

PROGRAMME RÉSILIENCE V11

Mix énergétique 2045 — Bilan général

Besoins sectoriels · Production bio-CH₄ · Déficit et leviers · Bilan carbone · Production nucléaire 2045

Cohérence V11 : chiffres issus du Programme Résilience V11 (mai 2026) — section 1.1 (bilan sectoriel), section 2.1 (EPR2/Sabatier), section 2.2 (biomasse ~262 TWh), section 3.1 (BEV vs Résilience), document Aviation V9 (gamme complète), Tracteur ÉREV Rex V11. Estimations 2045 soumises à validation sectorielle indépendante.

A · LA FRANCE AUJOURD'HUI — 1 600 TWh, TROIS VECTEURS

D'où vient l'énergie que nous consommons ?

Secteur	TWh	Électricité	Gaz / Pétrole	Électrifiable ?
■ Logements + tertiaire	500	~175 TWh (35 %)	~275 TWh gaz+fioul	Oui — PAC x3–4 déjà engagé
■ Industrie	350	~120 TWh (35 %)	~195 TWh (gaz 55 %)	Partiel — HT >500°C résiste
■ VL + VU + Bus	300	~15 TWh	~285 TWh (pétrole 95 %)	Majoritairement — Rex 23 % km
■ Poids lourds	250	~5 TWh	~245 TWh (pétrole 97 %)	Très partiellement — 70 % bio-GNV
→ Aviation	150	0	150 TWh kérosène 100 %	Long-courrier : non — bio-GNL seul
■ Agriculture + autres	50	~5 TWh	~45 TWh (pétrole 90 %)	Partiel — Rex tracteurs ÉREV
TOTAL	1 600	~320 TWh (20 %)	~1 195 TWh (75 %)	~60 % électrifiable

B · EN 2045 — CE QUE L'ÉLECTRIFICATION COUVRE, CE QU'ELLE LAISSE

Même en électrifiant tout ce qu'on peut — que reste-t-il sans solution ?

Secteur	Actuel	BEV élec	Résil. élec	Résil. bio-CH ₄	Vecteur résidu
■ Logements + tertiaire	500	250	250	—	Chaleur fatale pyrogaz.
■ Industrie	350	200	200	~22 TWh HT	Bio-CH ₄ procédés >500°C
■ VL + VU + Bus	300	150	120	75 TWh Rex	Bio-GNV ÉREV
■ Poids lourds	250	100	30	170 TWh	Bio-GNV obligatoire
→ Aviation	150 kéro	150 kéro fossile	~2 TWh (VTOL)	~110 TWh V9	Bio-GNL/GNV tous segments
■ Agriculture	50	40	38	~13 TWh Rex	Bio-GNV Rex tracteurs
TOTAL	1 600	750 TWh	~643 TWh	~390 TWh	Déficit ~128 TWh → L1/L2/L3

Ce que le tout-électrique ne résout pas : ~390 TWh restent structurellement hors portée de l'électrification — aviation tous segments, poids lourds, industrie haute T°, Rex tracteurs et voitures. Le BEV les conserve en fossile. Résilience les couvre avec bio-CH₄.

C · LES BESOINS RÉELS EN BIO-CH₄ — SECTEUR PAR SECTEUR

~417 TWh nécessaires pour une décarbonation complète

Usage	TWh bio-CH ₄	Pourquoi irremplaçable	Qualification V11
■ Poids lourds longue distance	170	Autonomie 800–1 000 km impossible en batterie seule. 70 % des km.	■ Robuste
■ VL + VU + Bus — Rex	75	23 % des km longue distance et zones sans bornes. Rex automatique.	■ Robuste
✈️ Aviation — tous segments	~110	VTOL élec. pur · Régionaux ÉREV bio-GNV · Moyen+long-courrier turbofan bio-GNL (V9)	Plausible — à affiner
■ Industrie HT résiduelle	~25	Procédés >500°C après max électrification et changements de procédés.	Plausible
■ Agriculture — Rex tracteurs	~12	Mix ÉREV · Rex bio-GNV 120–400 CV · Travaux lourds hors réseau.	Plausible
■ Soutien réseau hivernal	~25	Résidu après bon dimensionnement éolien offshore + nucléaire baseload. Stock GRDF 130 TWh.	Plausible
TOTAL BESOINS	~417 TWh	Dont 245 TWh robustes (mobilité lourde) + ~172 TWh plausibles	

D · PRODUCTION V11 ET LEVIERS — COMBLER LES ~128 TWh MANQUANTS

De la biomasse résiduelle aux cultures dédiées

Source	Voie	TWh/an	Qualification V11
BASE V11 — BIOMASSE RÉSIDUELLE DOCUMENTÉE			
Résidus culture + paille	Pyrogazéification	~48	■ Conditionnel
Bois mort + rémanents forestiers	Pyrogazéification	38–44	■ Robuste
Houppiers + branches	Pyrogazéification	22–27	■ Robuste
Sous-total pyrogaz. 150 sites × 1 000 t/j	—	~108–119	37–41 Mt/an biomasse sèche
Effluents d'élevage	Méthanisation	~70	■ PPE3 cible 60 TWh 2030
Biodéchets + STEP + CSR	Méthanisation	~40–50	Plausible
Sous-total méthanisation	—	~110–120	
Sabatier — surplus ENR été	Électrolyse + CO ₂	~25–30	Plausible TRL 7–8 · 35 Md€ CAPEX

Source	Voie	TWh/an	Qualification V11
TOTAL BASE V11	—	~262 TWh	Fourchette 254–282 TWh/an
DÉFICIT ~128 TWh — TROIS LEVIERS COMPLÉMENTAIRES			
L1 — Sabatier maximisé CO ₂ concentré gratuit sur les 150 sites + surplus ENR croissants	Électrolyse	+15–25	Plausible — dépend surplus ENR disponibles
L2 — Gaz fossile résiduel + séquestration Émissions fossile compensées : biochar –23 Mt + séquestration chimique/géologique CO ₂ biogénique concentré –35 Mt/an → bilan carbone négatif	Fossile + CCS	~60–80	■ Option économique — 3–4× moins cher que Sabatier. CH ₄ fossile acceptable à titre limité si séquestration > émissions.
L3 — Cultures dédiées miscanthus et autres Terres marginales priorité (ex-vignes, friches). Double séquestration : captation CO ₂ croissance + biochar millénaire.	Pyrogazéification	+15–45	Prospectif — levier de décarbonation profonde et retrait net CO ₂ atmosphérique
Avec L1 + L2 + L3	—	~350–430 TWh	Couverture totale possible

E • BILAN CARBONE SELON LES LEVIERS ACTIVÉS

De la base V11 à la décarbonation profonde

Scénario	Production CH ₄	Fossile résiduel	Séquestration totale	Bilan net
V11 base seule (~262 TWh)	~262 TWh	~128 TWh → ~26 Mt CO ₂	–23 Mt biochar	~+3 Mt — insuffisant
+ L1 Sabatier maximisé (+20 TWh)	~282 TWh	~108 TWh → ~22 Mt CO ₂	–23 Mt biochar	~–1 Mt — quasi neutre
+ L2 séquestration chimique/géologique CO ₂ concentré	~282 TWh	~108 TWh → ~22 Mt CO ₂	–23 Mt biochar –35 Mt géologique	~–36 Mt ■ Carbone négatif
+ L3 miscanthus 1 Mha (+20 TWh)	~302 TWh	~88 TWh → ~18 Mt CO ₂	–23 –35 –15 Mt	~–55 Mt ■ Fortement négatif
Couverture totale sans fossile (L1+L3 max)	~417 TWh	0 TWh fossile	–23 –35 –30 Mt	~–88 Mt ■ Maximum

F • PRODUCTION NUCLÉAIRE 2045 ET ÉVOLUTION POSSIBLE

La demande électrique double d'ici 2045. Le nucléaire, lui, ne peut pas doubler — ni industriellement, ni géographiquement, ni hydriquement.

F1 • Production nucléaire par scénario

En retenant un facteur de charge de 85 % (7 450 h/an) :

Scénario	Puissance garantie	TWh nucléaire/an	Besoins électriques	Solde ENR nécessaire
Aujourd'hui (référence)	~61 GW installés	~360 TWh	~320 TWh	Excédent — export
Programme actuel (6 EPR2 seulement)	~39 GW garantis	~290 TWh	~643 TWh (Résilience)	~353 TWh ENR
Résilience + 14 EPR2	~51 GW garantis	~383 TWh	~643 TWh	~260 TWh ENR
Tout-BEV + 14 EPR2	~51 GW garantis	~383 TWh	~750 TWh	~367 TWh ENR
Tout-BEV + 21 EPR2 (hypothèse)	~61,5 GW	~461 TWh	~750 TWh	~289 TWh ENR

Dans le scénario Résilience avec 14 EPR2, le nucléaire couvrirait ~60 % des besoins électriques (383/643 TWh) — contre ~100 % aujourd'hui. Le nucléaire assure la puissance garantie en base ; les ENR couvrent le delta en volume (~260 TWh) ; Résilience couvre par bio-CH₄ les ~390 TWh structurellement non électrifiables. Les trois sont simultanément nécessaires.

F2 · Pourquoi la puissance nucléaire ne peut pas doubler

Trois contraintes cumulatives plafonnent l'expansion nucléaire, indépendamment de la volonté politique :

Contrainte	Mécanisme	Conséquence
Pyramide d'âge — remplacement avant croissance	18 réacteurs de 900 MW mis en service avant 1981 auraient 64 à 68 ans en 2045. Les EPR2 compensent d'abord les retraits.	Gain net de puissance nucléaire : 0 à +10 GW selon le rythme des fermetures — pas +21 GW
Contrainte hydrique — sites côtiers en nombre limité	Les sites thermiquement fiables à 2045–2060 sont les sites maritimes. Les sites fluviaux (Loire, Garonne, Rhône sans glaciers) ont une vulnérabilité estivale croissante.	Au-delà de 14 EPR2, les sites supplémentaires seraient fluviaux. Le plafond réel est géographique et climatique, pas seulement industriel.
Cadence industrielle non démontrée	14 EPR2 = objectif gouvernemental documenté (6 engagés + 8 second palier). 21 EPR2 supposerait une cadence additionnelle après 30 ans de sous-investissement.	Le scénario tout-BEV nécessite 7 EPR2 de plus que l'objectif officiel — son déficit résiduel serait vraisemblablement comblé par du fossile non décarbonné.

Note : les puissances garanties et TWh 2045 sont des estimations du Programme Résilience V11. La puissance garantie (~30 GW parc résiduel) est construite sur la disponibilité en situation de contrainte simultanée estivale (canicule + étiaje + vieillissement), pas sur la production annuelle moyenne. Pour le détail de la contrainte hydrique par site, voir la note « Résilience énergétique 2045 — contrainte hydrique et puissance estivale garantie ».

Ce n'est pas « nucléaire ou Résilience » — c'est « nucléaire + ENR + Résilience », les trois simultanément nécessaires. Et Résilience est ce qui permet au système de fonctionner avec 14 EPR2 là où le tout-BEV en demanderait 21 non atteignables.

Note sur la couverture complète des besoins en bio-CH₄ : le Programme Résilience V11 documente une production de ~262 TWh/an depuis la biomasse résiduelle française. L'analyse sectorielle complète — intégrant l'aviation sur tous ses segments, l'industrie haute température et les tracteurs ÉREV — porte les besoins réels à ~390 TWh. Le déficit de ~128 TWh est couvert par trois

leviers complémentaires, dans l'ordre économique : (1) Sabatier maximisé sur surplus ENR ; (2) Séquestration chimique et géologique du CO₂ biogénique concentré des 150 sites (~35 Mt/an) — cette séquestration permet, à titre limité et résiduel, de compléter par du CH₄ fossile tout en conservant un bilan carbone fortement négatif ; (3) Cultures dédiées miscanthus sur terres marginales — levier de retrait net de CO₂ atmosphérique à long terme.