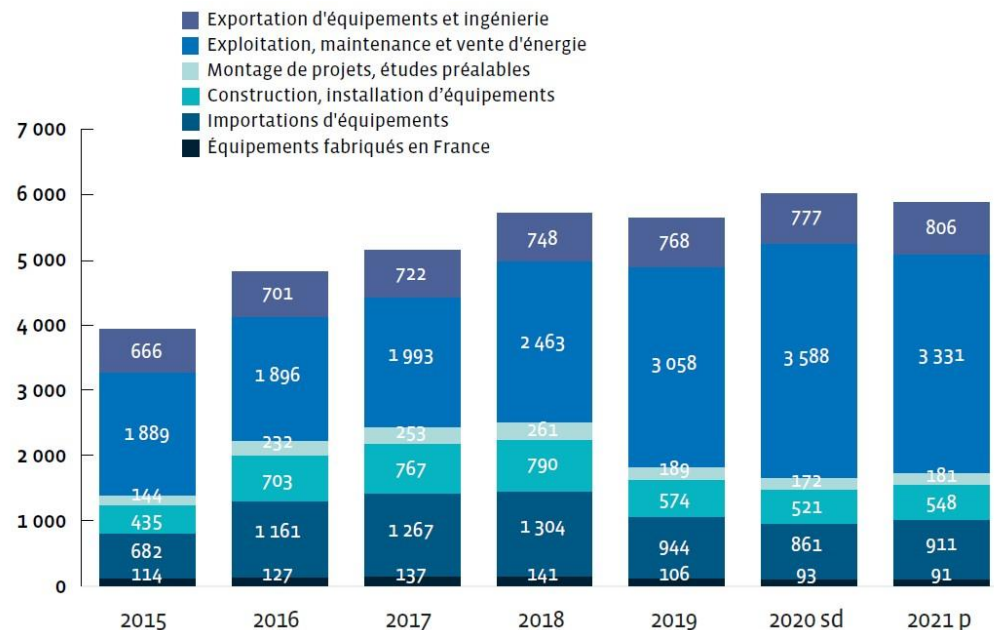
Compétitivité économique : 60-70 €/MWh en terrestre ; 50 €/MWh en mer

Fiscalité locale annuelle :

10 à 15 000 euros / an par MW
pour les collectivités locales

Marché français : environ
6 milliards € / an depuis 2018

Répartition activité éolienne
terrestre (en millions d'euros) →



Eolien terrestre :

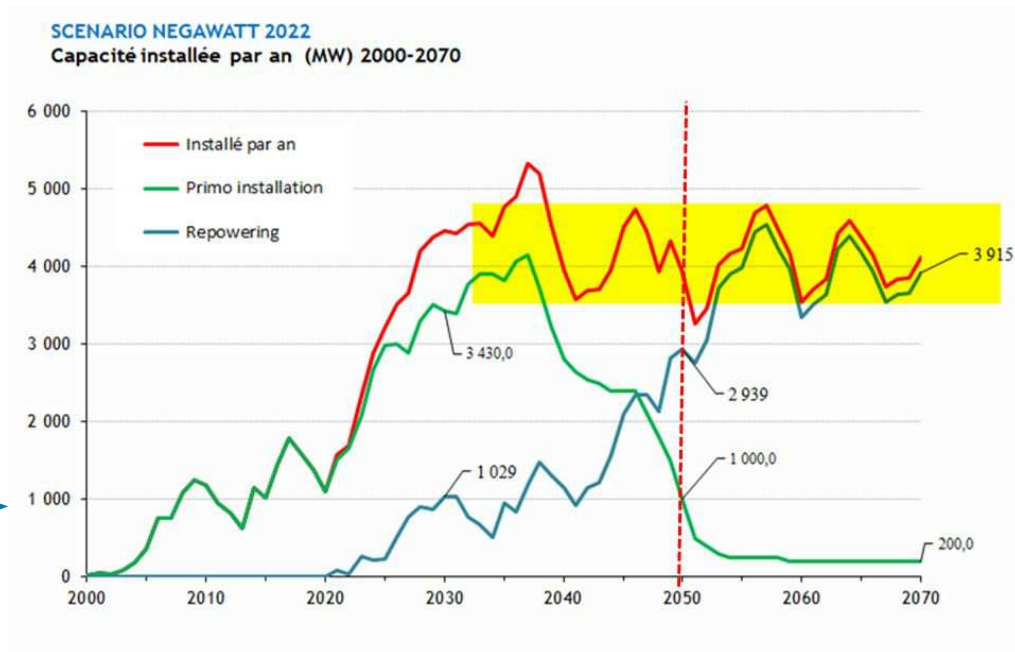
21 000 emplois en 2022

40 à 47 000 en 2035 dans le scénario nW


Eolien en mer :

7500 emplois en 2022

Emplois pérennes sur le très long terme avec le repowering



- L'éolien est une composante essentielle de la transition “négaWatt” en tant que première source d'électricité compétitive
- Sa variabilité se combine avec les autres composantes de la transition pour assurer la sécurité d'approvisionnement
- L'installation des parcs éoliens est encadré réglementairement
- Des mesures de bridage sont déjà prises pour protéger la faune et réduire les impacts sonores

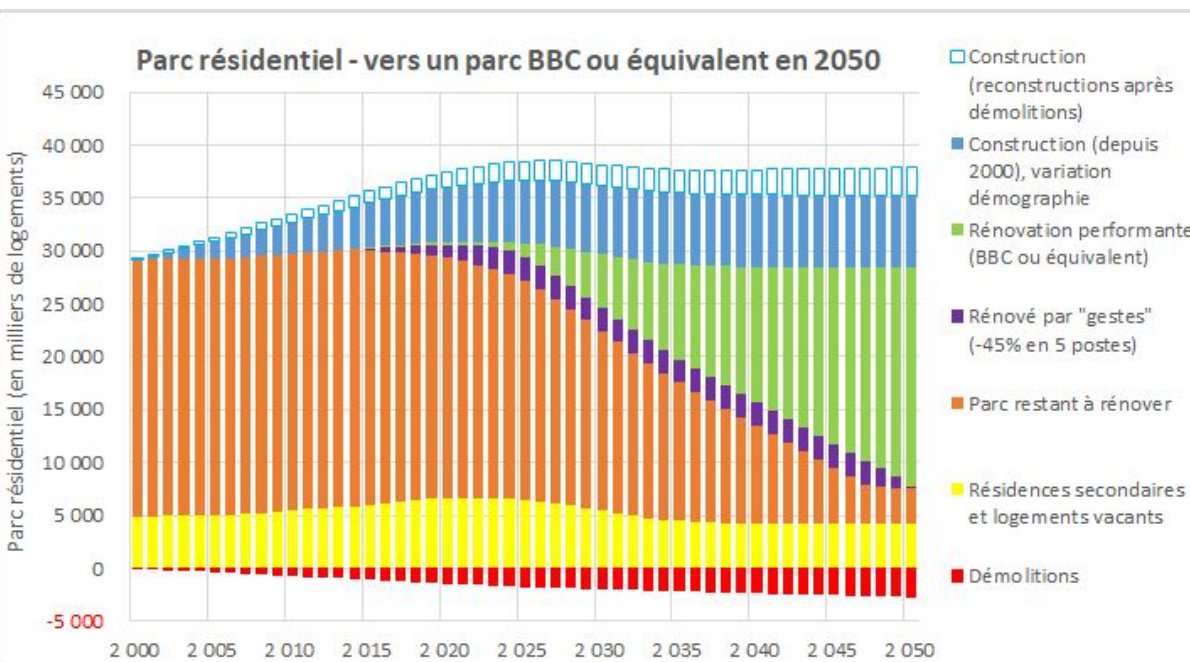


Capsule 2 : bâtiment performant

- Bâtiments = 47 % de notre consommation énergétique
- $\frac{2}{3}$ des consommations des bâtiments concernent le chauffage
- **12 millions** de personnes en situation de précarité énergétique
- Des aides financières qui n'encouragent pas suffisamment les rénovations performantes
- Démarches administratives complexes
- Qualité des travaux inégale

- Fraudes, réalisation (réelle ou fictive) de bouquets de travaux sous-performants en maximisant les aides
- Installation massive de PAC dans des logements peu performants : pourrait générer des problèmes de pointe électrique
- 70 000 rénovations globales en 2023, objectif 200 000 en 2024 (!)
- Perspectives gouvernementales (février 2024) : réduction du budget prévu pour la rénovation énergétique, modification calcul du Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) → diminuer le nombre de passoires thermiques

➤ Scénario négaWatt : évolution du parc résidentiel



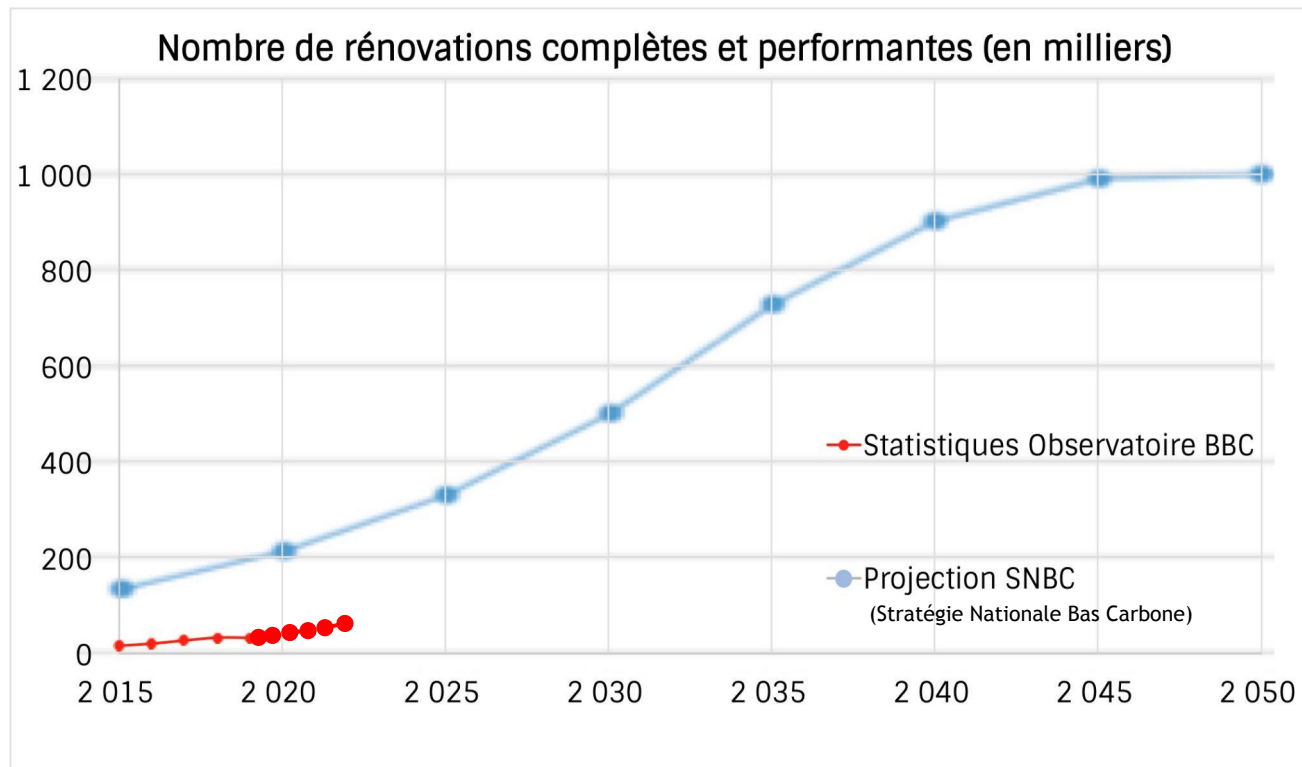
- La **démolition / construction neuve** ne suffit pas à transformer le parc.
- Le rythme actuel de rénovation est insuffisant. Les **rénovations par "gestes"**, actuellement majoritaire, ne peuvent conduire à la performance BBC ou équivalent à terme. (1)
- Les **rénovations énergétiques performantes (BBC ou éq.)** doivent s'y substituer au plus vite.

Pour cela :

- **Réorienter l'ensemble des financements** dédiés à la rénovation vers le niveau BBC ou équivalent

(1) Voir notamment <https://www.ademe.fr/renovation-performante-etapes>

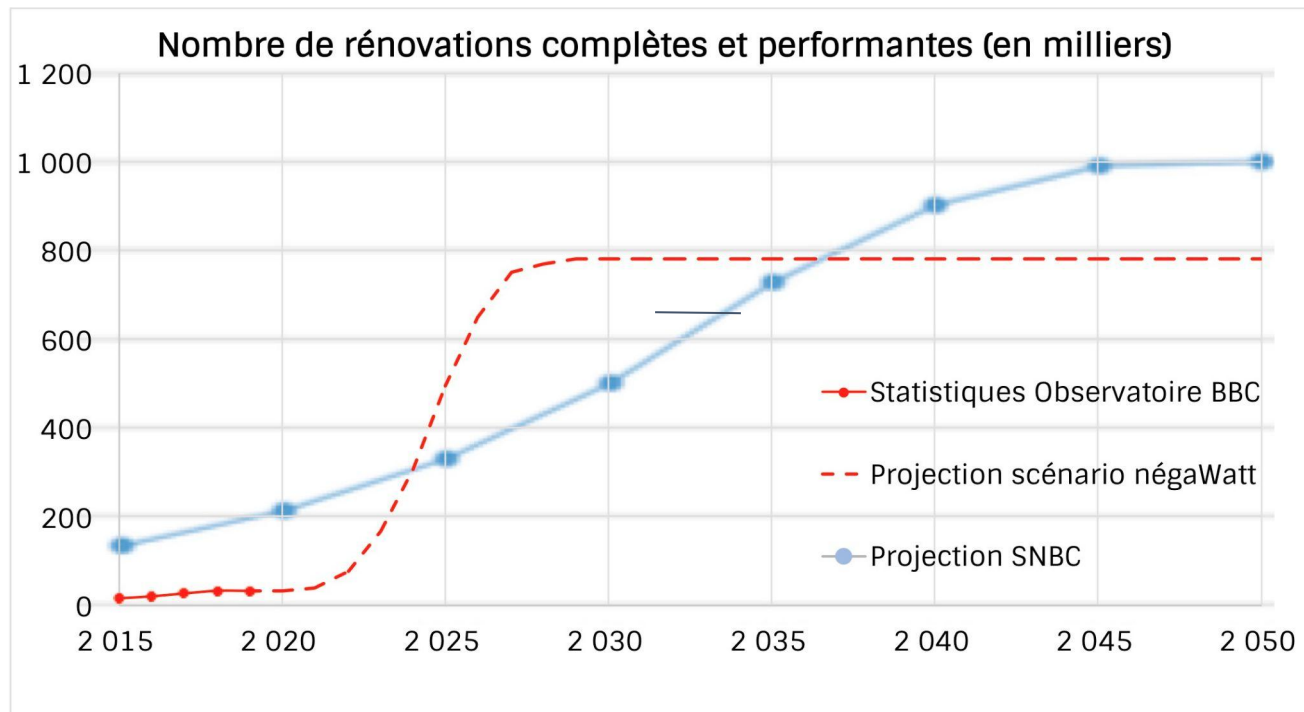
↳ Une accélération radicale de la rénovation performante



La politique actuelle de rénovation n'est pas du tout en phase avec les objectifs de long terme



Accélération radicale de la rénovation performante : objectifs du scénario négaWatt



Objectif :

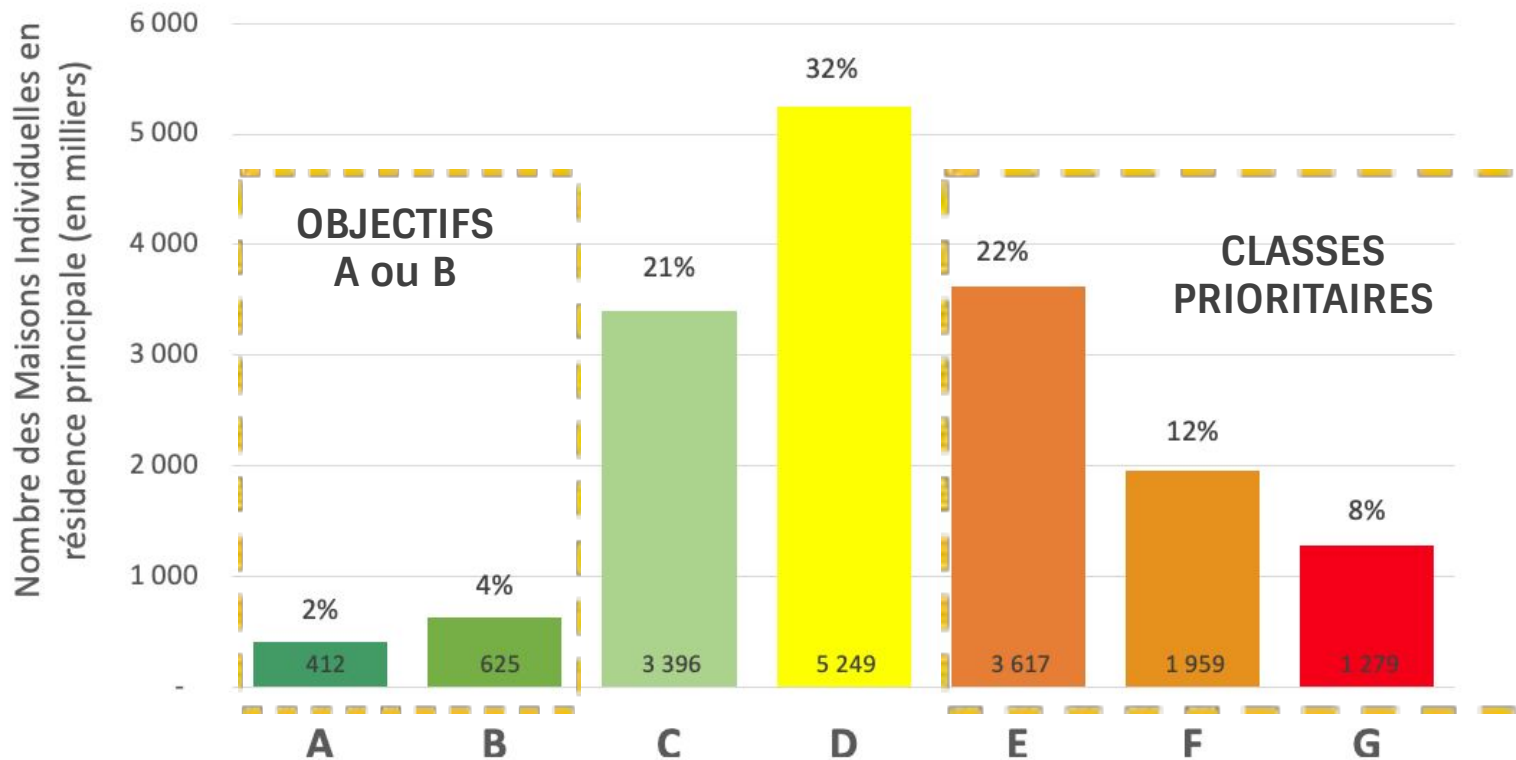
Passer de 70 000 logements rénovés chaque année au niveau BBC à près de 800 000 en 2030.

Mesures prioritaires :

- Une obligation de rénovation performante (sous conditions)
- Une formation renforcée de l'ensemble des acteurs



Répartition classes énergétiques des maisons individuelles



Enjeu central : sortir des rénovations partielles inefficaces...



Maison des années 70

- pas isolée
- pas de VMC
- chauffage au fioul



1^{ère}
année

Changement de
fenêtres et volets



4 ans
après

Chaudière
Poêle
Combles



9 ans
après

Plancher bas



15 ans
après

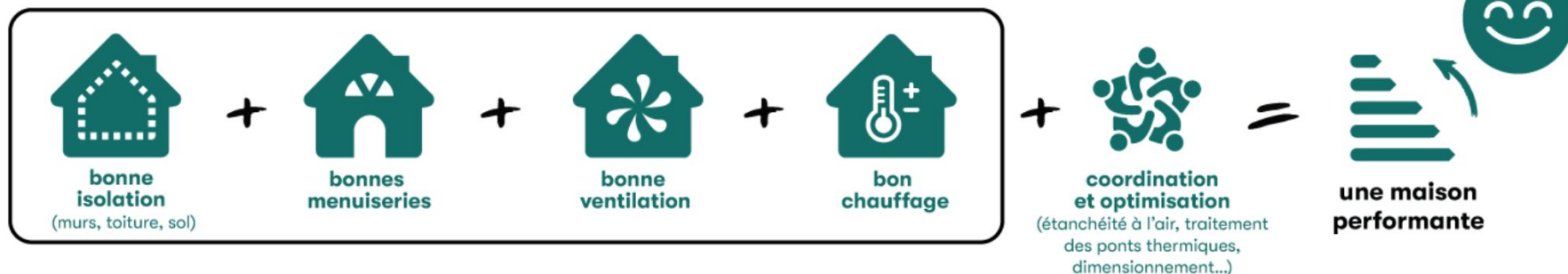
Isolation des
murs



...Ventilation ?



1) Rénovation globale



2) Rénovation PERFORMANTE par étape

➤ Les avantages d'une rénovation performante



Un logement économique
facture divisée par
2 à 9



Un logement revalorisé
+ de valeur
patrimoniale, une
maison plus belle



Un logement sain
un air + pur = santé
préservée



Un logement confortable
chaud en hiver, frais
en été



Un logement écologique
division des
émissions de gaz à
effet de serre

Un exemple parmi tant !



Rénovation performante d'une ferme traditionnelle

Maison en pierres de 1850
180 m² • Rénovée en 2020 • Loiret (45)

Rénovation réalisée par un groupement d'artisans
Dorémi : DANCHOT SARL (maçonnerie, isolation),
ATELIER JL BAUDOIN (menuiserie), BOUCHER SARL
(plomberie, chauffage), PERRET SARL (électricité,
ventilation).

CONSOMMATION
DE CHAUFFAGE
AVANT / APRÈS
TRAVAUX

1927 € / an
Estimation AVANT



381 € / an
Estimation APRÈS

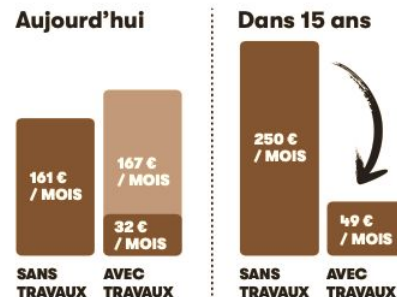


UN FINANCEMENT SÉDUISANT



Document non contractuel - (travaux non énergétiques 80 175€)

ESTIMATION DU COÛT DU CHAUFFAGE PAR MOIS



PRÊT CHAUFFAGE
L'évolution du coût de l'énergie est de l'ordre de 3% par an (4)

Source : dorémi

➤ 100 exemples d'un coup !

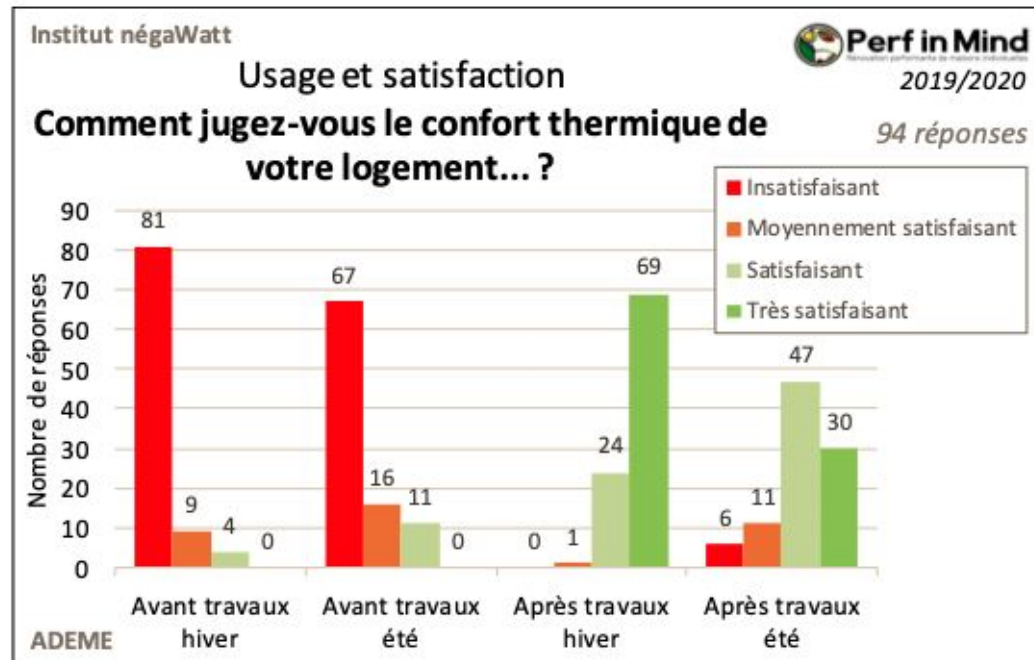


Campagne de mesure sur le terrain sur 106 maisons rénovées à un niveau BBC ou équivalent



Résultats

Besoin de chauffage = 45 kW.h utile /m²/an en moyenne !






Source : Perf in Mind, Enertech, Effinergie, Institut négaWatt et Médiéco avec le soutien de l'ADEME - <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>

Exemples de combinaisons de blocs d'un parcours de rénovation



- PARCOURS = traitement des 6 postes de travaux en 1 à 3 étapes max, avec continuité de l'isolation, étanchéité à l'air et migration de vapeur d'eau.

	Étape 1	Étape 2	Étape 3	Validité
Exemple 1	Murs + Menuiseries + ventilation Plancher bas Chauffage + ECS + pilotage	Toiture		 Valide : respect des 3 étapes max et de l'ordre des travaux
Exemple 2	Murs + Menuiseries + ventilation	Plancher bas Toiture	Chauffage + ECS + pilotage	 Valide : respect des 3 étapes max et de l'ordre des travaux
Exemple 3	Murs + Menuiseries + ventilation	Plancher bas	Toiture	 Non valide : 5/6 lots <input type="checkbox"/> manque Chauffage + ECS + pilotage ou sera fait lors d'une 4 ^{ème} étape <input type="checkbox"/> Non-respect des 3 étapes max. Lot manquant -> nécessité de regrouper des lots

- Travaux : reste à charge à 0 € pour les ménages très modestes et aides décroissantes selon la performance et les niveaux de revenus
- Accompagnement :
 - **Ménages modestes et très modestes : systématique avec une prise en charge à 100 %**
 - **Mutation : accompagnement systématique pour tous les acquéreurs**
 - **Ménages intermédiaires et supérieurs : au choix du ménage avec prise en charge partielle (à terme systématique)**

Scénario négaWatt : forte réduction des consommations d'électricité dans le bâtiment - exemples



Résidentiel



-40 %



Baisse de 35 % de l'équipement en sèche-linge



Isolation des ballons + réducteurs de débit
→ division par deux des consos d'énergie liées à l'eau chaude



Réfrigérateurs combinés plutôt que plusieurs appareils

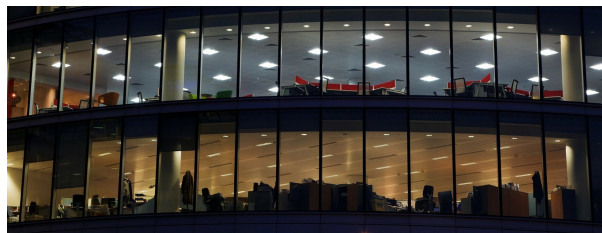
Un seul grand écran par foyer



Tertiaire



-33 %



Electricité spécifique tertiaire :
arrêt des appareils qui fonctionnent pour rien
→ 30% d'économie

➤ Scénario négaWatt : tertiaire - réduction de la consommation d'électricité ... des EXEMPLES !



Bureaux : bâtiment Echat (CD 94)
7716 m²_{SHON} de bureaux, 200 agents

Facture énergie
≈ **110 k€/an**

Économies identifiées sur
auxiliaires CVC : **-22 k€/an**
(-20% sur facture totale !)

*Mesure des consommations
réelles pendant 1 an*



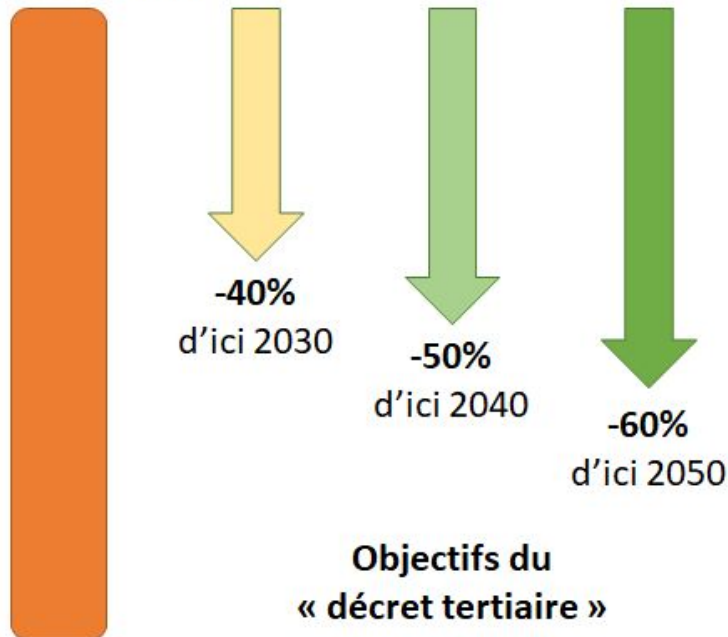
Enseignement : Collège Ronsard
(CD 94)
7208 m²_{SHON}, 700 élèves

Facture énergie
≈ **57 k€/an**

Économies identifiées sur
auxiliaires CVC : **-11 k€/an**
(-19% sur facture totale !)

➤ Rénovation du parc tertiaire - le “décret tertiaire”

Consommation de
référence
d'un parc tertiaire



➤ Vigilance à ne pas “tuer le gisement d’ économie” avec les objectifs intermédiaires du décret tertiaire.

Pour cela :

- **Faire évoluer le décret tertiaire** pour favoriser les rénovations BBC et éviter le saupoudrage d’actions non coordonnées.



Financer la rénovation des parcs de bâtiments tertiaires

INTRACTING = INTernal ContRACTING

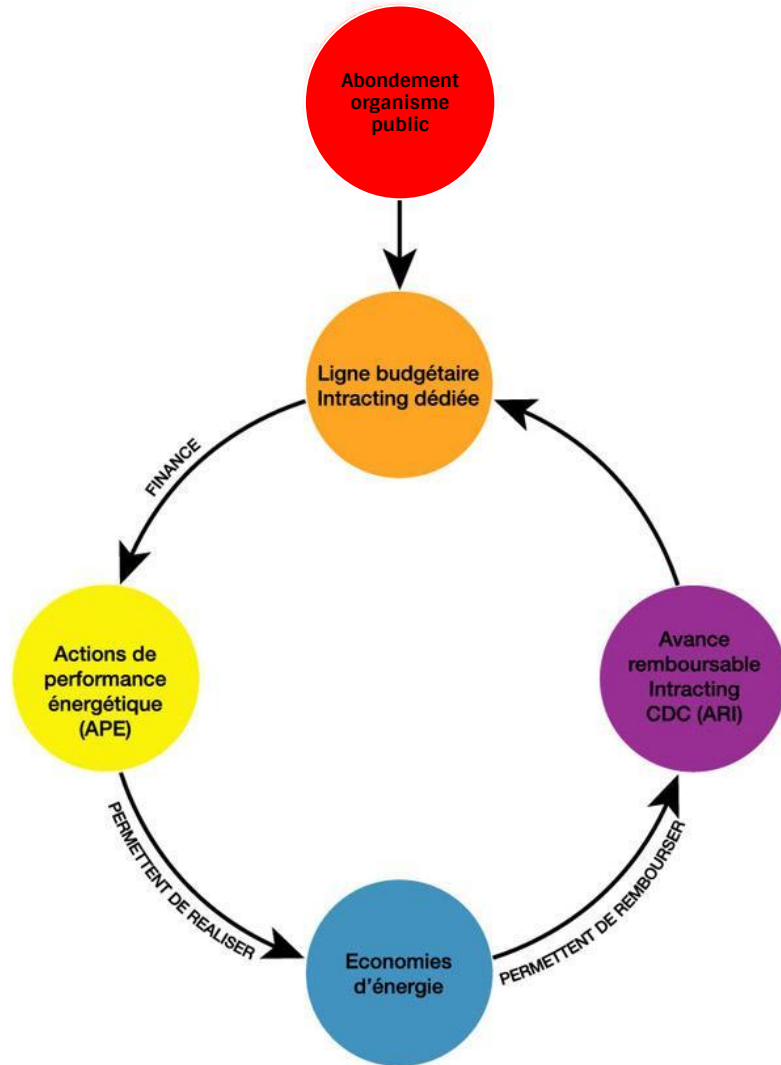
Dispositif orienté pour la rénovation performante des bâtiments publics

Solution à la gestion « en silo »



<https://www.caissedesdepots.fr/decouvre-z-lintracting-grace-au-temoignage-dun-client-de-la-caisse-des-depots>

*A budget d'investissement égal, il vaut mieux rénover de façon **performante** peu de bâtiments, que rénover partiellement un grand nombre de bâtiment..*





Ne pas “tuer le gisement” d'économie d'énergie → systématiser performantes (BBC) et complètes (toiture, murs, sols, ventilation, chauffage)



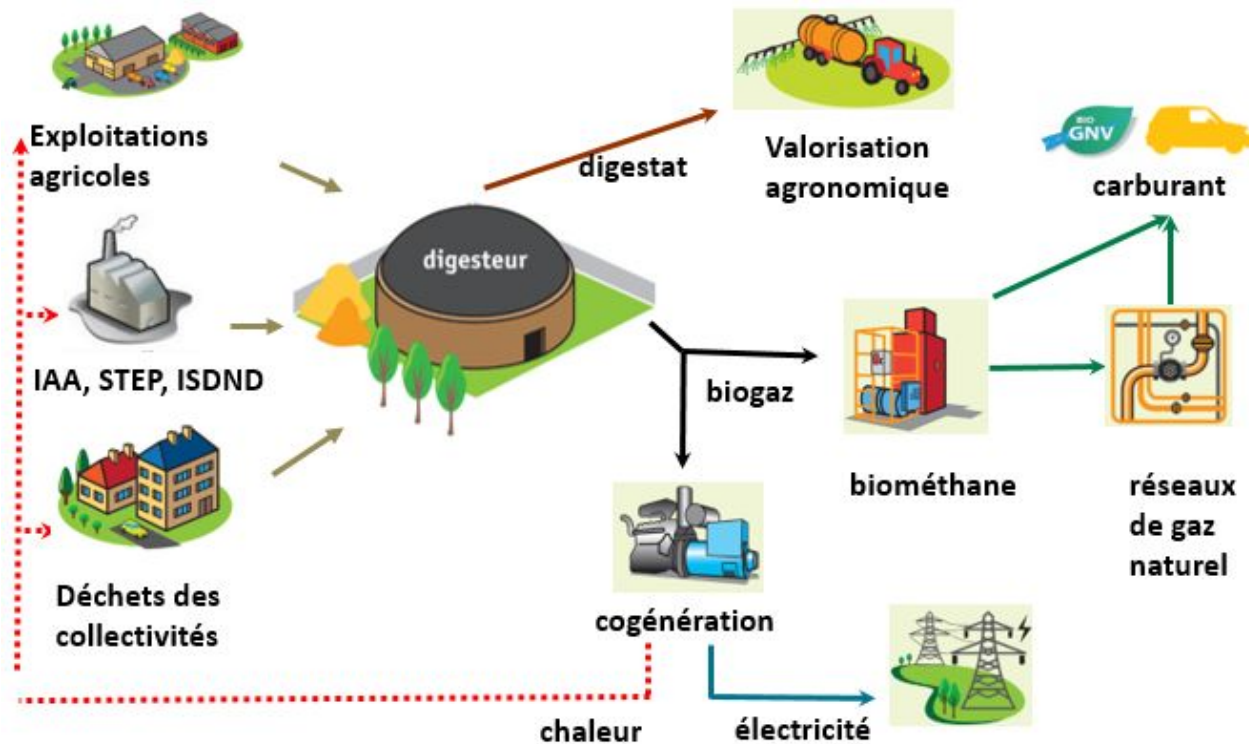
Scénario négaWatt : le parc bâti existant entièrement rénové, à raison de 800 000 logements rénovés / an dès 2030



Améliorer les systèmes d'aides financières et techniques = crucial !
En particulier pour aider les 12 millions de personnes en situation de précarité énergétique



Capsule 3 : méthanisation



Bactéries méthanogènes = êtres vivants les plus anciens

Processus de dégradation de la matière organique identifié au XVIII^e et XIX^e siècle ; biogaz à la ferme dès les années 1930

Soutien public à la **cogénération du biogaz** : 2001 (biogaz de décharge) puis 2006 (biogaz de méthanisation) via un tarif d'achat de l'électricité

Soutien des Fonds Déchets et Chaleur de l'Ademe

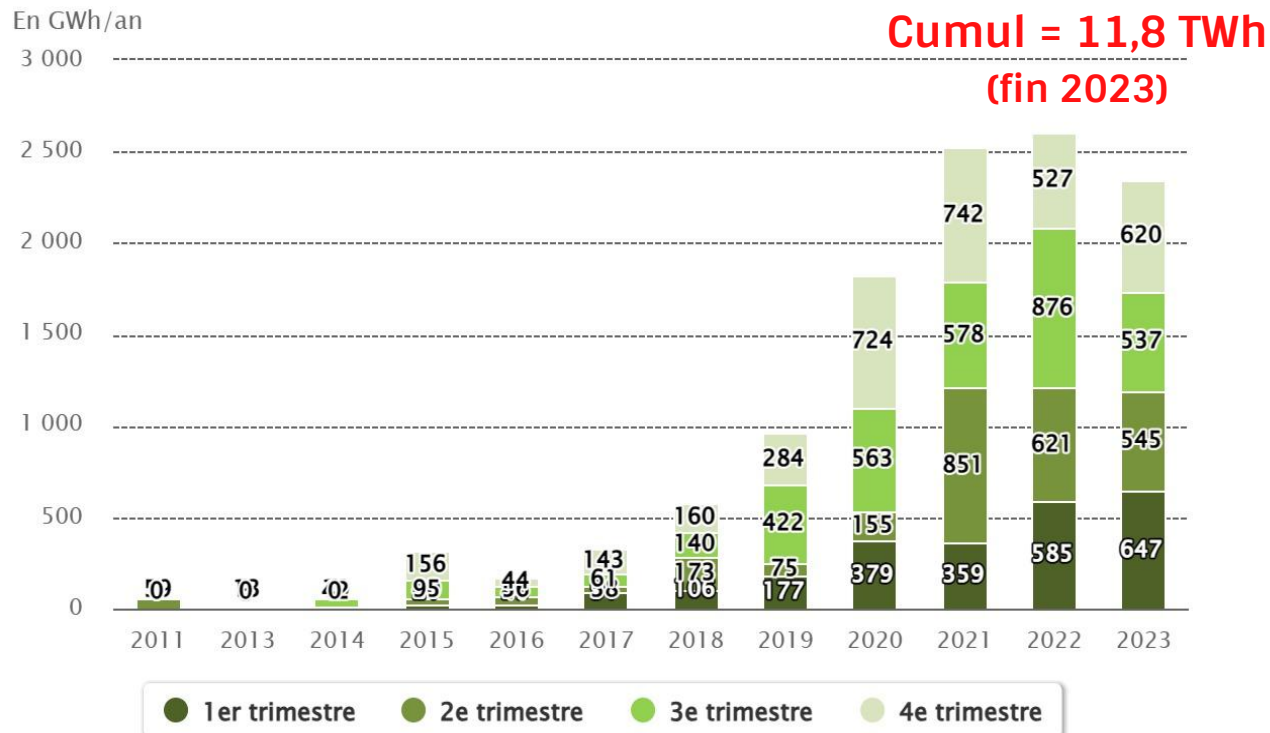
Fin 2023 : 1065 installations en cogé / 3 TWh / 590 MW_e

Méthanisation : 307 MW_e. Objectif PPE : 340-410 MW_e



A partir de 2011, création d'un tarif d'achat du **biométhane injecté** sur le réseau de gaz + implication des gestionnaires de réseau pour "verdir" le gaz = accélération de la filière après 2018

Capacité maximale de production des nouvelles installations par trimestre



Différentes réglementations s'appliquent à la méthanisation :

- Classification dans le Code de l'environnement selon la nature des intrants
- Régime d'Autorisation, d'Enregistrement ou de Déclaration selon le tonnage journalier et l'origine des intrants → niveau des contrôles

Les installations doivent respecter la législation sur l'eau, les réglementations sanitaires, le périmètre de protection des captages publics, le code de l'urbanisme et le code de l'énergie

Les intrants issus de cultures principales sont limités à 15% du tonnage brut total des intrants



Favoriser la transition agro-écologique

- Reconception des systèmes de cultures
- Stratégies de sécurisation des ressources fourragères
- Recyclage nutriments (NPK)
- Optimisation matière organique



Produire énergie et CO₂

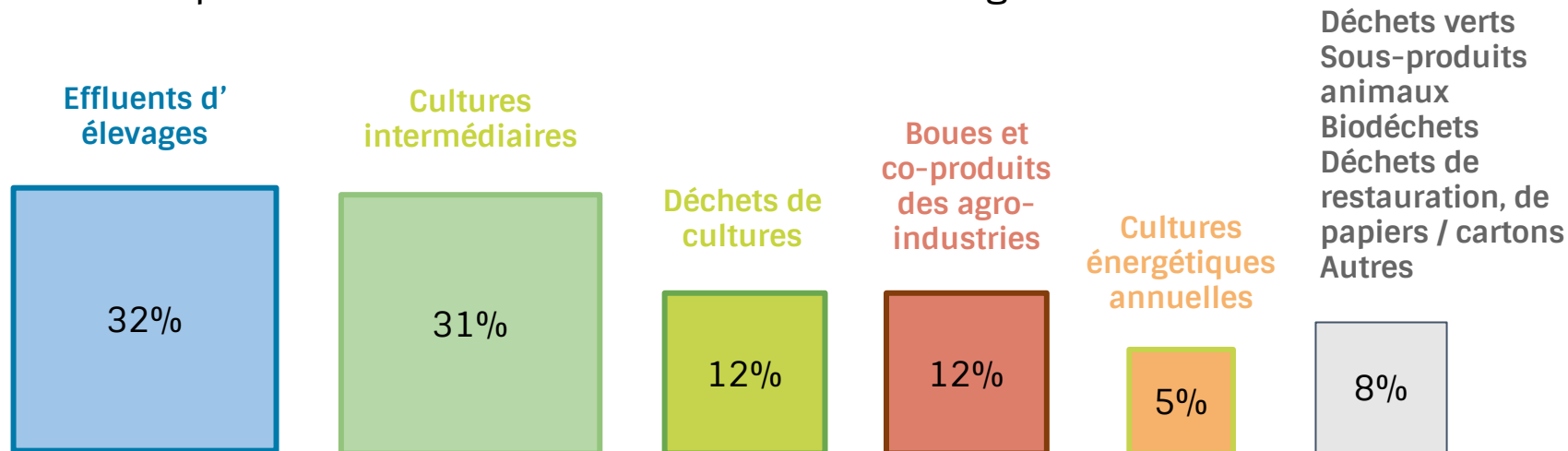
- Biométhane
- Carburant
- Méthanation

Créer un outil socio-économique

- Bioéconomie rurale, territoriale, circulaire
- Multi-fonctions et co-productions
- Outils collectifs accessibles à tous

La méthanisation permet d'utiliser des déchets organiques et d'éviter leurs émissions directes de gaz à effet de serre (par incinération ou dégradation naturelle)

Principaux intrants utilisés en méthanisation agricole :



- Culture intermédiaire = couvert végétal entre deux cultures principales permettant de :
 - **réduire les phénomènes d'érosion, le développement des adventices (mauvaises herbes) et le lessivage des minéraux**
 - **améliorer la structure du sol et le stockage de carbone (système racinaire) et augmenter la biodiversité**
- Les CIPAN (piège à nitrate) sont déjà obligatoires dans certaines zones
- Les CIVE donnent une vocation énergétique à certaines cultures intermédiaires = une ressource précieuse pour la méthanisation



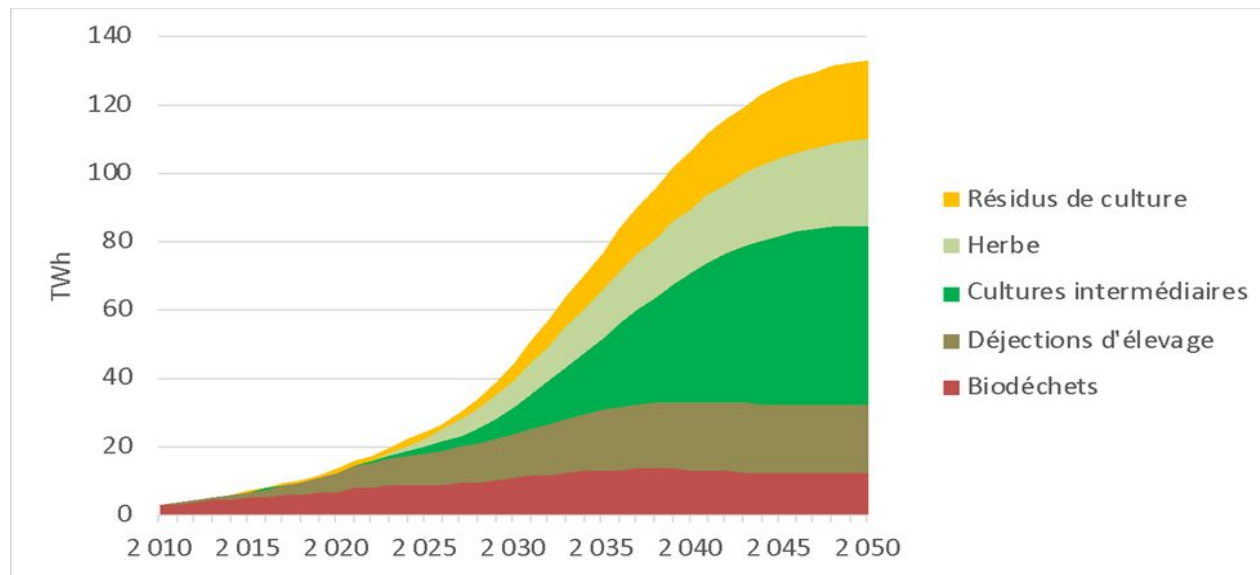
Scénario négaWatt /
Afterres :

Forte dynamique
(max de 500 méthaniseurs
par an vers 2030),
→ 6000 à 8000
installations en 2050

CIVE = 45% de la
production

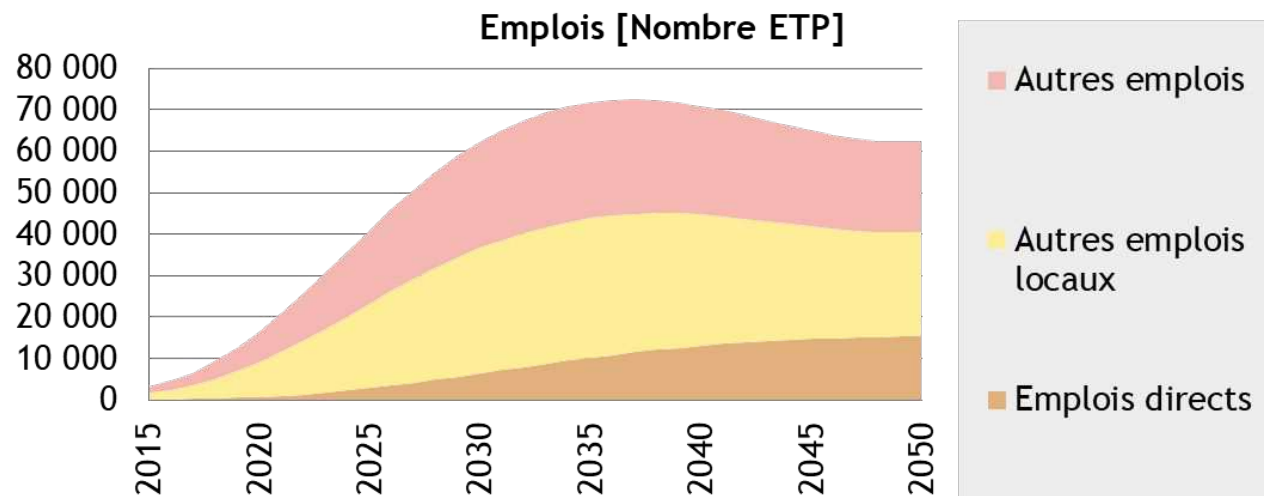
Equilibre entre :

- les utilisations : herbe pâturée, herbe conservée (foin, ensilage), herbe et fourrages méthanisés, surplus (dont engrais verts)
- les ressources : prairies permanentes, terres arables (graminées, légumineuses, cultures fourragères / maïs ensilage), cultures intermédiaires (sur grandes cultures)



Création de 60 000 emplois directs et indirects dès 2030

Secteur d'activité = 5 milliards d'euros / an, soit 8% du CA de l'agriculture



A la valorisation énergétique du biogaz s'ajoute la **valorisation agronomique** du digestat, qui permet un retour au sol des matières organiques

Le digestat est un **fertilisant** des sols qui évite de recourir à des engrais de synthèse issus des énergies fossiles. Il peut-être traité (séparation des phases liquides et solides, compostage) avant son utilisation

Il doit faire l'objet de **plans d'épandage** pour répartir l'azote et le phosphore en fonction des autres pratiques (élevage) afin d'éviter l'eutrophisation des milieux aquatiques



Crédit photo : EVALOR

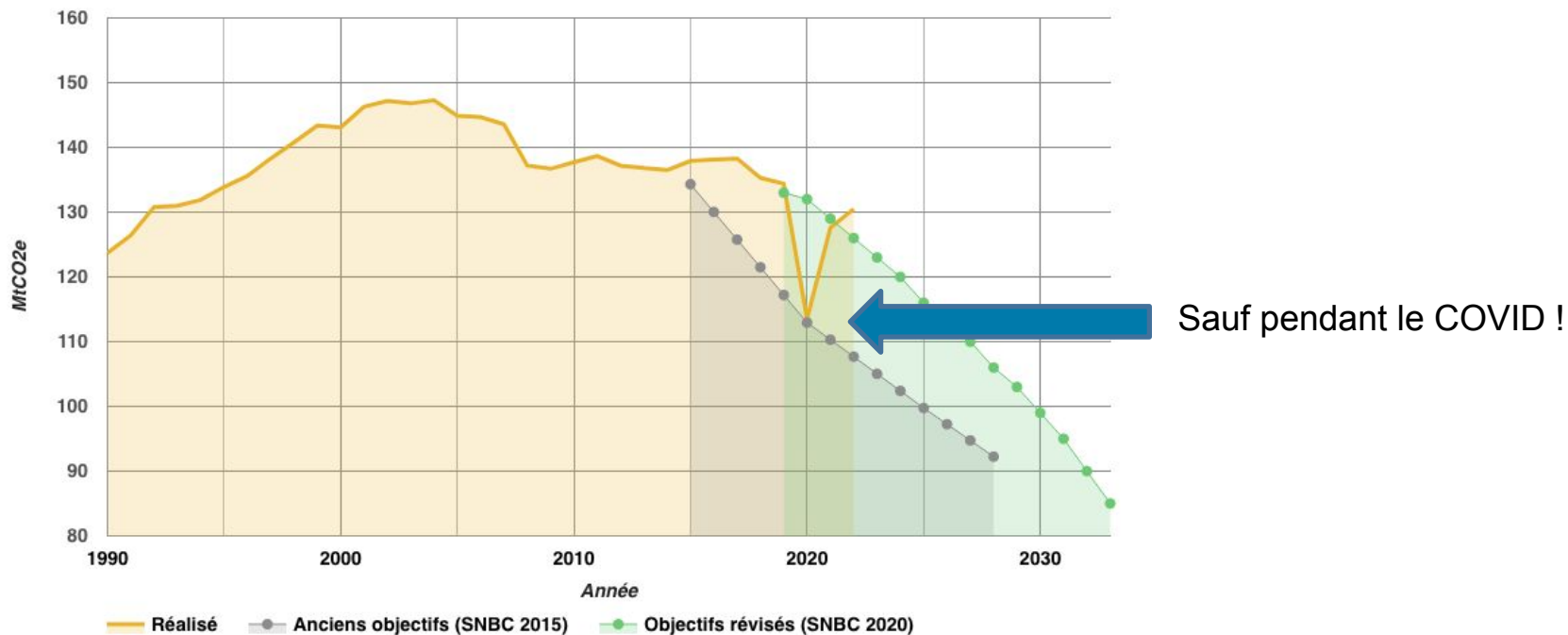
- **Risques explosifs.** Les installations de méthanisation sont soumises à la réglementation ATEX
- **Émissions de gaz :** fuites de CH_4 durant le stockage des intrants, NH_3 lors du stockage du digestat, N_2O après épandage,.
- **Qualité des digestats.** Risque de présence de contaminants biologiques (issus des effluents d'élevages) ou chimiques
- **Odeurs.** Stockage des intrants + épandage (ammoniac / surtout sur le digestat liquide)

- La méthanisation est une composante essentielle de la transition “négaWatt” en tant que première source de gaz renouvelable
- Elle est un outil de la transition agroécologique, en vue de protéger les ressources (eau, sol, aliments) et la biodiversité, tout en soutenant l’activité des agriculteurs
- L’exploitation doit être rigoureuse pour gérer la matière vivante avant, pendant et après la méthanisation
- Une approche territoriale est souhaitable (choix des implantations, approvisionnement en matières premières, épandage du digestat...)



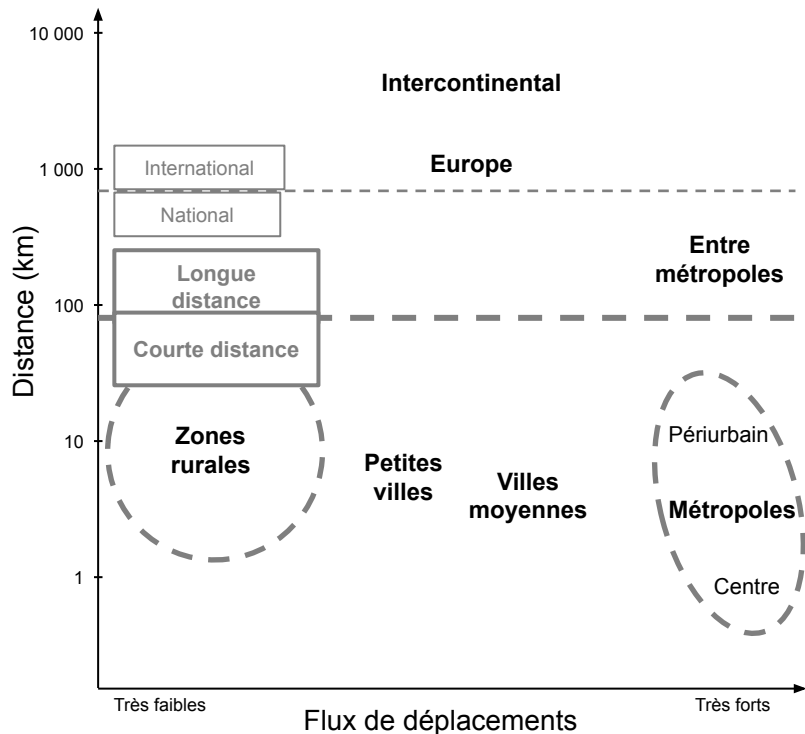
Capsule 4 : mobilité sobre

Transport : la France ne respecte pas ses objectifs climatiques

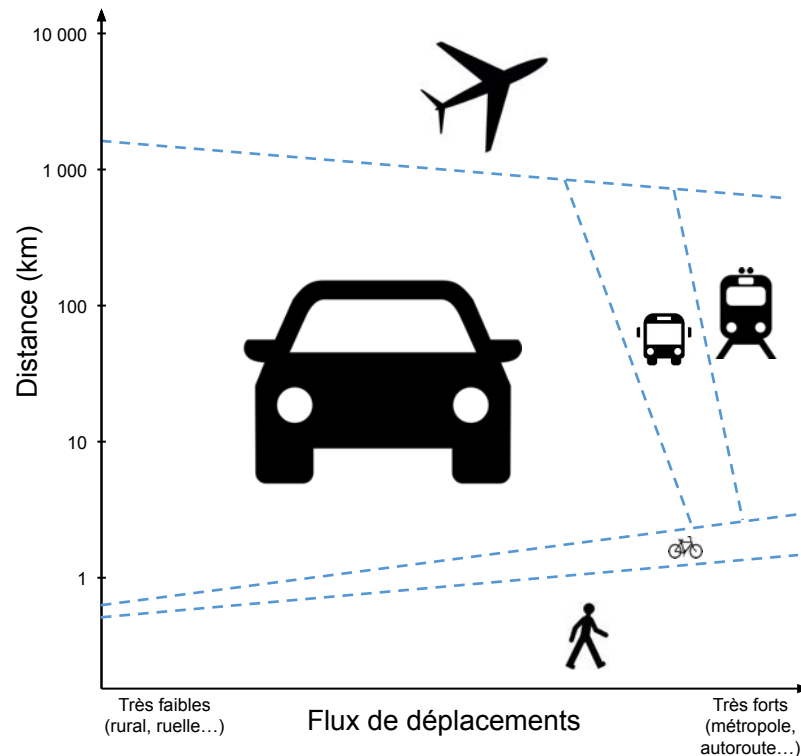


➤ Situation actuelle

Types de déplacements et de territoires



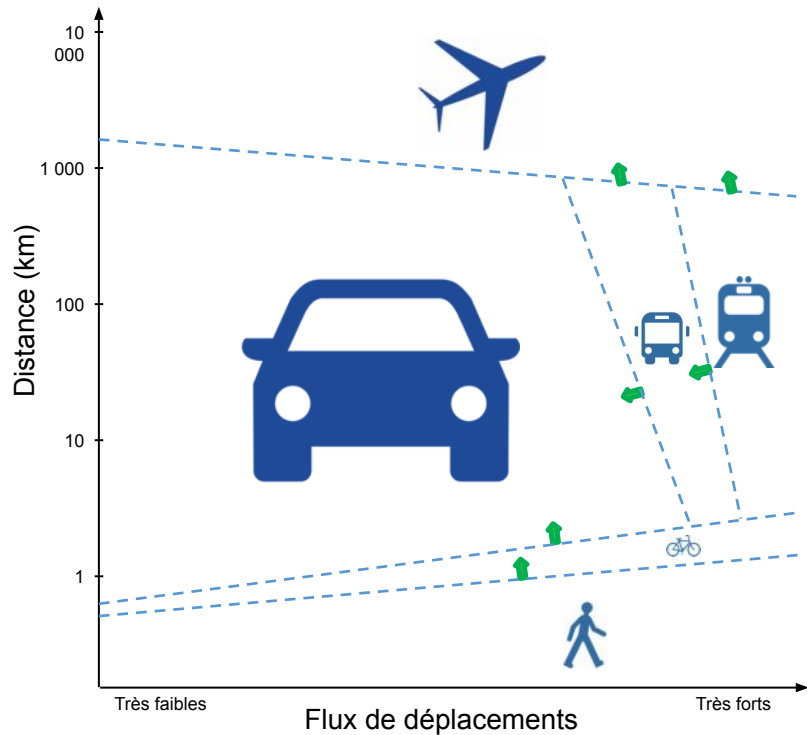
Modes dominants actuellement



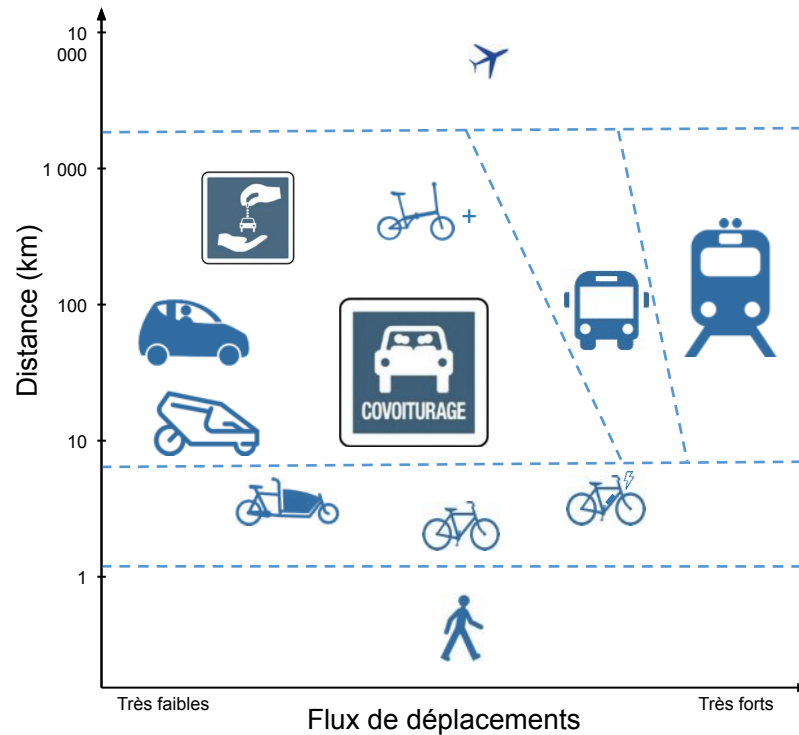
Source : Aurélien Bigo

➤ Quelles solutions selon les territoires ?

Modes dominants actuellement

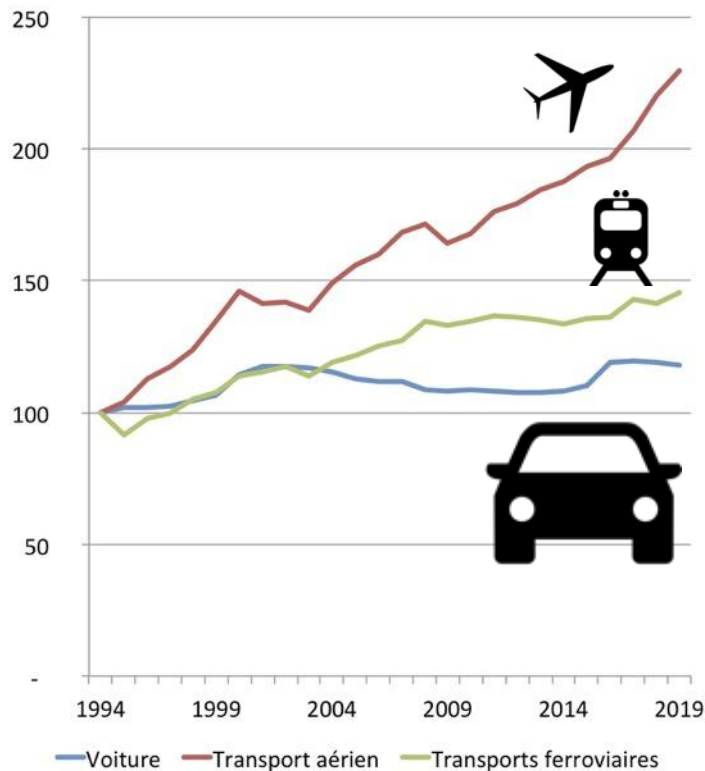


Solutions les plus sobres à développer

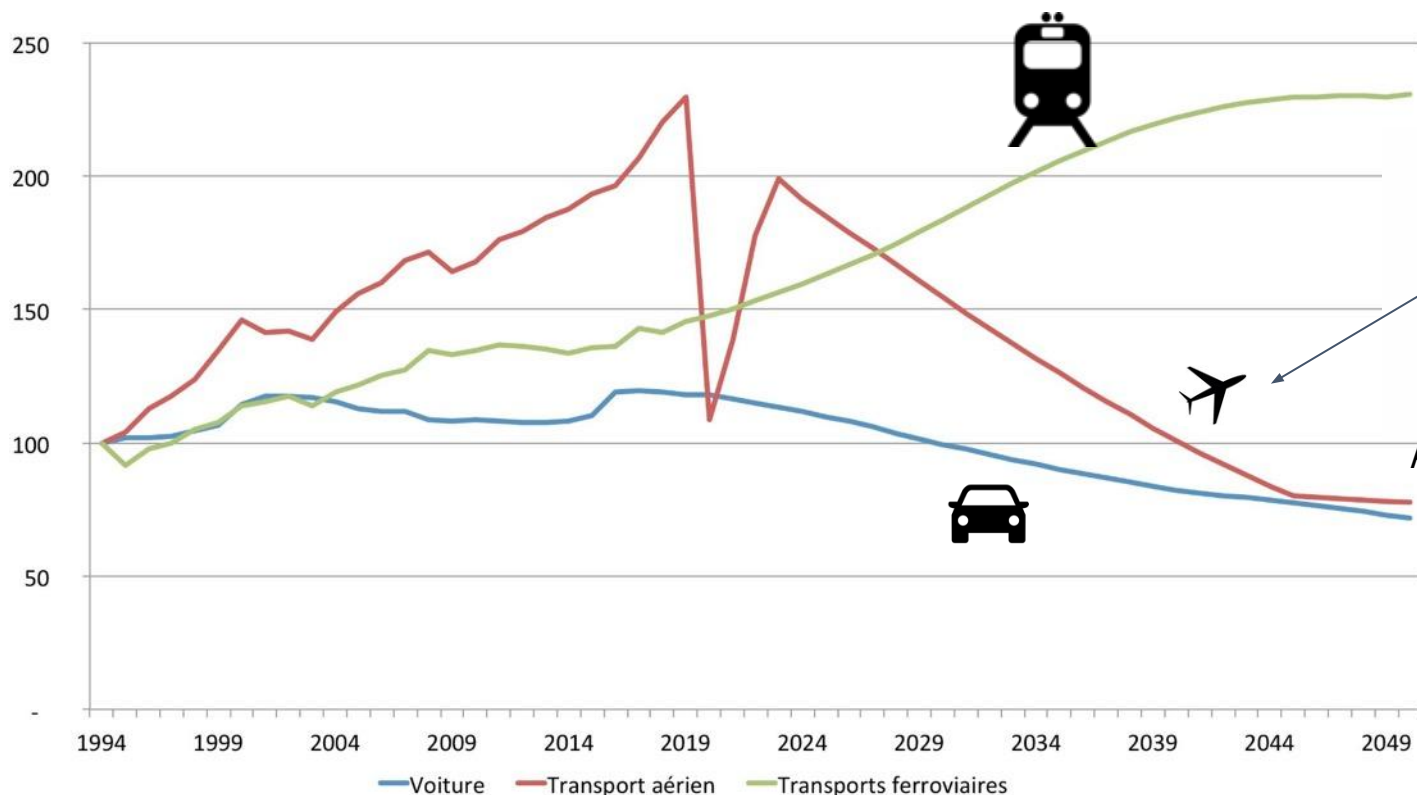


Source : Aurélien Bigo

➤ Évolutions d'ici 2050 dans le scénario négaWatt



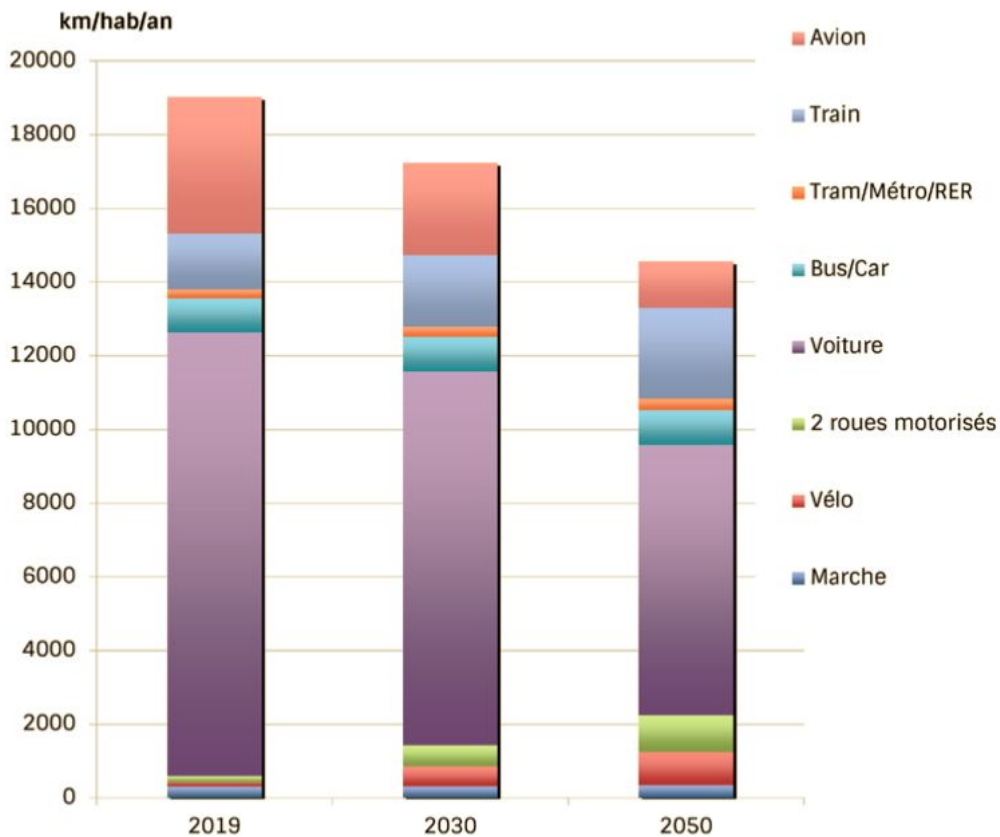
2^{ème} levier : moins de trafic aérien, plus de trains



Années 70



➤ Scénario négaWatt : évolution des distances parcourues



↳ Transport : quels leviers d'action publics ?



Intercommunalités

Modification des flux financiers grandes infrastructures

- Arrêts du financement des nouveaux projets routiers et aéroportuaires
- Investissement dans le ferroviaire et modes actifs

Accompagnement des transitions professionnelles

Evolution de la fiscalité et des politiques tarifaires

Soutien au covoiturage, télétravail

Incitations sur taille/poids des véhicules

Limitation des vitesses

Modification des flux financiers grandes infrastructures

- Arrêts du financement des nouveaux projets routiers
- Investissement dans le ferroviaire

Offre transports scolaires

Offre trains régionaux

Accompagnement des transitions professionnelles

Politiques d'urbanisme

- priorité aux modes actifs et transports en commun dans les aménagements
- répartition géographique logements/commerces/services/emplois/etc.

Offres de transports en communs

Offre de covoiturage au quotidien

Offres de véhicules partagés

↘ Quelles évolutions sur les infrastructures de transport en France ?

Entre 2005 et 2020...

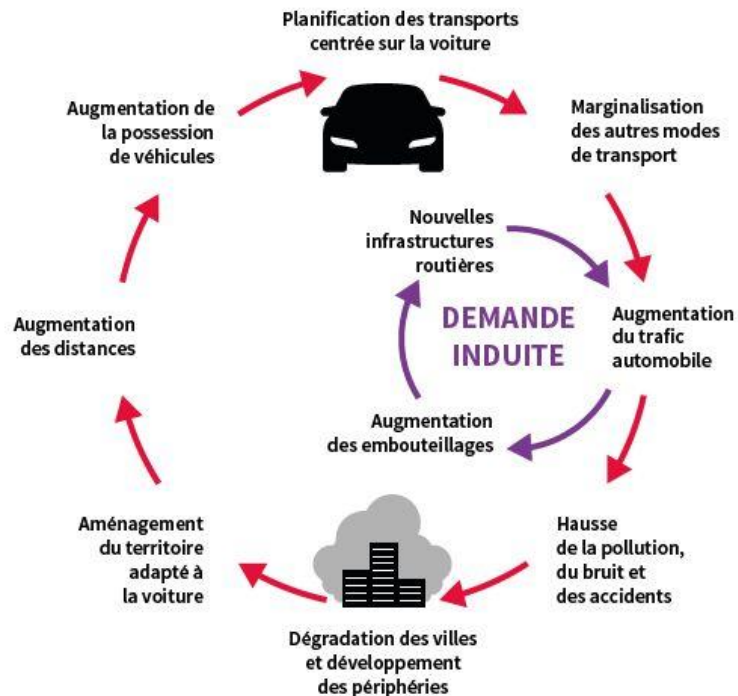


+ **120 000 km** de routes supplémentaires

- **10 %** du réseau ferré exploitable

=> Population dépendante du mode de transport le plus coûteux et polluant

LA DÉPENDANCE AUTOMOBILE TOURNE EN ROND

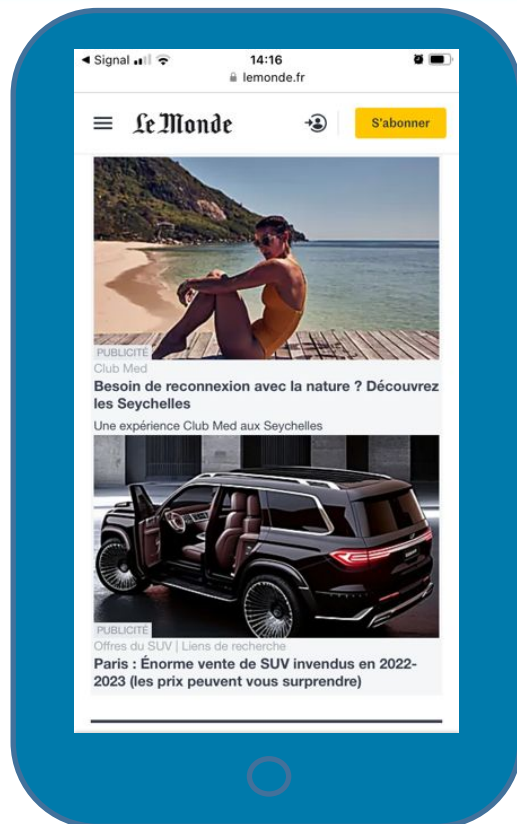


Source : TUMI, ActifTrafic.





Publicité



Sobriété ?



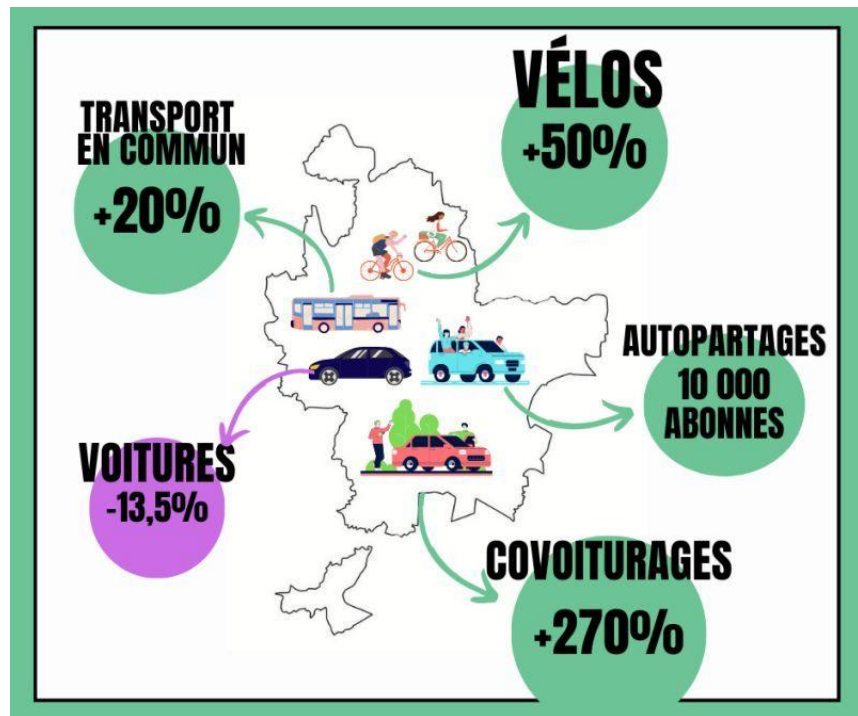
31 milliards d'euros / an en France de publicité essentiellement quelques centaines d'annonceurs

➤ Problème de tarification



↘ Ca peut marcher !

En 3 ans, métropole Lyonnaise



En 4 ans, Arc Jurassien
(500 000 habitant.e.s)



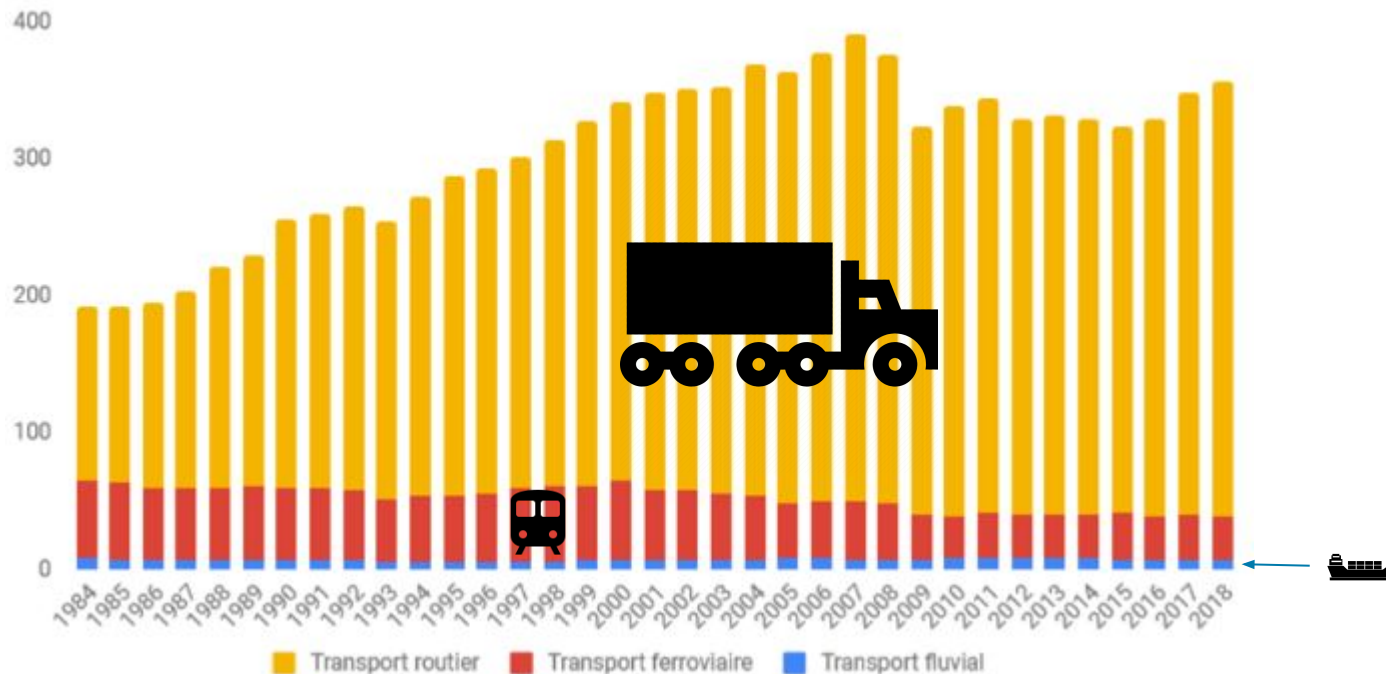
part modale du covoiturage x 2
22% de covoiturage régulier



Transport de marchandises : chute du fret au profit du routier



Évolution du mode de transport des marchandises depuis 1984



Source : <https://lvsl.fr/la-longue-agonie-du-fret-ferroviaire/>

↳ Transports de marchandises : principaux leviers du scénario négaWatt



Substitution



Motorisation
prioritairement
**gaz
renouvelable**

Efficacité



Amélioration
des
performances

Sobriété

Réduction
des **tonnages
transportés**



Report modal



Meilleur
remplissage





Scénario négaWatt en 2050 : encore des voitures...
mais une place plus limitée !



Trajets longues distances : se déplacer
moins loin moins souvent... plus
équitablement ?



Evolution des parts modales : rôle central des
pouvoirs publics !



Capsule 5 : solaire photovoltaïque

Découverte de l'effet photovoltaïque
en 1839 (Becquerel) et 1873 (Smith)

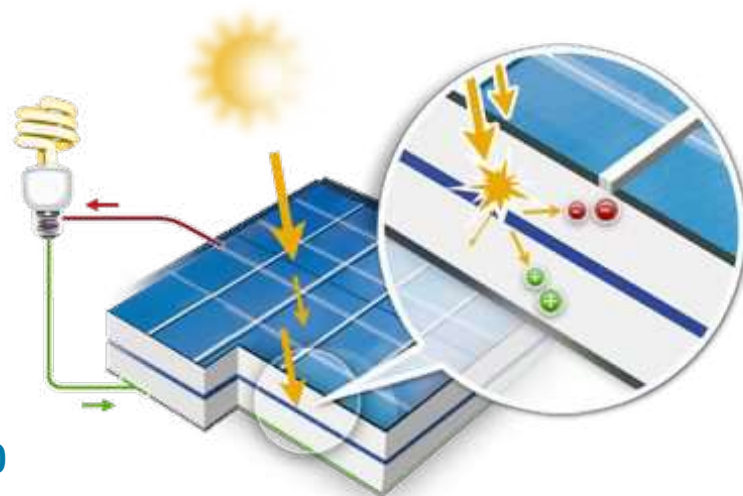
Premier panneau photovoltaïque en 1954 aux Etats-Unis
(Bell Labs) avec un rendement de 6%, et premier module
de taille significative en 1964 au Japon (Sharp)

PHEBUS : première installation raccordée au réseau
français (10 m², 1 kW) chez George David en 1992,
financée par une souscription citoyenne



[Histoire Phébus / Energie Partagée](#)

- Les photons du soleil transfèrent leur énergie aux électrons du matériau du panneau PV n le heurtant
→ un courant électrique est créé
- Près de 19 GW installés fin 2023 dont
 - **18% en petites installations (moins de 36 kW)**
 - **28% entre 36 et 250 kW**
 - **54% de grandes installations (plus de 250 kW)**

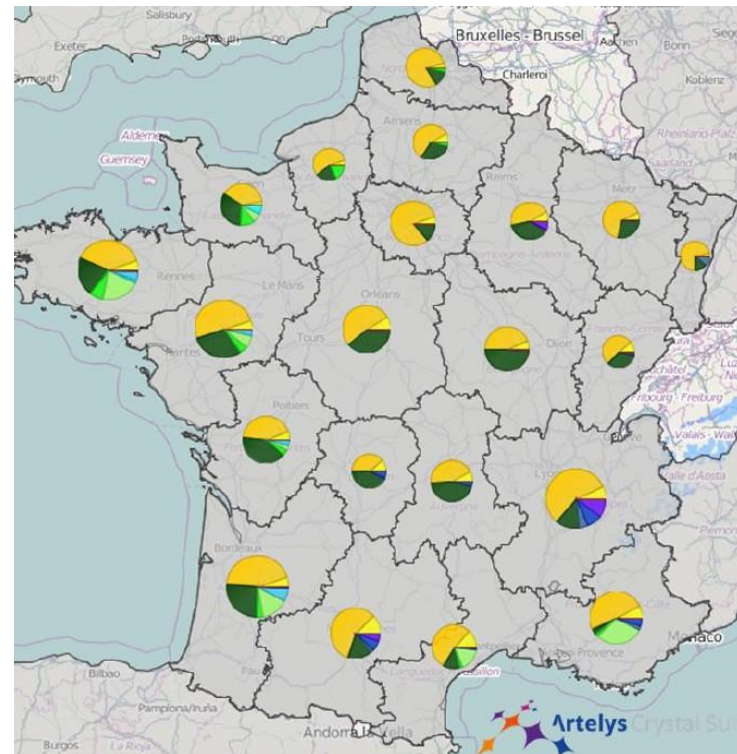


La France dispose d'un gisement variable d'ensoleillement selon les régions :

- entre 1750 et 2750 heures par an
- 1220 à 1760 kWh/m²

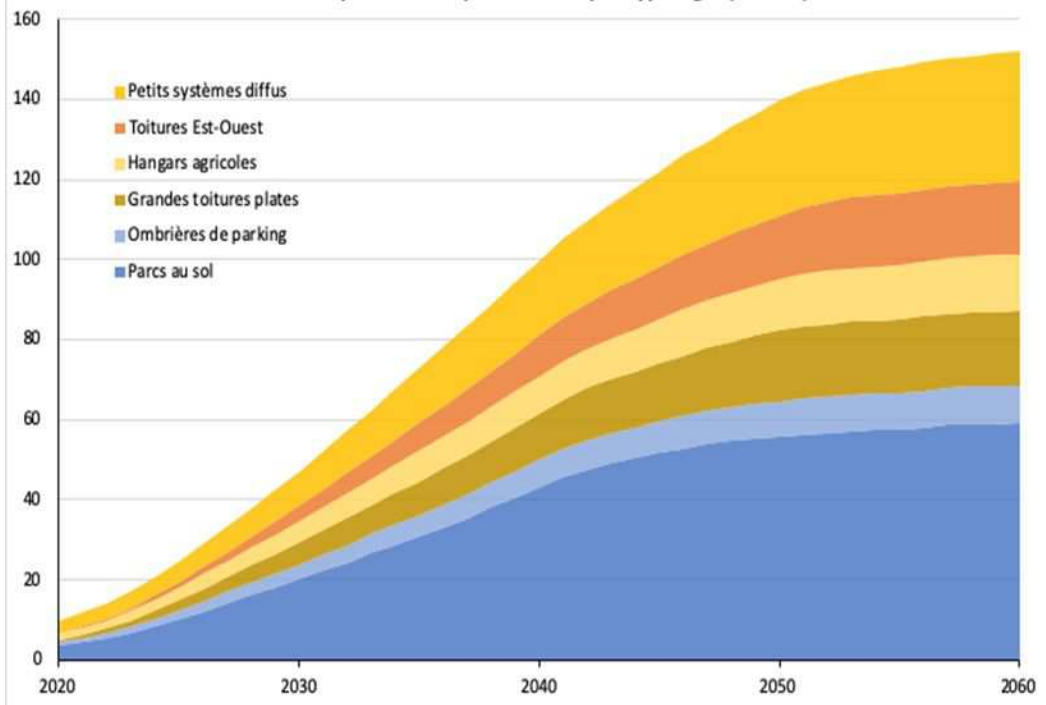
Possibilités d'équiper différents types de surfaces. Gisement théorique =

- 47 GW pour le PV au sol
- 364 GW pour le PV sur toitures



Gisement PV (jaune) et éolien (vert)

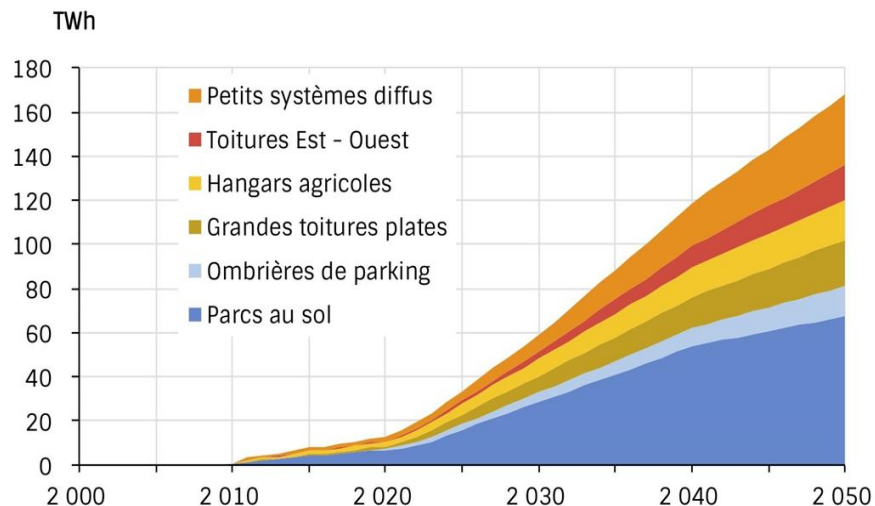
Puissance photovoltaïque installée par typologie (en GW)



144 GW installés en 2050, dont :

- 27 GW petits systèmes diffus
- 51 GW en toitures
- 12 GW ombrières de parkings
- 54 GW parcs au sol

Soit une moyenne de 2 kWc par habitant (environ 7 m²)



Production de 168 TWh en 2050 :

- 68 TWh parcs au sol
- 39 TWh grandes toitures + hangars
- 32 TWh petits systèmes diffus

Solaire PV = 31% de la production totale

Toitures Est-Ouest : 16 TWh pour lisser la courbe de production

Parcs au sol : pas de concurrence d'usage avec l'agriculture ou les zones naturelles sensibles

La variabilité n'est pas une fatalité grâce à :

- la prévisibilité de la production photovoltaïque
- le foisonnement au niveau national (et européen)
- le développement du stockage à plus long terme

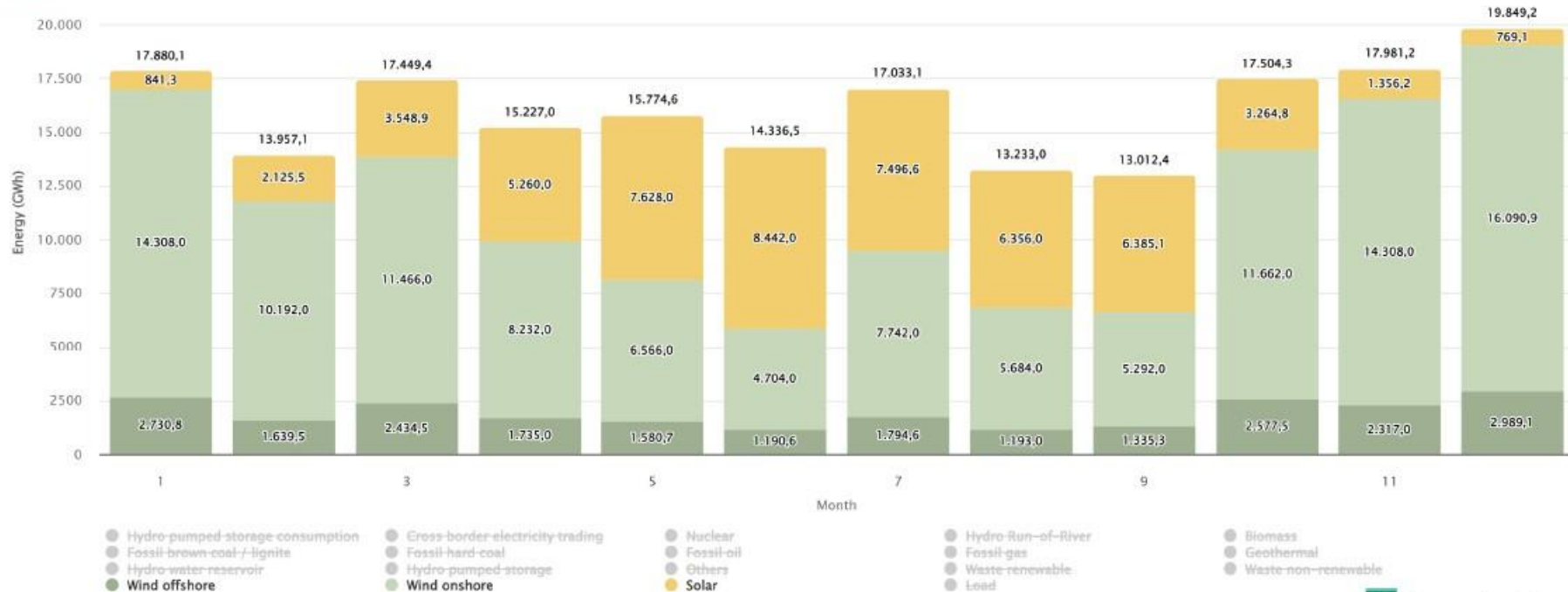
Complémentarité avec l'éolien : exemple de l'Allemagne en 2023 :

80 GW photovoltaïque + 60 GW éolien terrestre + 8,4 GW éolien en mer installés

Cumul de puissance effective PV + éolien = jusqu'à 60 GW (atteint le 20 février)

13 à 20 TWh / mois produits en 2023 (60% de la production).

Monthly wind and solar power generation Year 2023



La séquence ERC (éviter, réduire, compenser) limite les impacts sur :

- la biodiversité. Evitement des espaces à enjeux (zones humides, haies, etc.), maintien des corridors écologiques. Pas d'ouverture de chantier au printemps. Adaptation du design du parc (espacement des panneaux, ancrage avec ou sans béton, clôture sans béton, barbelés, création de passages pour la faune, etc.)
- les paysages. La hauteur modéré des parcs permet de les masquer par de la végétation ou la topographie

A remarquer :

- faible imperméabilisation des sols = peu d'impact sur écoulement d'eau
- obligation légale de débroussaillage / protection des départs de feu



- Urbanisation (routes, zones d'habitations et d'activité) et arrêt de pratiques agricoles réduisent déjà les surfaces agricoles de 56 000 et 33 000 ha par an
- Surface agricole utile : baisse de 29 à 26,7 millions ha entre 2010 et 2020
- Un parc solaire PV au sol occupe 1 à 3 ha/MW
- Etude d'impact environnemental + circulaire de 2009 = encadrement qui oblige à prouver que les terres sont abandonnées ou de faible intérêt agronomique → friches, anciennes carrières, décharges ou ball-trap, etc.



Crédit photo : Solagro

- Malgré le potentiel des friches industrielles et des toitures, les terres agricoles présentent un intérêt
- ⇒ une synergie doit être trouvée entre agriculture et production photovoltaïque : pâturages, pose de haies, apiculture, vignobles, cultures (céréales, légumes, etc.)
- Un nouveau potentiel de l'agrivoltaïsme à prendre en compte dans le scénario négaWatt.
- Plus d'une vingtaine d'expérimentations en cours, suivies par l'INRAE

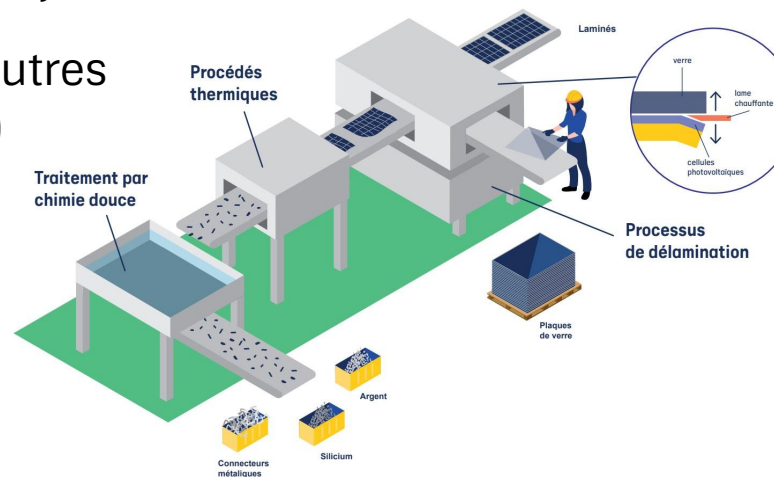


➤ C5 : solaire PV DES PANNEAUX NON-RECYCLABLES

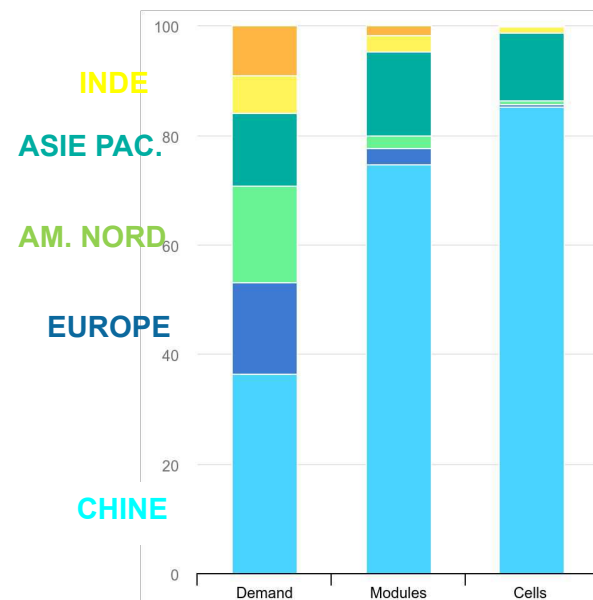


- Durée de vie d'un panneau : 20 à 30 ans → encore peu de volumes de panneaux en fin de vie.
- 90% (en masse) des panneaux sont composés de verre, de plastiques et d'aluminium recyclables dans les filières dédiées.
- Le reste est principalement du cuivre, du silicium et d'autres métaux (argent, étain, plomb)
- Pour les technologies "couches minces", 3 à 4% des composants sont des semi-conducteurs avec des mélanges de métaux plus difficiles à récupérer (cadmium, sélénium, indium, gallium)

- Cadre légal : Directive relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques + décret (19/08/2014) = obligation de collecte / traitement
- Massification à venir du volume à traiter : dans le monde, 1,7 à 8 Mt en 2030 et 60 à 78 Mt en 2050 (source IRENA)
- Matériaux recyclés serviront à fabriquer d'autres panneaux (60 millions en 2030, soit 18 GW)
- Intérêt économique du recyclage = valoriser les matériaux à haute valeur ajoutée (silicium, cuivre, argent)



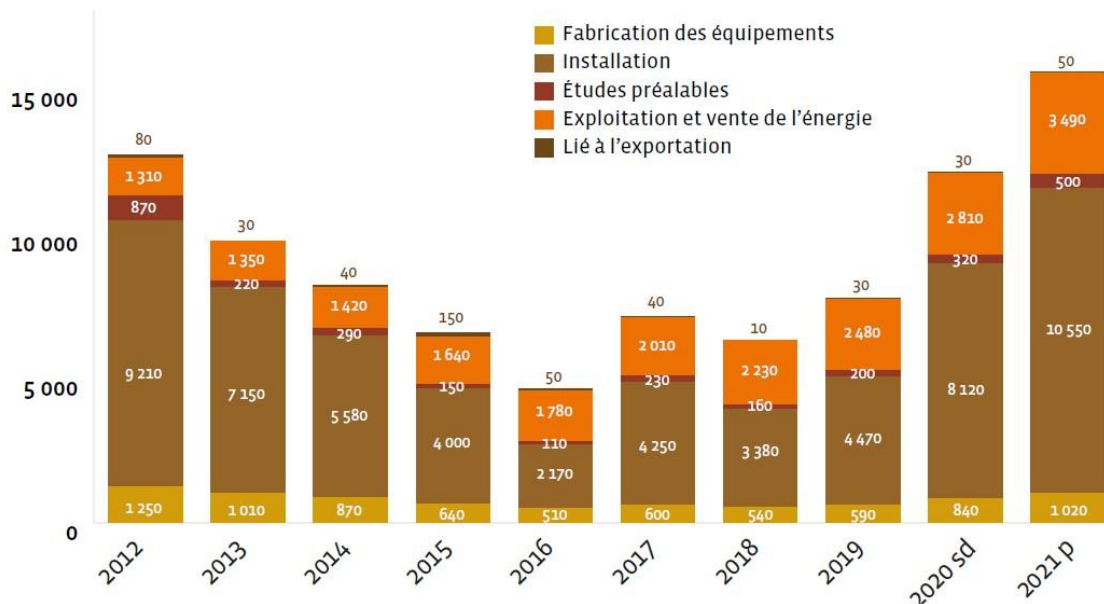
- Pas de souveraineté envisageable à moyen terme vu que la Chine assure 95% de la production mondiale, et restera au moins à 80%
- Poids “carbone” des panneaux importés est lourd (jusqu’à 400 kg CO₂/kW) mais compensé en 2 à 12 mois de fonctionnement
- Équilibre à trouver entre coût économique, équité des échanges (taxe carbone aux frontières), et production domestique / réindustrialisation en Europe




Part des pays pour la demande et la fabrication (AIE 2021)

Chiffre d'affaires du PV en France (2021) : 7,9 milliards d'euros en 2022 dont 4,6 Md€ pour l'exploitation, la maintenance et la vente d'énergie

Plus de 16 000 emplois en 2022, à 68% dans l'installation



- Le solaire photovoltaïque complète favorablement la production d'électricité de l'éolien
- Il est installable sur une large diversité de sites, ce qui en fait une source d'énergie à la main des territoires et des citoyens
- Même si une large part des panneaux est importée, la filière photovoltaïque crée de l'emploi
- Les impacts environnementaux sont limités et maîtrisables



Capsule 6 : énergie nucléaire

La physique nucléaire se développe au début du XX^e siècle.
Découverte de la réaction en chaîne en 1939 par Frédéric Joliot-Curie.

Domination américaine → bombes d'Hiroshima et Nagasaki

1945 : création du Commissariat à l'énergie atomique et 1^{ère} pile atomique (Zoé) en 1948

Trois réacteurs prototypes UNGG dès 1956,
1^{ère} bombe atomique en 1960,
usine d'enrichissement en 1964,
Brennilis (eau lourde) en 1966,
Rapsodie (neutrons rapides) en 1967



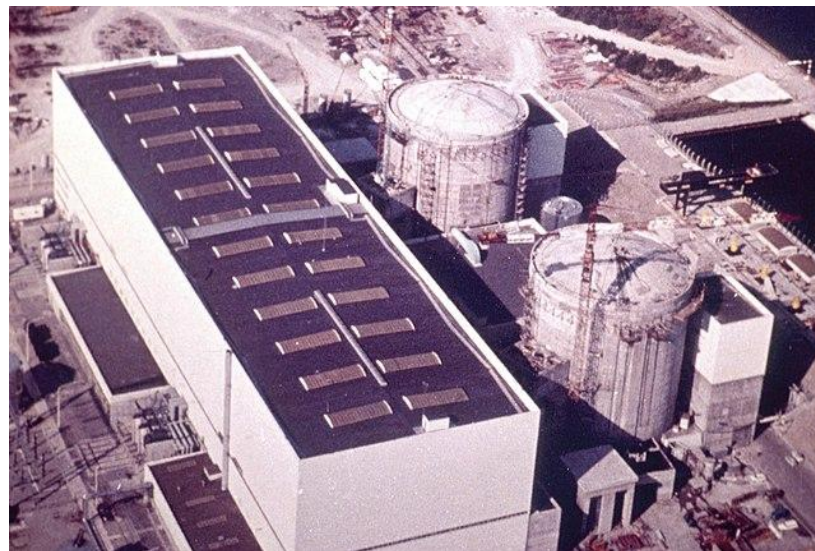
Usine de Pierrelatte / enrichissement uranium

Après la construction de 5 réacteurs UNGG, cette filière est abandonnée

La France opte pour la technologie américaine des réacteurs à eau pressurisée (REP) avec la construction de 2 réacteurs à Fessenheim puis de 4 réacteurs au Bugey (mis en service entre 1977 et 1979)

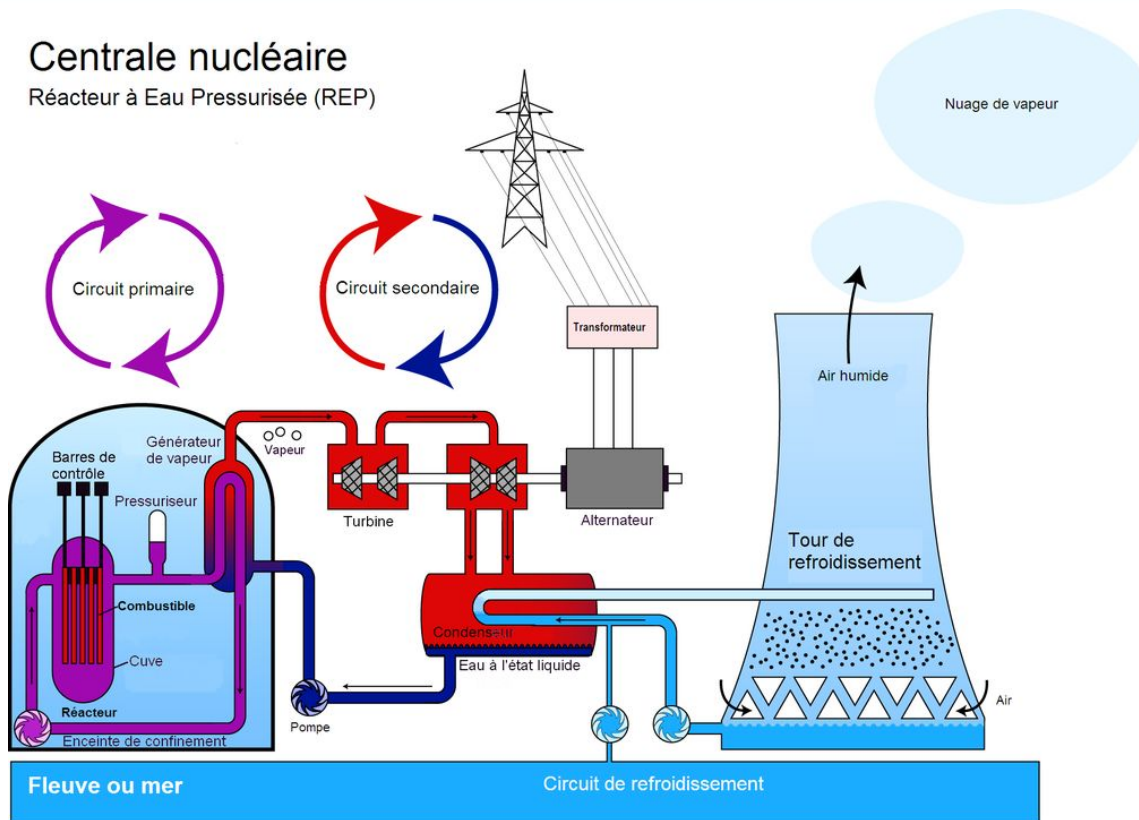
Lancement du Plan Messmer en 1974 pour 18 tranches puis d'un autre en 1979 pour 10 tranches, etc.

⇒ 58 réacteurs entre 1999 et 2020



Fessenheim 1 et 2 en construction

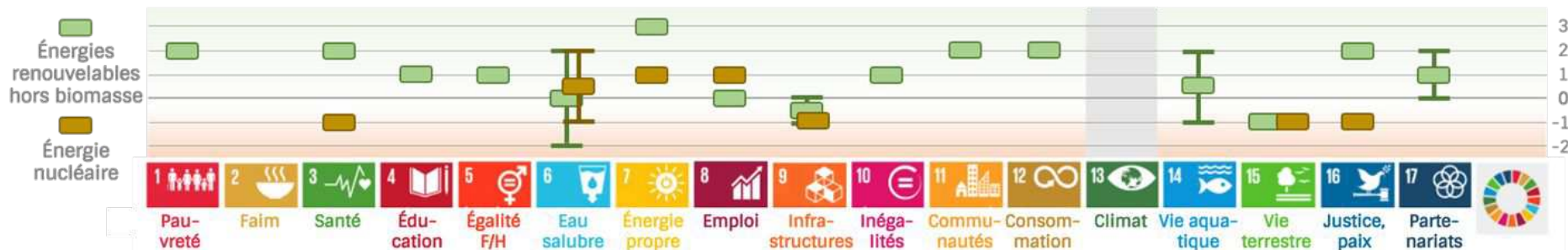
Centrale nucléaire
Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



Crédits : Steffen Kuntoff

L'option nucléaire est présentée comme incontournable pour résoudre la crise climatique, pourtant :

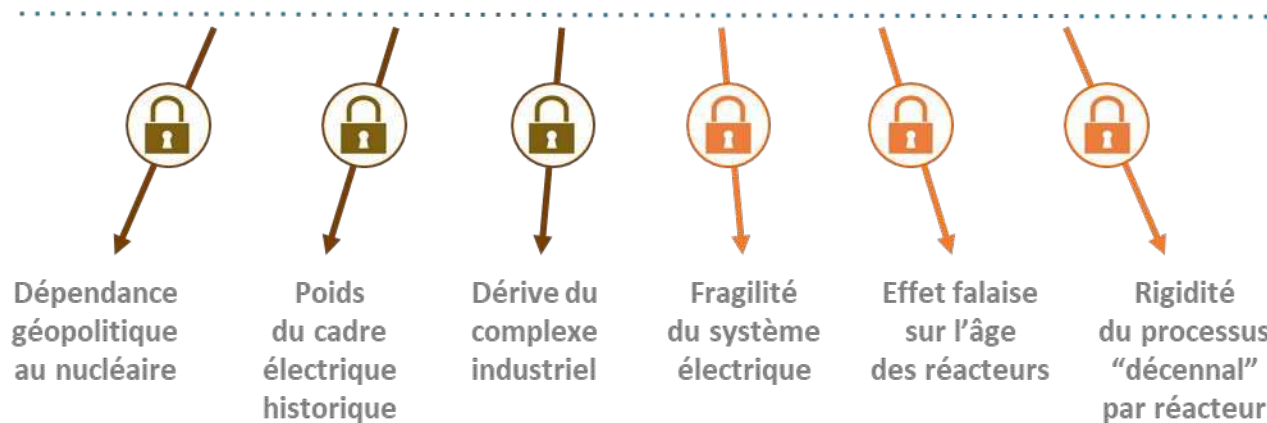
- elle n'a jamais produit plus de 3% de l'énergie consommée dans le monde
- elle n'est pas partagée (ni partageable) par tous les pays
- elle coûte plus cher et met plus longtemps à être construite, avec de forts aléas, que les énergies renouvelables
- elle n'est pas soutenable au regard des Objectifs de développement durable



Le nucléaire fait système, se verrouille lui-même,
et verrouille toute idée de faire décroître le parc de réacteurs

Effets multiples de verrouillage

**Le nucléaire
comme
système**



**La gestion
de la
trajectoire**

REP : Design initial pour 40 ans d'exploitation avec des visites décennales de contrôle

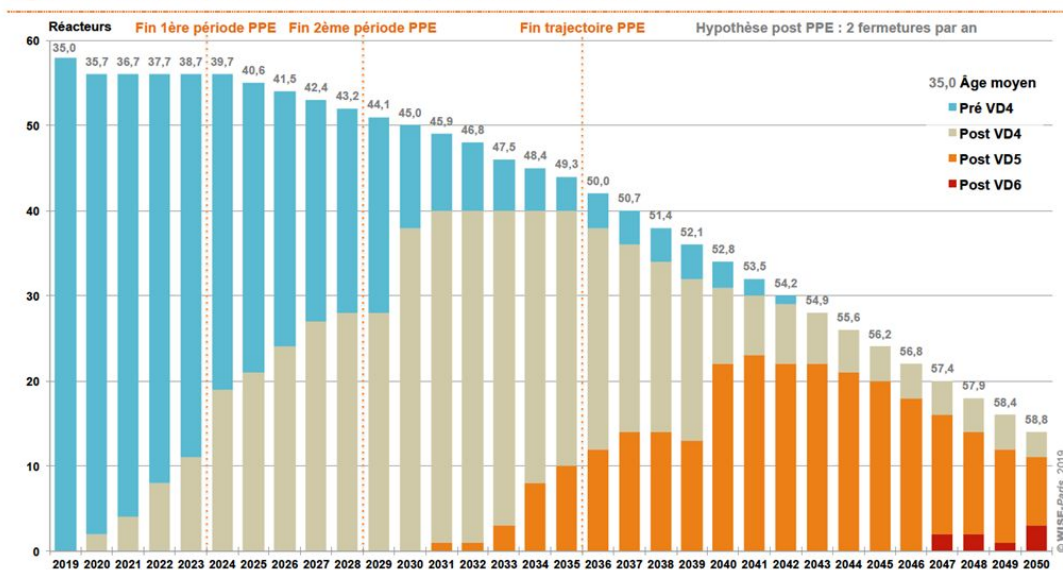
Politique actuelle : prolonger jusqu'à la 5^e voire la 6^e visite décennale, voire plus...

Conséquences :

- vieillissement (cuve)
- défauts génériques (ex : corrosion)

⇒ + de risques !

Fig. 2 • Évolution du parc existant dans la trajectoire PPE et au-delà*



* Le nombre de réacteurs en service à la fin de chaque année est représenté en tenant compte de sa répartition en fonction du nombre de visites décennales subies à date. L'hypothèse médiane retenue au-delà de 2035 est celle de 2 fermetures de réacteurs par an en moyenne.

EPR2 : design non finalisé, coût déjà en cours de réévaluation à la hausse, mise en service (2040) trop tardive par rapport à l'urgence climatique

SMR : beaucoup d'annonces, peu d'avancées. Quelle acceptation en zone industrielle ou habitée ?

Surgénérateurs : de nombreuses recherches depuis 1946, seulement deux réacteurs en fonctionnement en Russie, trois en construction en Chine et en Inde, pour une puissance cumulée de 3,1 GW

Fusion : projet ITER démarré en 2010, premier plasma prévu pour 2016 repoussé à 2025 puis 2030.. pour faire de la recherche

⇒ **TROP CHER ET TROP LENT !!**

Pas de nouveaux réacteurs, ni EPR2, ni SMR

Pas de nouvelles usines (amont et aval du cycle), ni nouveaux stockages

Une catastrophe industrielle

2012 → 2024...
12 ans de retard

3 Md€ → 19 Md€
+530% de surcoût

Problèmes et non conformités en cascade

Réparations lourdes et qualifications en attente



Un démarrage non viable

Risques et déchets

niveau réel de sûreté dégradé +
cumul de combustible utilisé

Perte économique

non rentabilité + coûts
démésurés de maintien du
“cycle” + coût de la fin de vie

⇒ Une seule option :
l'abandon

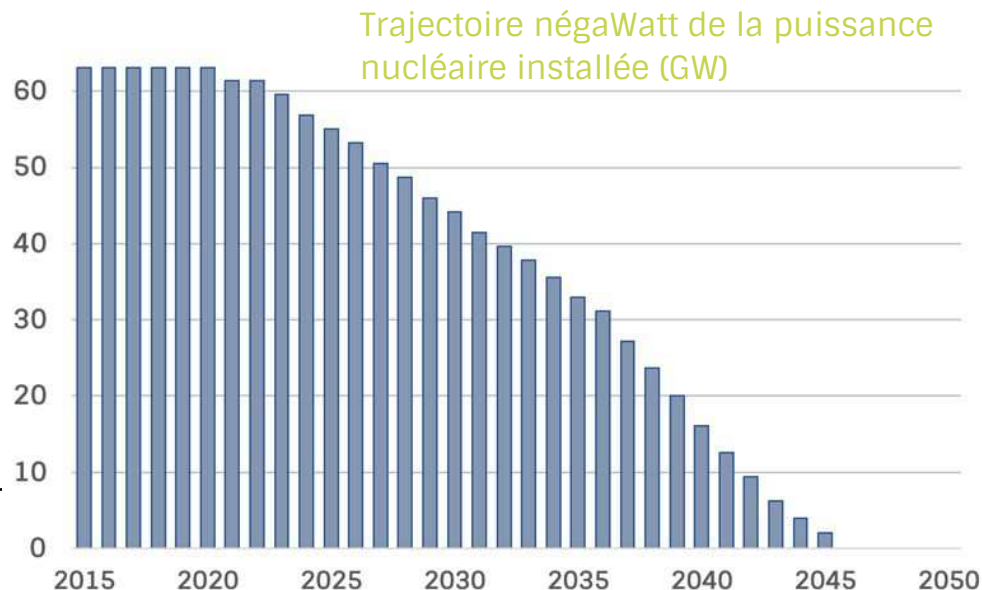
Position de principe = aucune prolongation au-delà de 50 ans, tout en considérant

un lissage des arrêts par rapport au calendrier VD4/VD5

une flexibilité dans la date finale d'arrêt / garantie de capacité

une prise en compte responsable des facteurs externes :

- étalement / impact social
- fin des usines du cycle aval/amor
- inventaire "matières"



Démantèlement des centrales :

- Brennilis : arrêté en 1985, fin prévue en 2041
- Ancienne génération UNGG : décalé de 2044 à 2100 !
- Parc actuel : l'inconnu du XXII^e siècle



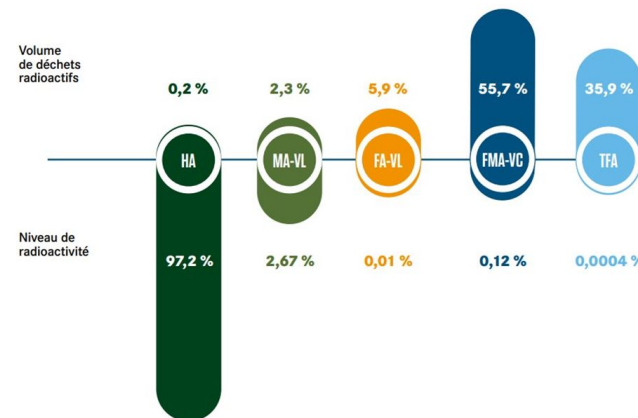
France 64160 CC BY-SA 3.0

Gestion des déchets :

- Volumes en hausse
- Stockages quasi-saturés à La Hague
- Projet Cigéo (stockage géologique) ne sera pas terminé avant 2150

⇒ **Lourd héritage pour les générations futures**

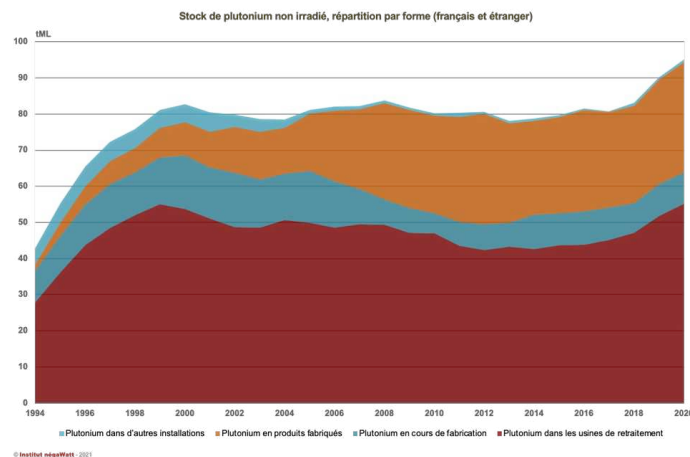
➤ RÉPARTITION DU VOLUME ET DES NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DES STOCKS DE DÉCHETS À FIN 2021




Combustible usé : entreposé dans les piscines avant son traitement

Une partie est retraitée pour devenir une
“matière” réutilisable sous forme de Mox,
mais en réalité peu utilisée
→ accumulation de matières radioactives

⇒ **Enfermement de la politique française**
dans une surenchère d'investissements
pour assurer l'aval du cycle
sans pour autant être certaine d'utiliser ces “matières”



- Le nucléaire n'est pas inéluctable : une option de transition sans y recourir pour la production d'électricité décarbonée est possible
- En s'enfermant dans l'option nucléaire, le gouvernement français hypothèque l'avenir (coûts, déchets, risques) et ralentit les solutions plus pertinentes (économies d'énergies, énergies renouvelables)
- La fermeture progressive du parc nucléaire doit se faire en tenant compte des enjeux sociaux (reconversions) et techniques (équilibre du système électrique)



Capsule 7 : équilibre électrique

Réseau électrique : un maillage dense en France avec

- plus de 106 000 km de lignes à très haute (400/225 kV) ou haute (90/63 kV) tension gérées par RTE (transport)
- plus de 622 000 km de lignes moyenne tension (20 kV) et plus de 700 000 km de lignes basse tension (400 et 230 V) gérées par Enedis (distribution)

RTE est responsable de l'équilibre sur le réseau électrique :

- équilibre entre la production et la consommation
- ajustement en tension et fréquence
- pilotage des exportations et importations
- gestion des écarts

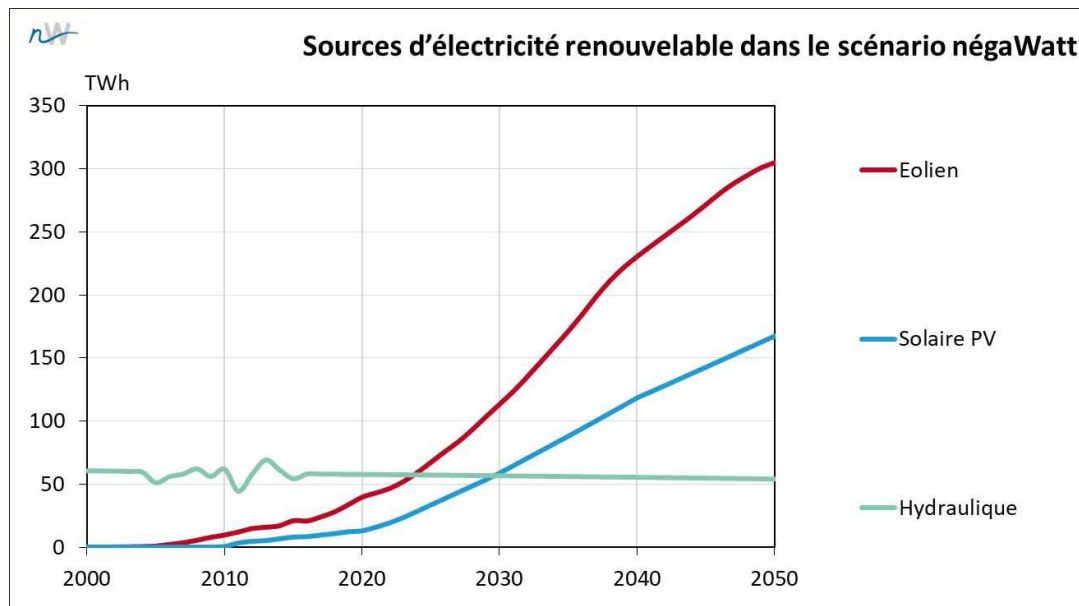


Tous les scénarios doivent satisfaire :

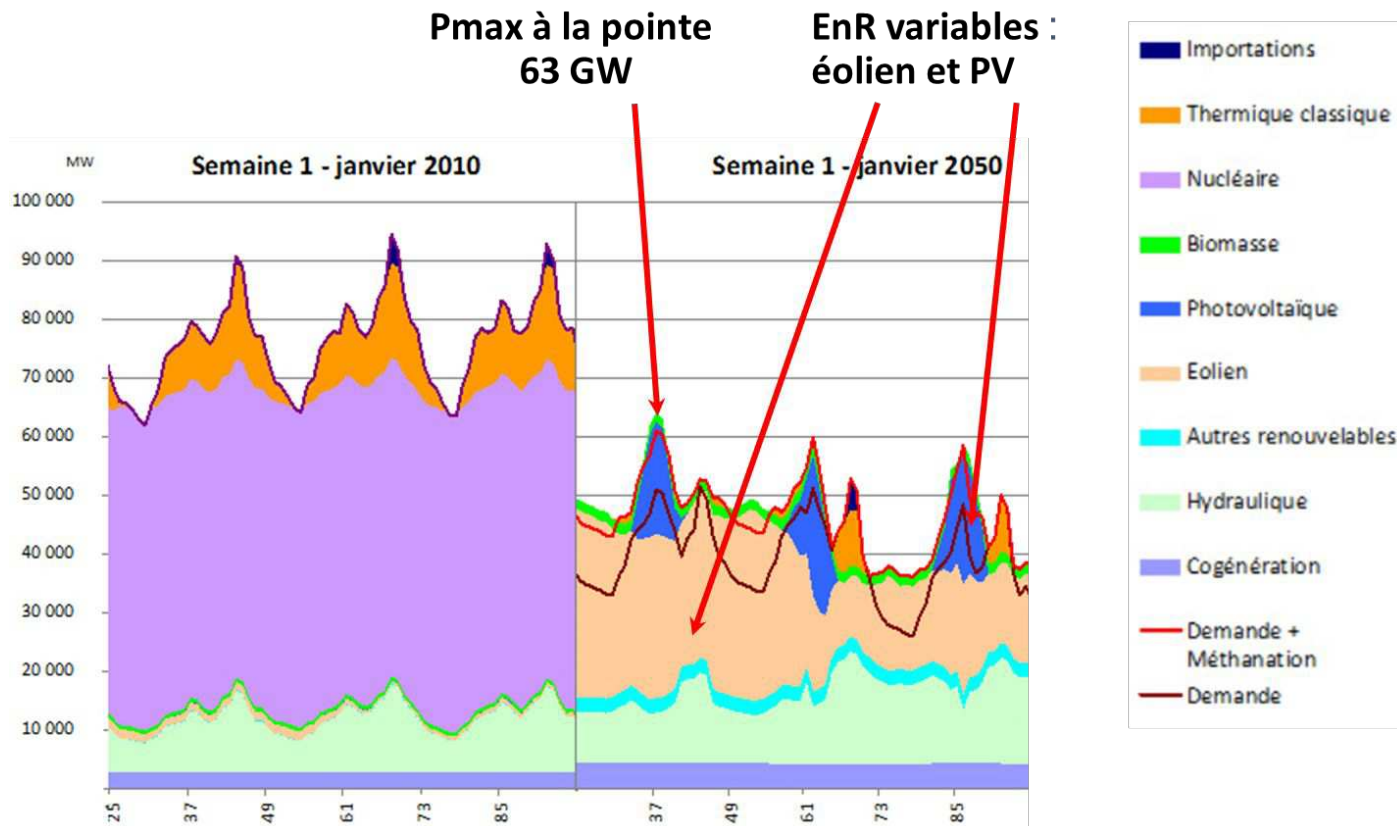
- la sécurité d’approvisionnement
- l’équilibrage de court-terme
- la synchronisation du réseau

Enjeu en cas de forte part des énergies renouvelables = gérer la variabilité de la production par :

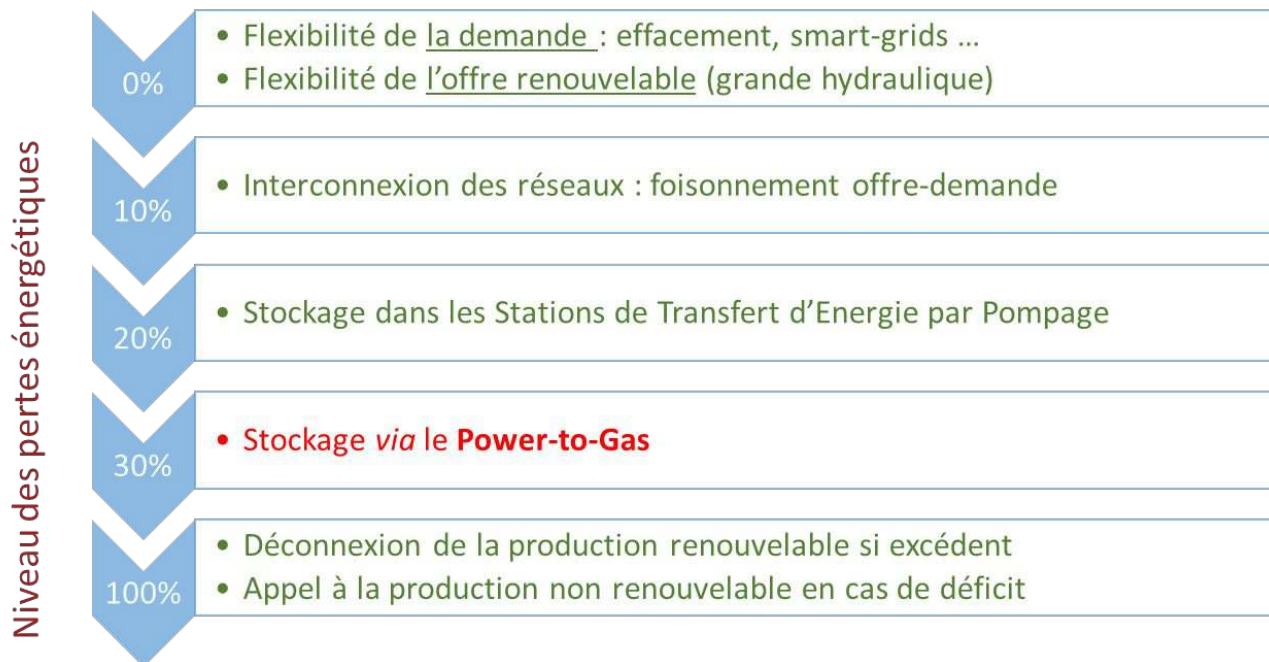
- des moyens de stockage adaptés
- de l’électronique de puissance
- des moyens de production de pointe (peu utilisés)



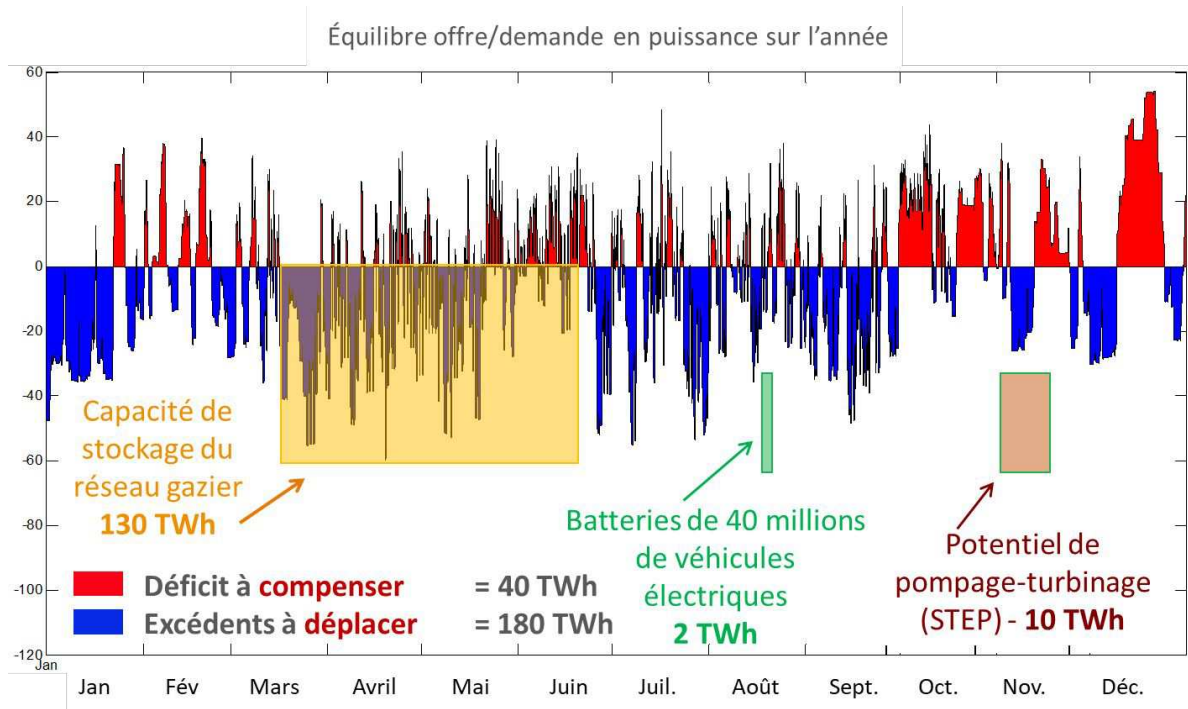
Un nouveau modèle



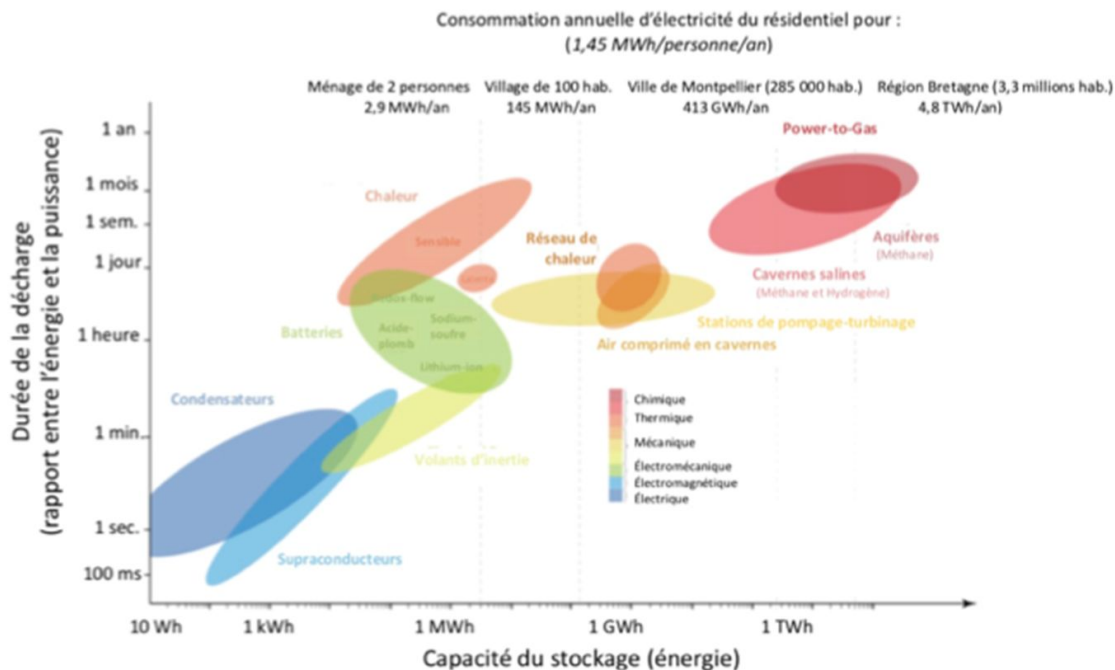
Application d'un "ordre de mérite" pour limiter les pertes physiques



Besoin de stocker de grands volumes pour équilibrer déficit et excédents



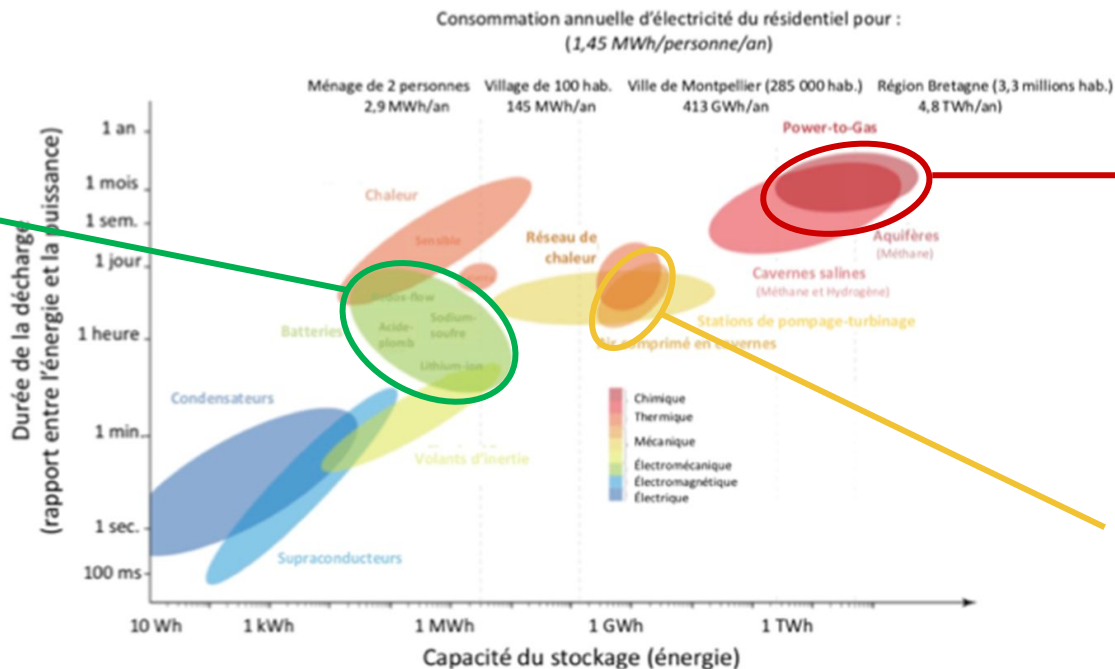
Méthanation / power-to-gas = forte capacité de stockage sur longues durées



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

Méthanation / power-to-gas = forte capacité de stockage sur longues durées

Batteries
2 GW
2000 h
= 4 TWh

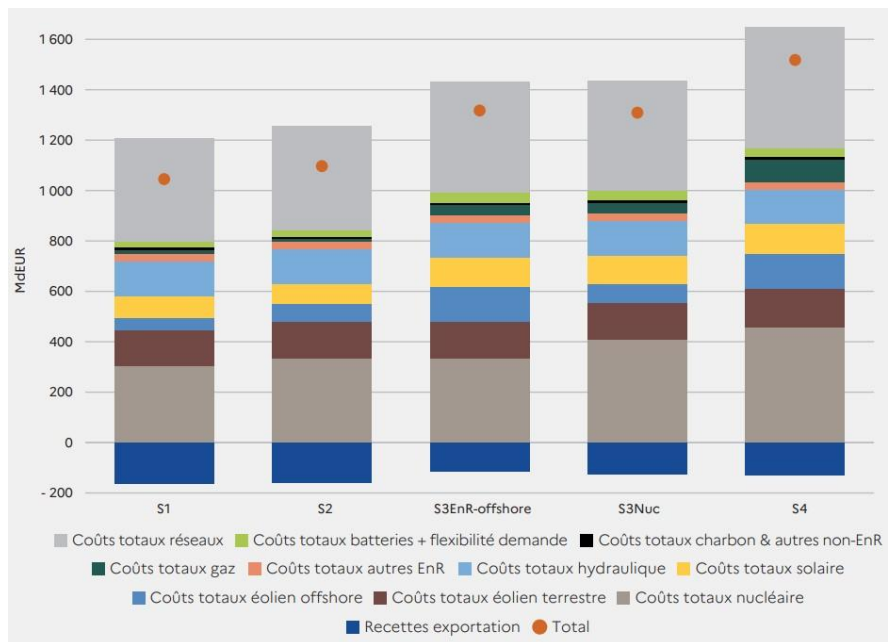


P-t-G
(électrolyse)
33 GW
3400 h
= 115 TWh

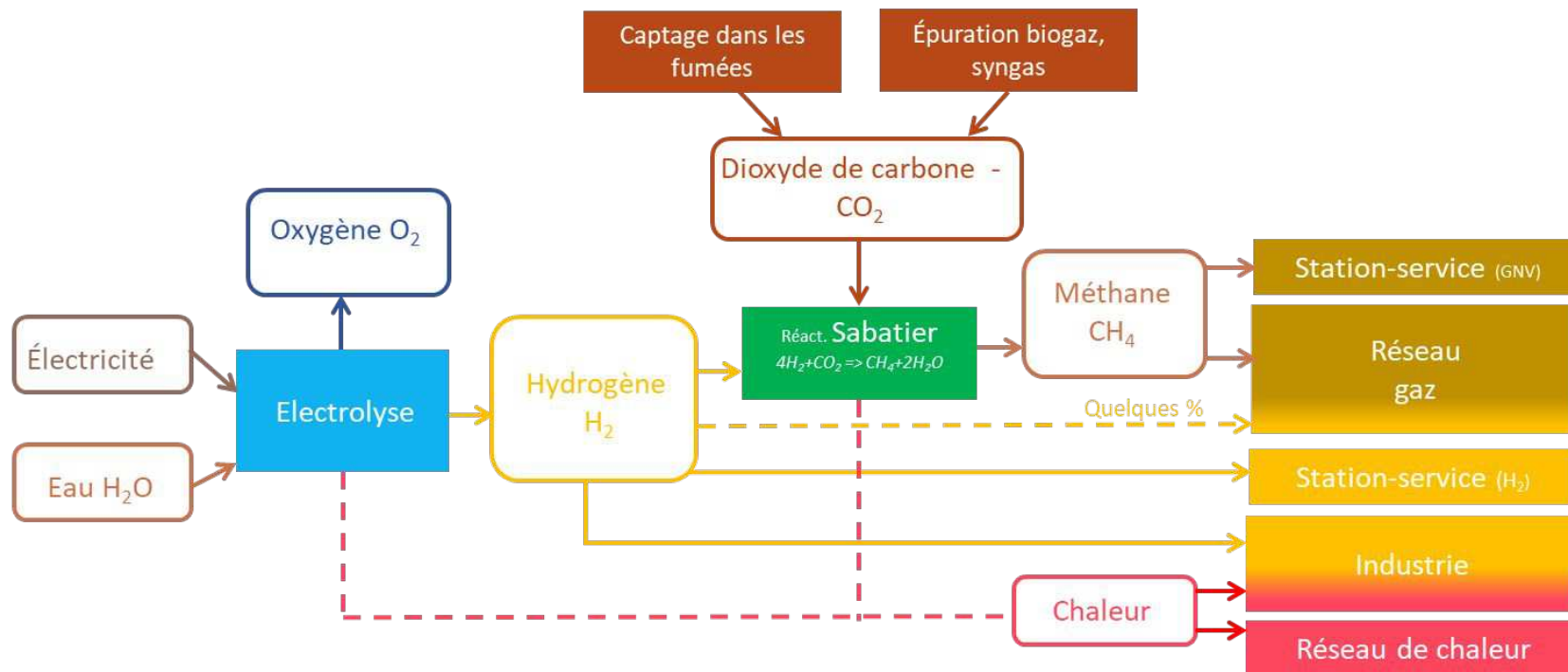
STEP
6,2 GW
2000 h
= 13 TWh



- Des coûts complets plus impactés par le choix de la sobriété que par celui des EnR
- S3 EnR et S3 nucléaire sont équivalents, pour un même niveau de consommation



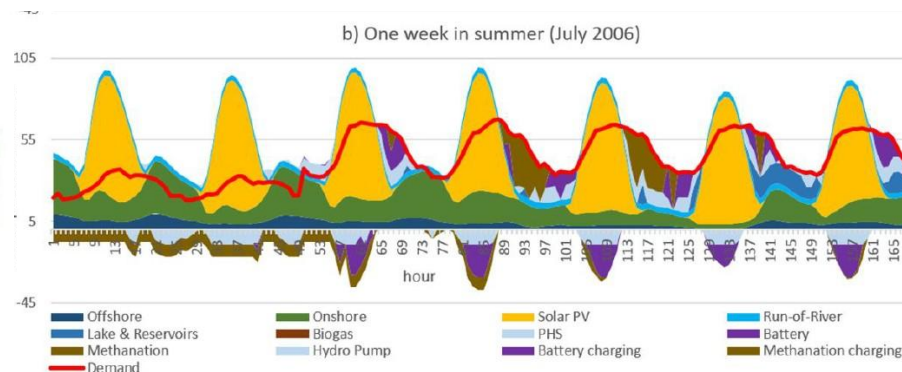
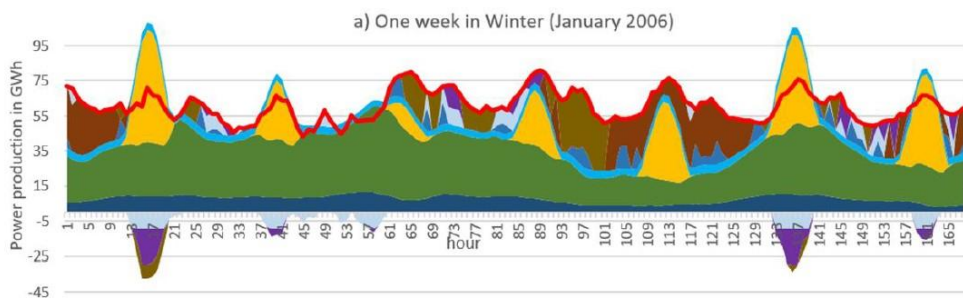
Coût complet actualisé du système électrique pour chaque scénario de l'ADEME



⇒ Technologie incontournable de la transition

Equilibre horaire vérifié dans plusieurs simulation avec 100% d'EnR :

- scénarios de RTE (avec AIE en 2021 ; Futurs énergétiques en 2022)
- scénario négaWatt, avec son propre outil de modélisation
- étude CIRED-CNRS de 2021 (graphes)
- étude Fraunhofer “Kombikraftwerk 1” sur l’Allemagne



Trois études ouvrent des pistes prometteuses sur la participation de l'éolien et du photovoltaïque aux services systèmes avec peu ou pas de machines tournantes :

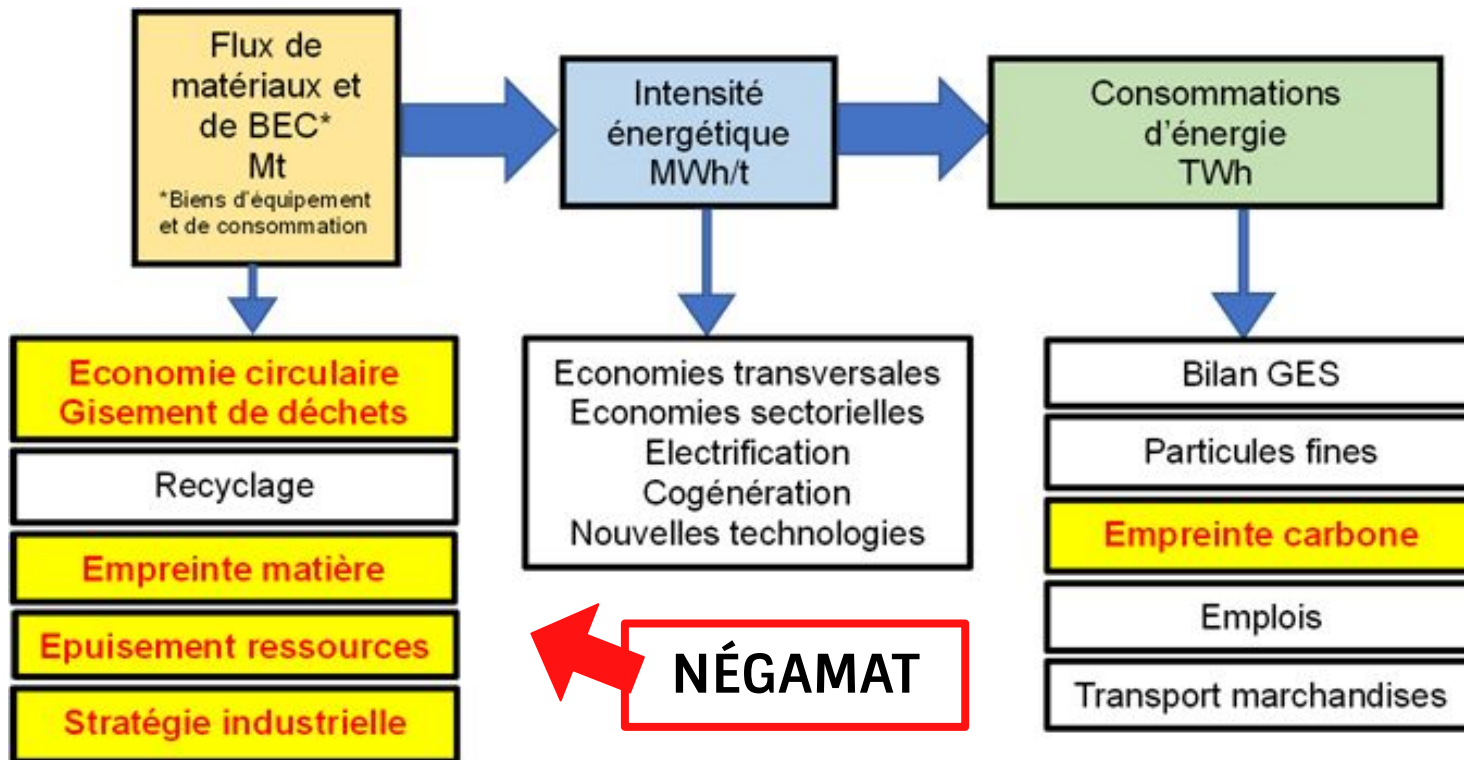
- **Kombikraftwerk 2** → “Bonnes conditions de fiabilité et de stabilité” si bonne coordination entre production et stockage (batterie, électrolyse, STEP)
- **REStable** / centrale virtuelle (12 parcs éoliens et 5 parcs PV en France et Allemagne) → fourniture de services systèmes conforme aux exigences
- **MIGRATE / OSMOSE** → différentes solutions notamment l'amélioration du contrôle des onduleurs “*grid-following*” (inertie virtuelle), l'installation de compensateurs synchrones, et l'utilisation de convertisseurs permettant le “*grid-forming*”

- Sur les 12 scénarios de négaWatt, de l'Ademe et de RTE, 10 ont plus de 70% d'EnR → l'enjeu de l'équilibre du système électrique avec des productions variables prédominantes se posera à l'avenir
- Dans le scénario négaWatt la “pointe” électrique de consommation est moins forte (60 GW)
- Les solutions technologiques (modulation de la demande, batteries, STEP, Power-to-gas) existent ou sont en cours de développement
- Le coût complet d'un ensemble EnR + stockage est moins élevé s'il combine correctement sobriété de consommation et flexibilités



Capsule 8 : bilan matière

➤ négaWatt 2022 : quelles nouveautés ?



2018-2022
Partenariat
pour un outil
commun



- 1) Les postulats de l'approche négaMat
- 2) Le modèle négaMat
- 3) Les hypothèses et mesures des 4 volets de l'approche négaMat
 - **Maîtriser la consommation de biens**
 - **Réorienter les productions et relocaliser**
 - **Privilégier les matériaux les moins impactants**
 - **Recycler**

Combien de matériaux pouvons-nous extraire à l'avenir ?

Au-delà des enjeux climat-énergie !

- Pollution et usage des sols ?
- Atteinte à la biodiversité ?
- Déplacement de populations ?

Périmètre des ressources envisagées

Réserve prouvée

~~Réserve possible~~

~~Ressource ultime~~



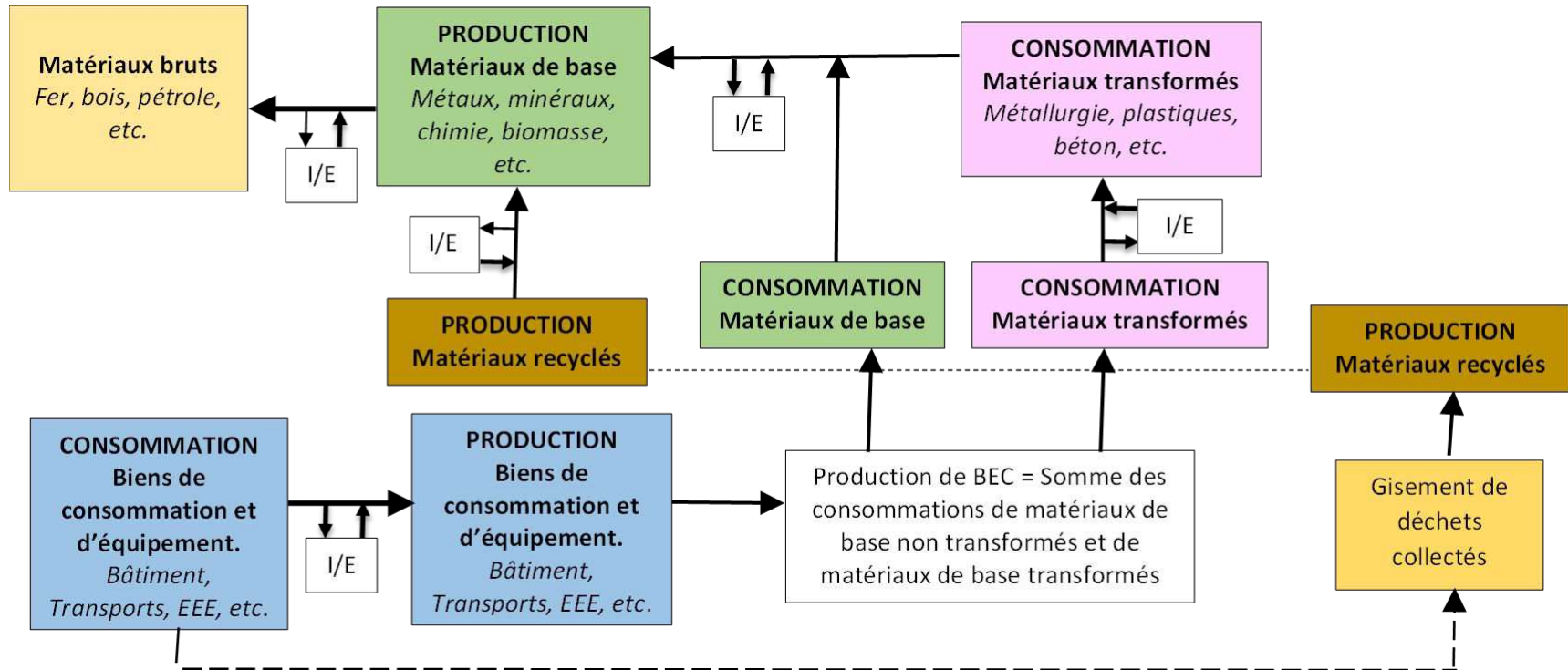
Technique éprouvée et rentable **aujourd'hui**

Quelle répartition des ressources entre les personnes ?

France a droit à un pourcentage de la réserve proportionnel à sa population

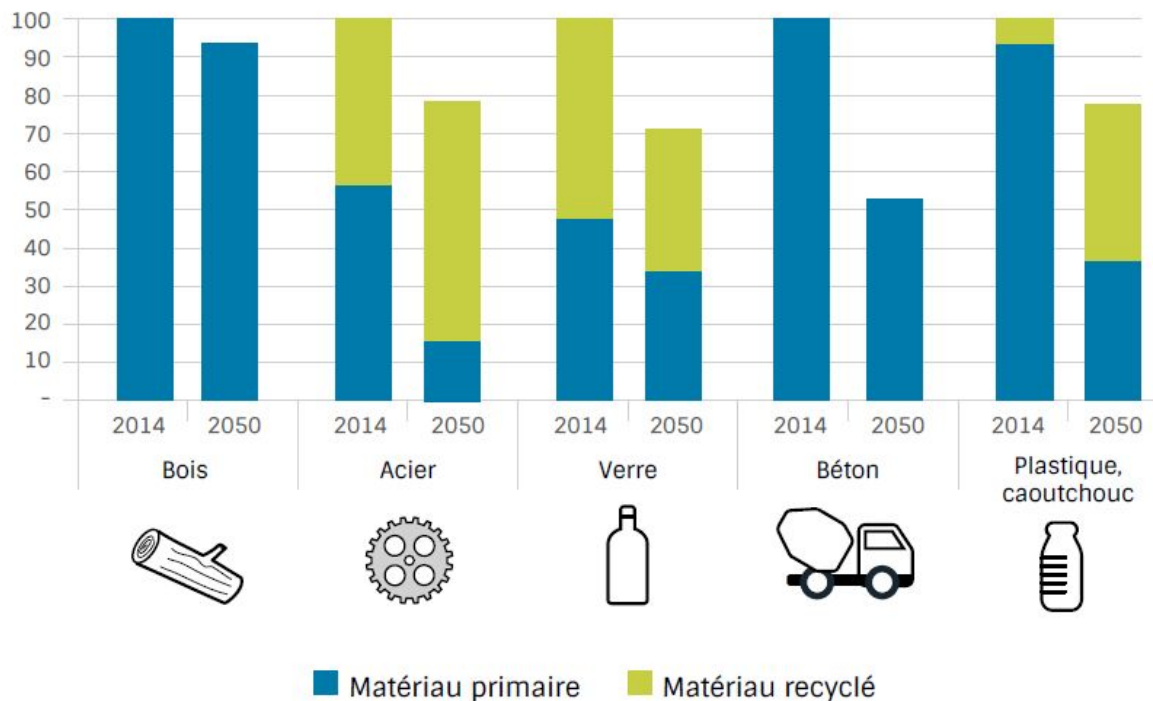
Approfondi dans le projet "Minimal"

Le modèle négaMat



1. Maîtriser la consommation de biens
2. Réorienter les productions et relocaliser
3. Privilégier les matériaux les moins impactants
4. Recycler

Evolution de la consommation de matériaux primaires et recyclés

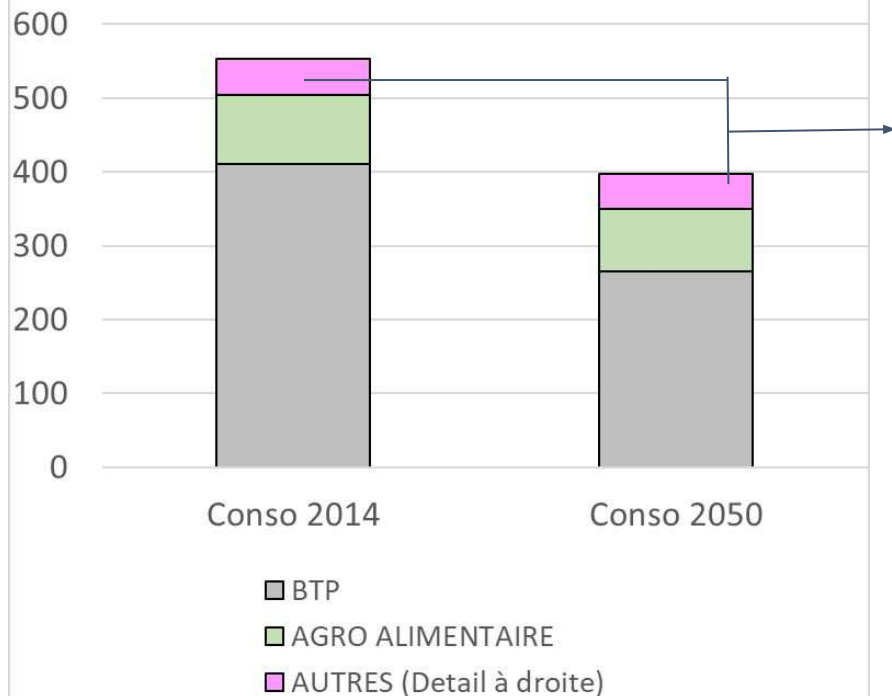


1. Maîtriser la consommation de biens
2. Réorienter les productions et relocaliser
3. Privilégier les matériaux les moins impactants
4. Recycler

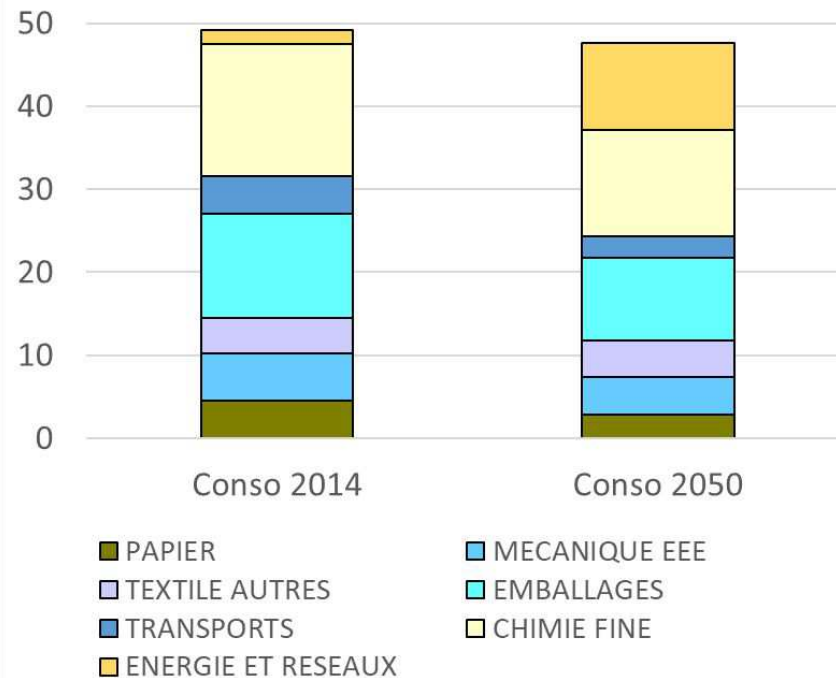
Volet 1 : Maîtrise de la consommation de biens



Consommation de biens (Mt / an)



Consommation de biens (Mt / an) Detail de "Autres"



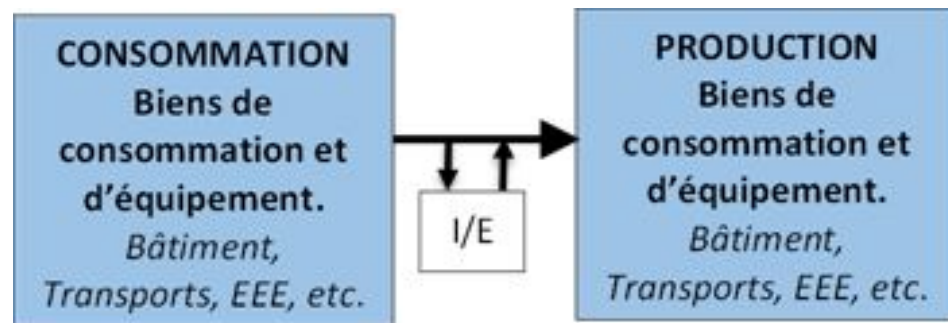
- **Réutilisation**
 - Renforcer loi AGEC sur la **consigne**
 - Extension des **ressourceries** près des déchetteries
 - Rehausser le **fonds réemploi**
 - Interdire la mise au recyclage des **invendus**
- **Réparation**
 - Extension de la **durée de garantie** (5 ans électronique, 10 ans électroménager)
 - **Démontabilité** des objets
 - **Pièces détachées** disponibles pendant 10 ans et standards
- Accélérer l'**affichage environnemental obligatoire des biens de consommation**
 - En 2023 textile, électronique, ameublement, IAA.
 - En 2025 ; 80% des BECs



1. Maîtriser la consommation de biens
2. Réorienter les productions et relocaliser
3. Privilégier les matériaux les moins impactants
4. Recycler

Produire ce que l'on consomme et non l'inverse

Une **stratégie industrielle** pour la France



I/E = Imports / Exports

Les leviers d'action :

- **Réorientation** des secteurs du passé (ex. pétrochimie)
- **Relocalisation** des secteurs en décroissance (ex. mécanique, métallurgie)
- Développement national des **secteurs d'avenir** (énergies renouvelables, batteries)

↘ L'impact de la sobriété sur le solde commercial



Secteurs industriels	Impact du scenario* sur l'activité	solde commercial
Habillement, cuir, textile	=	-13,1
Bois & papier	-4%	-4,1
Chimie	-8,0%	11,0
Pharmacie	=	1,8
Caoutchouc et plastique	-12,0%	-5,7
Minéraux	-22,0%	
produits métalliques	-2,0%	-5,8
optiques	=	-13,7
équipements électriques	hausse	-3,8
machines et équipements	=	-2,1
automobile	-40% sur VP	-4,5
Autres matériels de transport	-1,0%	20.7 (aviation)
Meubles et autres.	=	-8,1

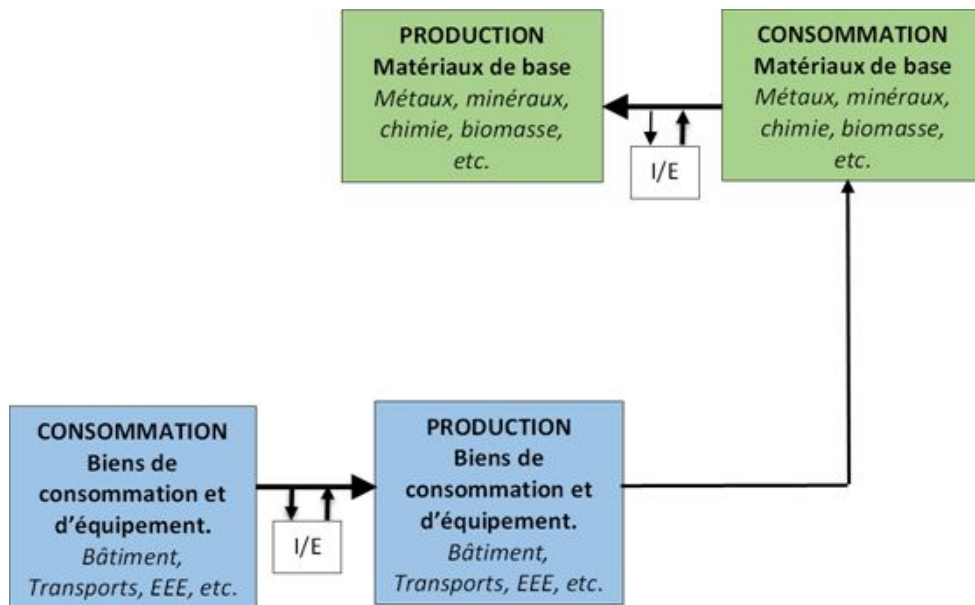
La sobriété a un impact fort sur l'industrie lourde, l'automobile, moins marqué sur les secteurs de biens de consommation.

La balance commerciale industrielle est déficitaire de - 60 M€ hors avions et parfums.

*Impact brut, hors relocalisation. Calcul en volume (tonne matière, nombre de voiture, nombre d'avion...) pondéré par les emplois des sous-secteurs de la branche

- **Diagnostics réguliers des filières** qui vont disparaître et celles qui vont s'accroître
- **Création**, au-delà du plan de relance, **d'un fonds permanent** pour accompagner la transition énergétique
- Encadrement voire **interdiction des investissements dans les secteurs devant décroître**
- **Soutien aux secteurs** compatibles avec la **transition énergétique ou prioritaires pour la relocalisation**
- Instances multipartites de **gestion des politiques de l'emploi, d'orientation et de formation**
- **Plan de programmation des emplois et des compétences**
 - Observation des évolutions, de l'emploi
 - Formation professionnelle et référentiel métiers
 - Implication des métropoles et des régions

1. Maîtriser la consommation de biens
2. Réorienter les productions et relocaliser
3. Privilégier les matériaux les moins impactants
4. Recycler



Les leviers d'action :

- Plan d'anticipation stratégique cohérent
- **Substitution** de matériaux dans le BTP
95% des maisons et 50% des immeubles en bois en 2050
- **Accompagnement social** des mutations

Étendre l'affichage environnemental à tous les produits et le rendre multicritères

Étiquette de A à E qui intègre l'ACV :

- Conso d'énergie et émission de GES
- Durée de vie
- Incorporation de Matériaux recyclés (MPR)

1. Maîtriser la consommation de biens
2. Réorienter les productions et relocaliser
3. Privilégier les matériaux les moins impactants
4. Recycler

Favoriser le recyclage



Métaux 80% → 95%

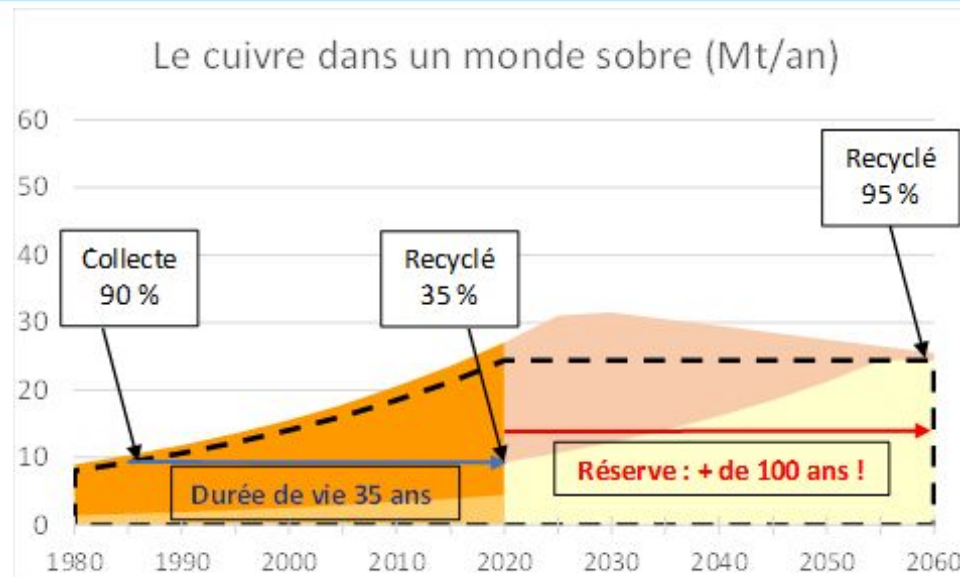
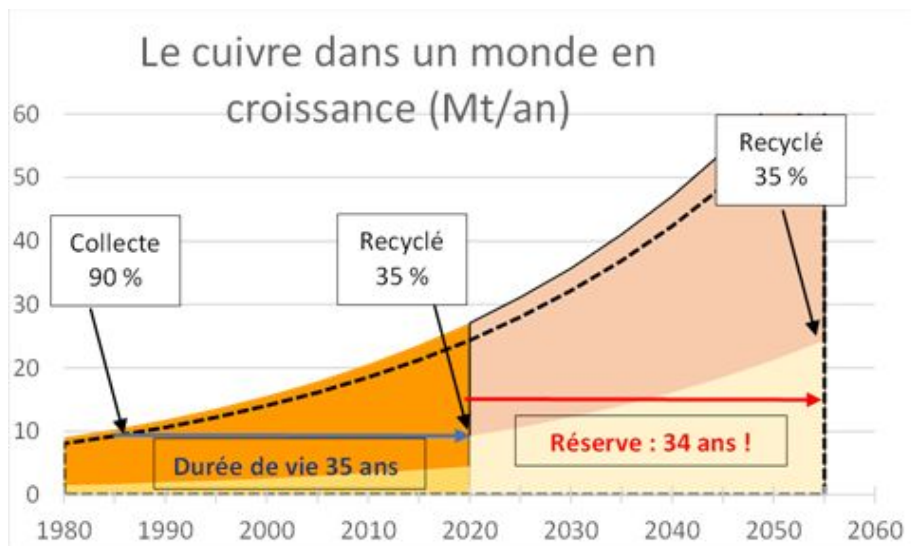
Plastiques 60% → 85%

Verre 75% → 85%

Les leviers d'action

- La collecte
- Le tri
- La relocalisation des Mat. recyclés

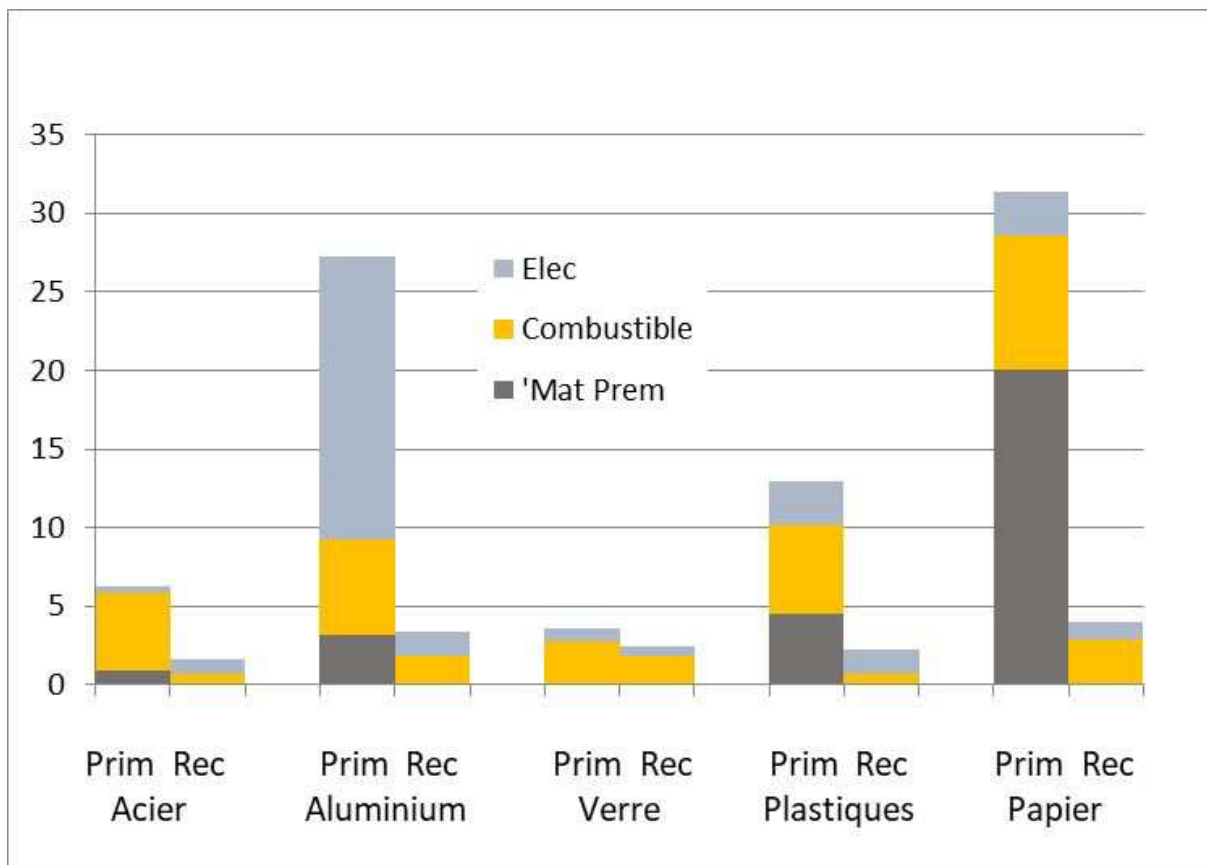
➤ Que peut on attendre du recyclage ?



Réponse du scénario négaWatt :

Dans un monde en croissance, le taux de matières recyclées ne peut augmenter. Avec la sobriété, le recyclage devient efficace

➤ Energie grise des matériaux primaires et recyclés



Barre de gauche :
primaire = fabriqué
avec le matériau brut

Barre de droite :
secondaire = fabriqué
avec le matériau
recyclé

- **Extension** du périmètre **de la REP** notamment au bâtiment
- **Contribution accrue** des entreprises **à la REP**
- Objectifs ambitieux de collecte, tri et recyclage des **déchets du bâtiment**.
- **Objectifs de taux d'incorporation** de MPR
- Investissement dans les **usines de tri performantes**
- Investissements dans les **industries de traitement des MPR** (acier électrique, aluminium secondaire, etc.)
- **Réduction des exportations** de déchets de MPR (ferrailles, résines plastiques, etc.).



Evaluation des limites minimales et maximales de consommation de huit métaux :

- cuivre, nickel, aluminium, fer
- lithium, cobalt, néodyme
- or

Scénario négaWatt en 2050 : moins de consommation de bois, béton, verre, plastique...

Beaucoup recycler sans sobriété ne suffit pas à réduire la demande de matériaux

L'accompagnement des transitions professionnelles est indispensable !



Capsule 9 : bois-énergie

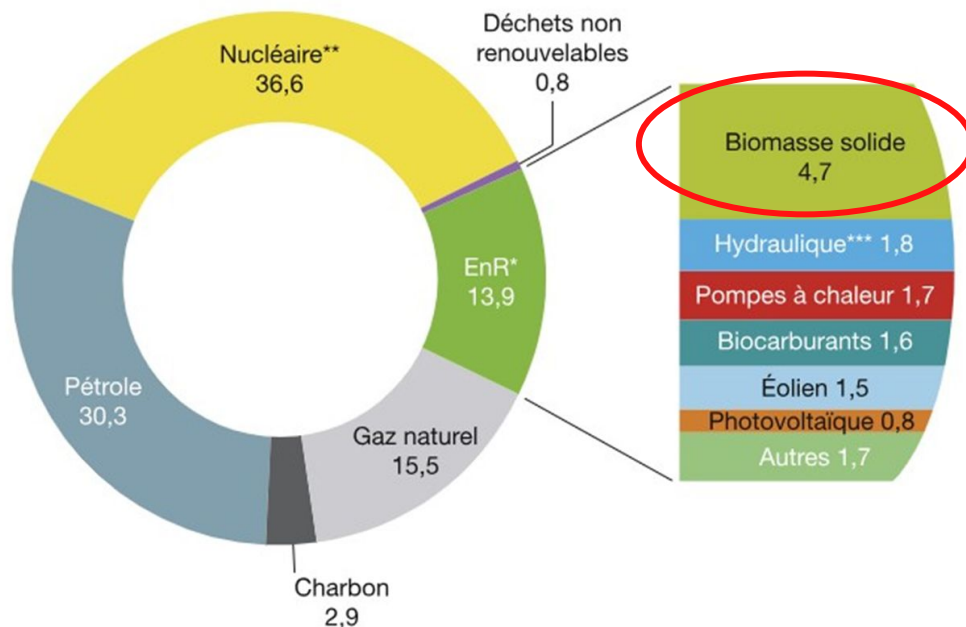
- Le bois et le feu sont aux sources de l'humanité
→ cuisson, chaleur, outillage, construction
ameublement, métallurgie
- La ressource est sous tension après les grands
défrichements du Moyen-Age en France, puis
au XVI^e et XVII^e siècle : réglementation d'une partie de la forêt au
profit du pouvoir royal et local, puis reboisement
- Le bois reste la première source d'énergie jusqu'à ce que le charbon
la remplace dans les pays occidentaux. C'est toujours la première
source d'énergie renouvelable en France (chaleur).



RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR ÉNERGIE

TOTAL : 2 482 TWh en 2022 (donnée non corrigée des variations climatiques)

En % (données non corrigées des variations climatiques)

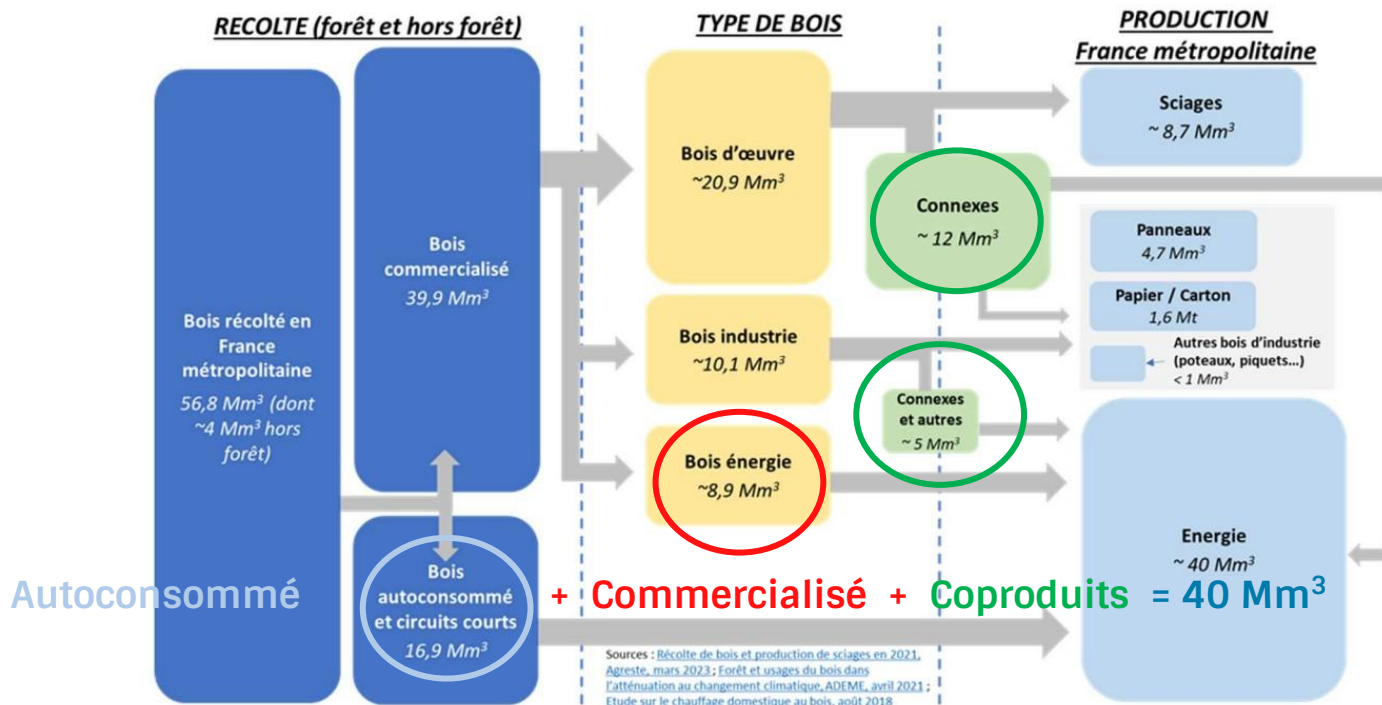


Environ 115 TWh
= 61%
de la chaleur
renouvelable

Source : SDES

** Nucléaire avec STEP

*** Hydroélectricité hors STEP



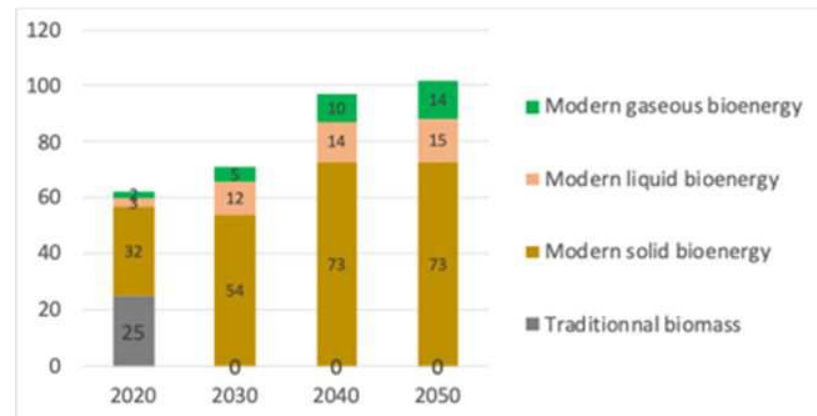
L'avenir du bois-énergie dépend de plusieurs paramètres :

- pratiques sylvicoles préservant les sols, la biodiversité et le puits de carbone forestier
- adaptation aux effets du bouleversement climatique
- déploiement de nouvelles ressources (haies, agroforesteries, etc.)
- priorité aux usages du bois matériau
- recours à des appareils de chauffage au bois performants
- réduction des émissions de polluants atmosphériques



Forêt de la Comté, Puy-de-Dôme

- Toutes les bioénergies = multiplication par 2 dans le SnW / Afterres
 - Niveau comparable avec le scénario NZE de l'Agence internationale de l'énergie (x 2) et celui de la Commission européenne pour le Fit-for-55 (x 1,7)
 - Le niveau médian de tous les scénarios examinés par le GIEC = x 3
- Biomasse forestière pour l'énergie :
 - Dans le scénario nW, on passe de 16 à 26 Mm³
 - Les scénarios de l'Ademe envisagent aussi une mobilisation supplémentaire de 10 Mm³

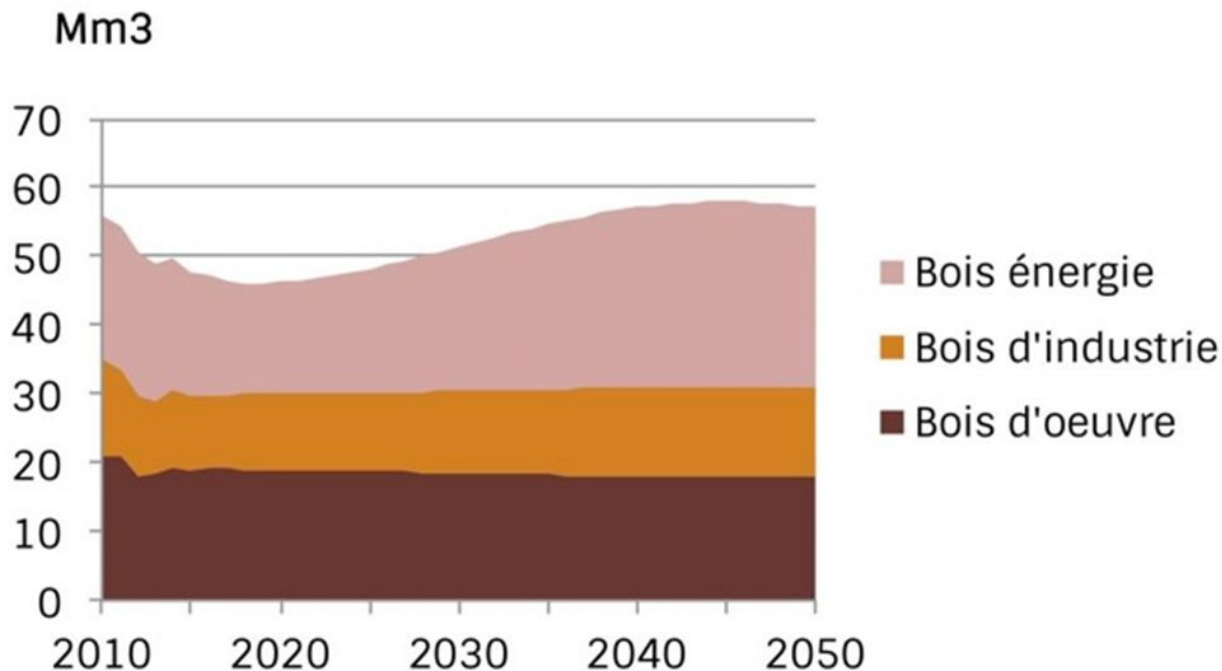


Scénario NZE de l'AIE (en EJ)

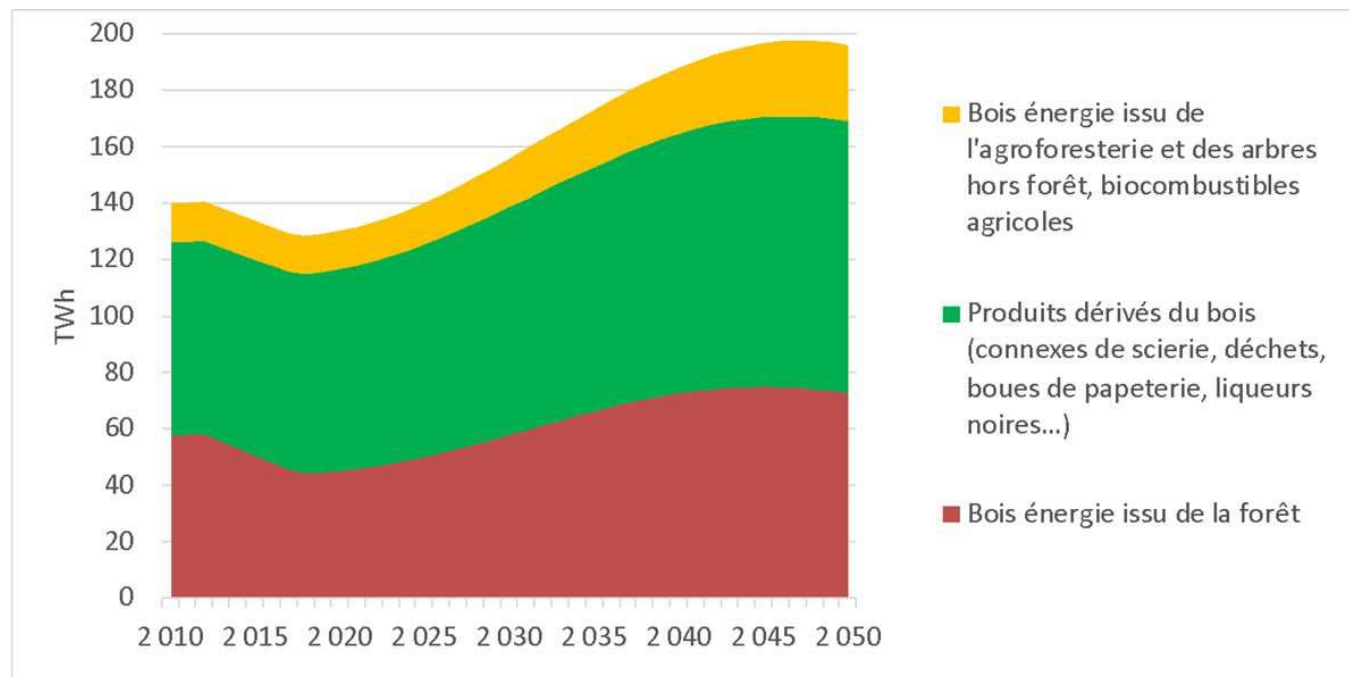
- Le scénario nW / Afterres s'inscrit dans un modèle global de systèmes agricoles résilients et producteurs de biodiversité
- Le bois est un matériau privilégié dans le bâtiment
 - pour 90% des constructions neuves
 - pour la rénovation : 1 Mt/an d'isolants biosourcés
- Les usages bois d'oeuvre et bois d'industrie diminuent (grâce à moins d'usages du papier et de certains emballages)

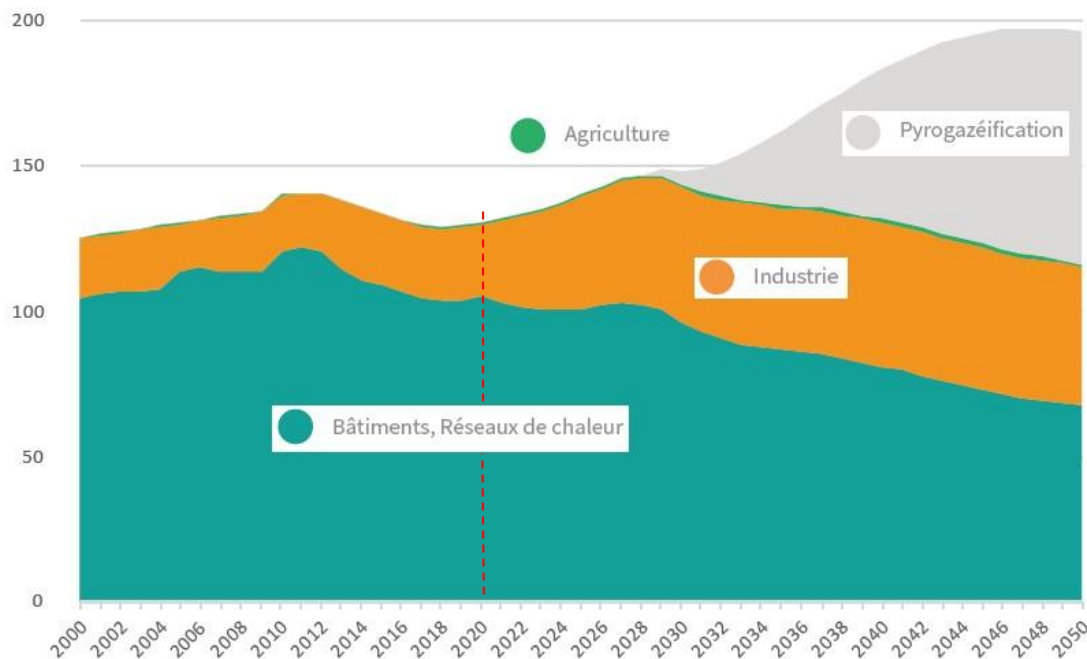


Le scénario nW articule les filières bois et les stratégies d'adaptation



Le scénario nW maintient les proportions bois de forêt / coproduits et augmente la collecte des différentes ressources





Usages énergétiques de la biomasse solide dans le SnW (en TWh)

Pyrogazéification : nouvelle filière pour produire du gaz renouvelable à partir de matières ligneuses

Industrie : développement des chaudières biomasse

Bâtiment : développement de la chaleur renouvelable mais meilleure isolation du parc



Forêt française = env. 17 millions d'hectares
(+6 Mha au XX^e siècle)

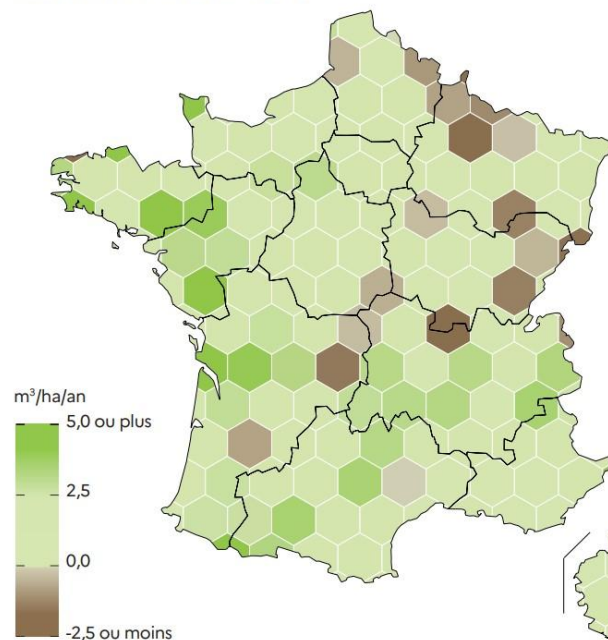
Depuis 2010 : + 60 000 ha par an

La récolte du bois pour tous les usages
de 2009 à 2017

= 60% de l'accroissement naturel

→ **la forêt grandit
et sera pérenne dans la transition**

RÉPARTITION DU BILAN DES FLUX DE BOIS
SUR LA PÉRIODE 2013-2021



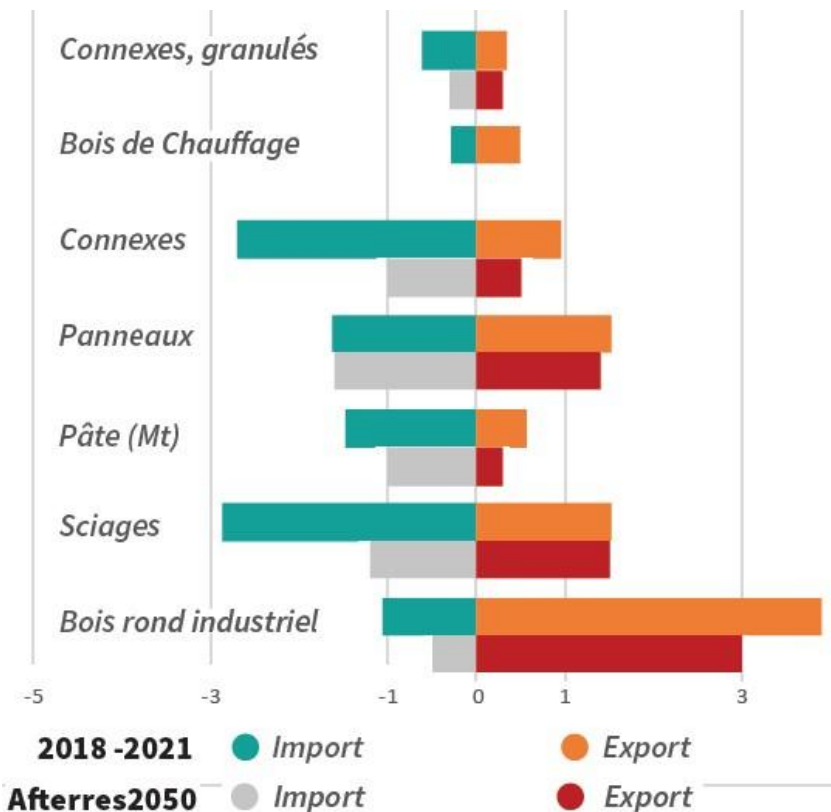
Inventaire forestier IGN 2023

- La combustion du bois (ou sa dégradation naturelle) émet du CO₂ qu'il a absorbé pendant sa croissance = bilan nul d'un point de vue climatique
- Néanmoins, à l'échelle nationale, il faut veiller à :
 - **des repeuplements en forêt réguliers et proportionnés aux prélèvements**
 - **des pratiques sylvicoles préservant les puits de carbone des sols**
 - **développer d'autres sources hors forêt : haies, agroforesteries, cultures énergétiques pérennes (taillis à courte rotation, miscanthus, etc.)**



- Les marchés du bois-énergie sont fortement pourvoyeurs d'activité économique :
 - **Le marché domestique = 4,3 Md€ et plus de 23800 emplois**
 - **Le marché collectif/tertiaire/industriel = 1,9 Md€ et plus de 7300 emplois**
 - **Les réseaux de chaleur = 644 M€ et 3450 emplois**
- Avec la crise énergétique de 2022, les ventes d'appareils de chauffage au bois ont augmenté.
Le soutien public aux projets collectifs du Fonds Chaleur est passé de 520 M€ en 2022 à 820 M€ en 2024

légende




Globalement, le scénario Afterres vise une plus grande autonomie et la baisse de la “déforestation importée”.

Pour la biomasse solide, il s’agit de moins importer de produits transformés et de rester exportateur nette de bois rond

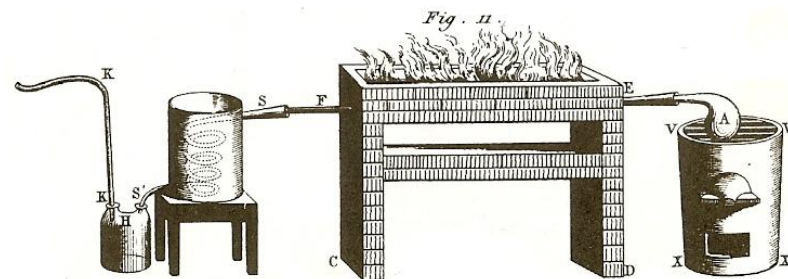
légende

- Le bois-énergie est une ressource essentielle à la production de chaleur et de gaz renouvelable pour l'avenir
- Les quantités nécessaires sont légèrement supérieures au niveau de prélèvement des années 2000 ; elles sont étroitement corrélées aux besoins en bois d'oeuvre et bois d'industrie qui diminuent
- Les pratiques sylvicoles doivent s'adapter aux modifications du climat et adapter les prélèvements à la préservation du puits de carbone forestier



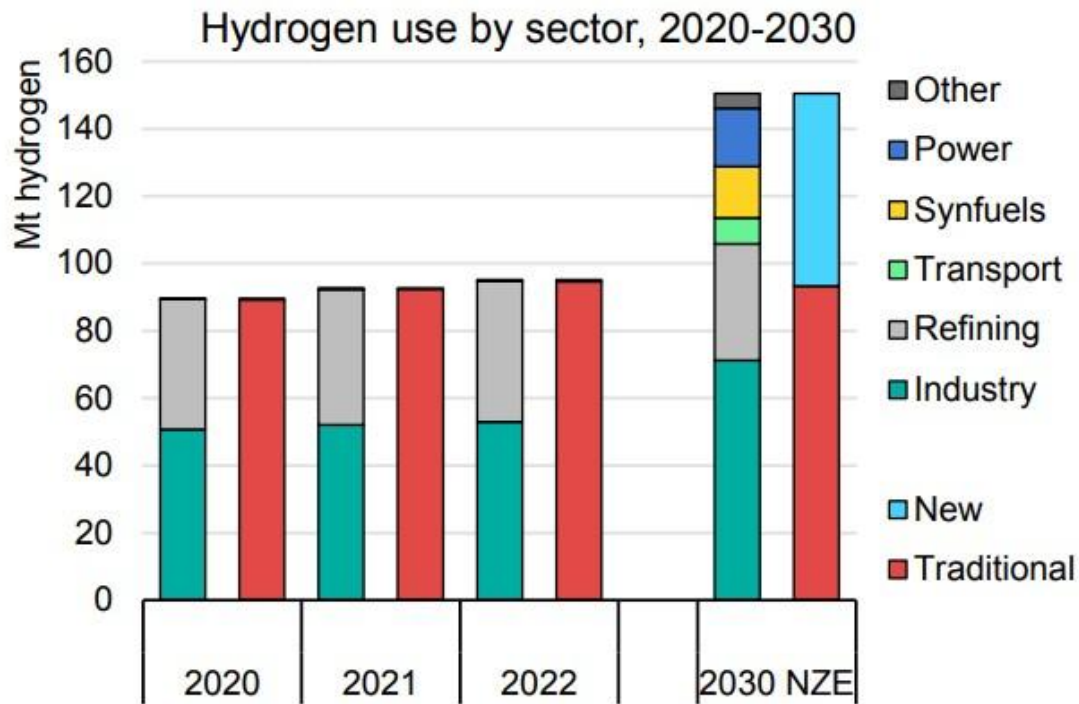
Capsule 10 : hydrogène

- L'air inflammable (1766, Cavendish) est nommé hydrogène par Lavoisier en 1783
- Production initiale par mélange de fer ou de zinc avec de l'acide sulfurique
- Première électrolyse de l'eau en 1800 (Nicholson et Carlisle)
- Pyrolyse de matières carbonées (bois, houille, résines, etc.) permet la production de gaz de houille, ou "gaz hydrogène carboné" dès 1800, contenant 50% d'hydrogène en volume
- Gaz à l'eau (thermolyse de l'eau sur charbon de bois) contient 95% d'H₂



Expérience de Lavoisier

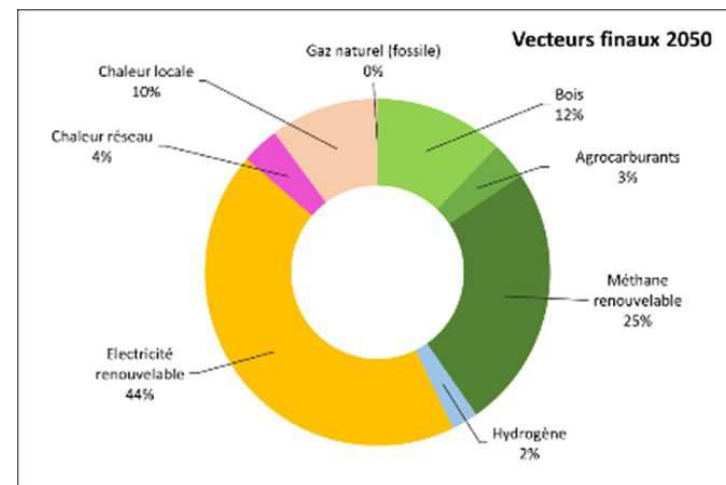
- Hydrogène = matière première essentielle dans l'économie actuelle pour :
 - la désulfuration dans le secteur pétrolier / raffinage = 41 Mt H₂
 - l'industrie chimique de l'ammoniac / engrais = 32 Mt H₂
 - l'industrie du méthanol = 16 Mt H₂
 - l'industrie de la sidérurgie (DRI) = 5,3 Mt H₂
- H₂ exclusivement produit à partir d'énergies fossiles ⇒ 900 Mt CO₂ eq
- En France, plus de 900 kt H₂ consommés = 10 Mt CO₂ eq mis
- Ces usages vont rester dominants, comme le montre les scénarios de l'Agence internationale de l'énergie



- Production mondiale d'H₂ “propre” en 2023 = 680 kt dont 100 kt par électrolyse
- Les projets en cours pourraient atteindre 20 Mt en 2030
- Scénario NZE de l’AIE prévoit forte hausse de la consommation et une diversification des usages

- En 2050, forte évolution des vecteurs : la biomasse (biométhane, agrocarburants, bois) et l'électricité renouvelable = 40% et 44% de la consommation
- Hydrogène = 2% des vecteurs finaux
- MAIS l'hydrogène a un rôle crucial pour :

- alimenter le réseau de méthane (injection directe ou après méthanation)
- participer à l'équilibrage du réseau électrique (modulation électrolyse)
- contribuer à la production industrielle (acier et chimie) en tant que matière première / vecteur non-énergétique



H₂ = premier poste de consommation d'électricité en 2050

Electrolyse en 2050 :

- 33 GW
- 91 TWh H₂ (PCS)
- 2,3 Mt H₂

Nouvelle filière à faire émerger !!

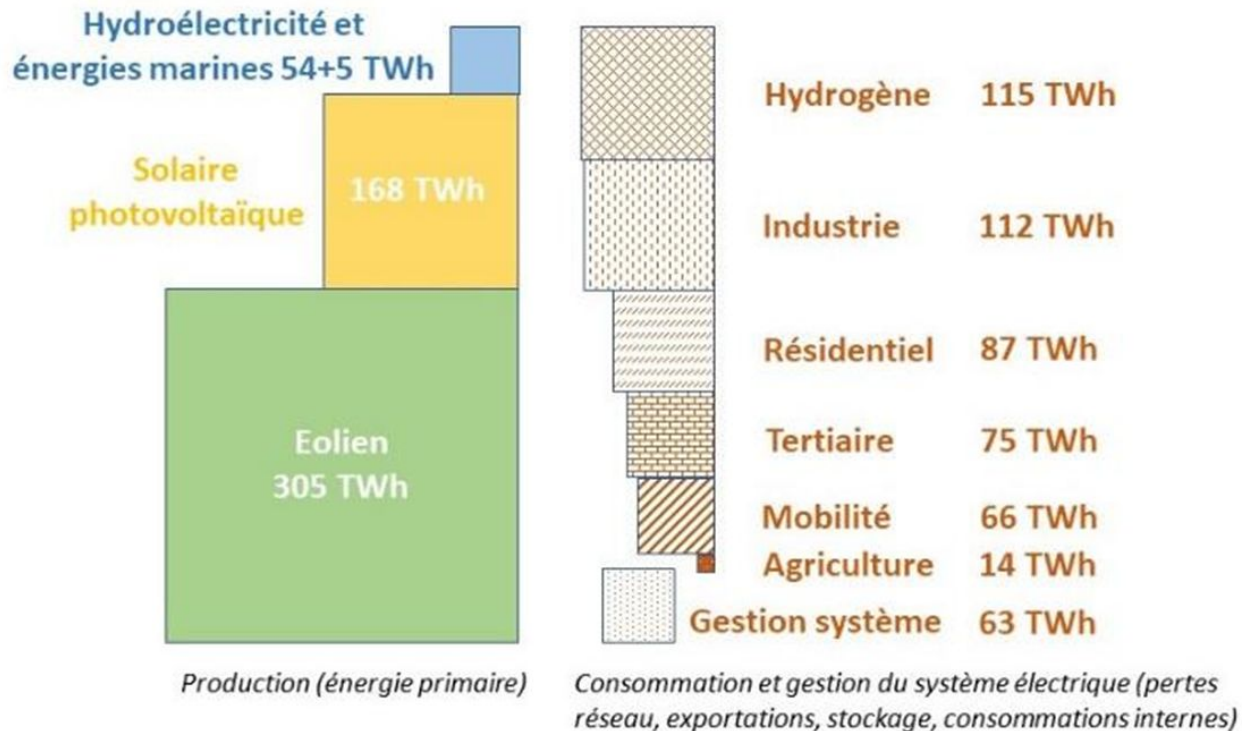
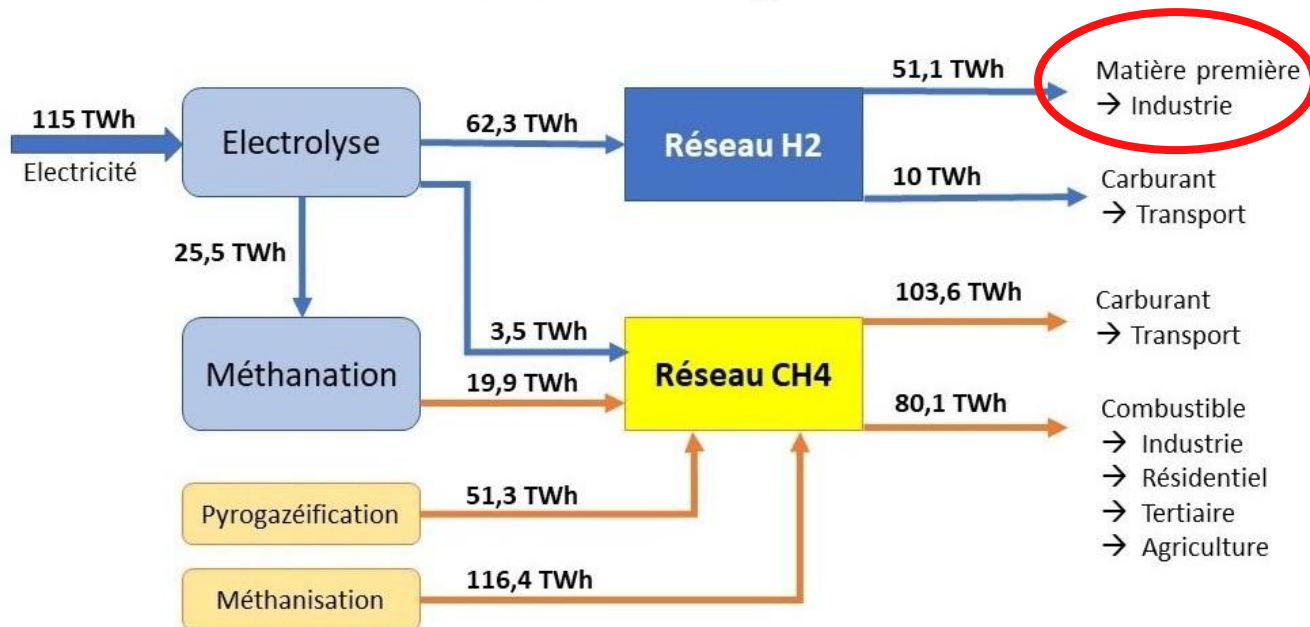


Diagramme des vecteurs hydrogène et méthane dans le scénario négaWatt en 2050



→ **Acier** primaire par oxydation directe de fer

→ **Ammoniac**

→ **Oléfines** à partir de méthanol produit à partir d'hydrogénation ($H_2 + CO_2$)

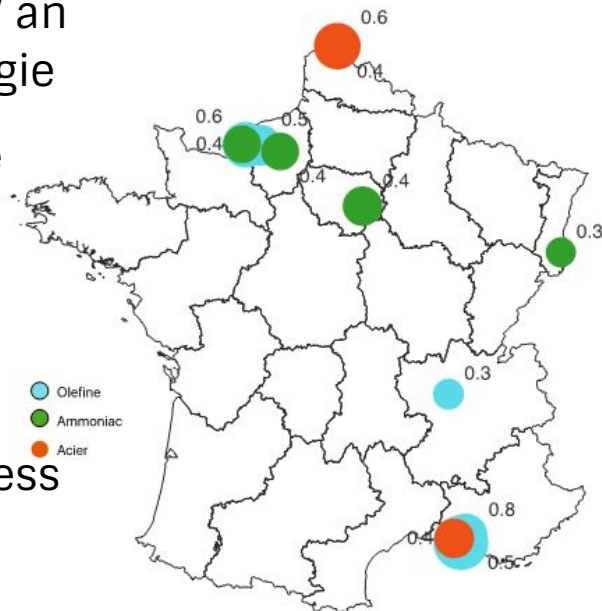
Au schéma s'ajoute les pertes de 23,7 TWh pour l'électrolyse, de 5,6 TWh pour la méthanation, de 1,2 TWh sur le réseau H2 et de 3,8 TWh sur le réseau CH4, ainsi que de 1,4 TWh pour la méthanisation et 28,6 TWh pour la pyrogazéification

- Actuellement : 30 MW d'électrolyse installés + 300 MW en cours
Objectif national : 6,5 GW en 2030 et plus de 10 GW en 2035
- Développement actuel surtout sur la mobilité (69 stations, 59 bus, 3 bennes à ordures, 950 véhicule légers dont 500 taxis à Paris)
⇒ besoin d'accélérer et de donner la priorité aux projets industriels !
- Principaux freins :
 - le coût des électrolyseurs
 - le coût de l'électricité
 - les solutions alternatives de vaporeformage avec captage du CO2

↘ C10 : hydrogène TROP DE CONSOMMATION D'EAU



- 33 GW d'électrolyse en 2050
= consommation brute de 20 millions de m³ d'eau / an
= 3% de la consommation actuelle industrie + énergie
- Enjeu de disponibilité locale à vérifier dans le cadre d'une gestion globale de la ressource en eau sous contrainte du bouleversement climatique
- Consommation nette d'eau des trois principaux secteurs industriels = 5 millions de m³
car le secteur des oléfines en rejette dans son process



Dans le scénario négaWatt, les démarches de sobriété et de substitution permettent de réduire les besoins en certains matériaux (plastiques, acier, engrais). Mais la réindustrialisation et la baisse des importations impliquent une production d'hydrogène importante par électrolyse.

Les enjeux “matière” sont à surveiller :

Électrolyseurs PEM - fluor (membrane), platine et iridium (métaux des catalyseurs)

Electrolyseurs SOFC - utilise des terres rares

Piles à combustible - éventuel enjeu sur le platine, mais le marché est encore loin d'être massif.

ASPI
dans
J'ai
pert

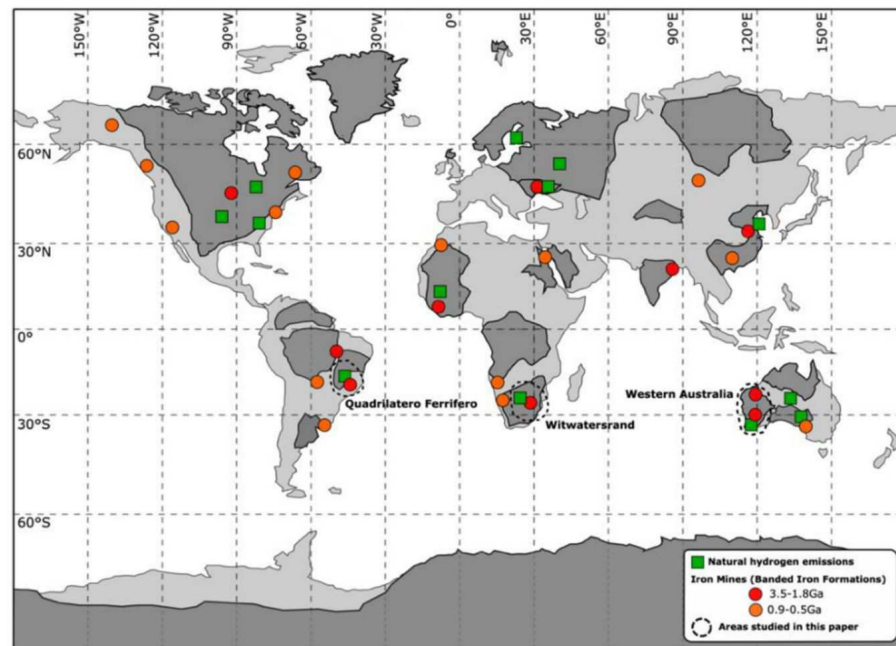
A m

L'hydrogène est présent dans certains sous-sol très anciens, mais grandes incertitudes sur les ressources et réserves disponibles.

Gisement en Lorraine sur un site d'exploration de méthane avec un taux de 15% d'H₂ à 1100 m de profondeur. Les simulations prévoient un taux de 90% à 3000 m de profondeur et un gisement potentiel de 46 Mt H₂

Une éventuelle exploitation ne verrait le jour qu'en 2035-2040.

⇒ pas une solution à court terme



- Le vecteur hydrogène fait face à un important enjeu de décarbonation : la solution sans énergies fossiles est l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité bas-carbone
- La priorité est de fournir de l'hydrogène aux secteurs industriels qui sont ou seront de forts consommateurs d'hydrogène "matière"
- L'hydrogène "énergie" est essentiel au futur système énergétique
 - **production de méthane renouvelable**
 - **flexibilité des électrolyseurs**
 - **transport (surtout lourd)**