# Besoins énergétiques 2045, comparaison des trajectoires et programmation pluriannuelle des investissements — Scénario Résilience

Octobre 2026 · Document de synthèse stratégique · Usage institutionnel

Sources : Programme Résilience V11 (mai 2026) · Note cadrage système énergétique V11 · Tableau énergie V4 · RTE Bilan prévisionnel 2023 · RTE Bilan électrique 2024 · SDES Bilan énergétique 2023 · ADEME · GRTgaz/GRDF · IEA WEO 2024

*Ce document est une synthèse du Programme Résilience 2045, dont chaque sujet a fait l'objet d'une analyse approfondie. L'ensemble constitue un corpus de plus de 50 documents disponibles sur resilience2045.fr. Une analyse industrielle a été conduite pour identifier les acteurs nationaux susceptibles d'intervenir dans le déploiement des filières biomasse, pyrogazéification, méthanisation et bio-GNV.*

PROPOSITION POLITIQUE — À LIRE EN PREMIER

## La décision politique proposée

Résilience propose à la France de retenir une architecture énergétique duale : une électrification massive, complétée par un vecteur méthane renouvelable national réservé aux usages nécessitant stockage, autonomie, forte densité énergétique ou puissance pilotable.

CETTE ORIENTATION CONDUIT À PROGRAMMER SIMULTANÉMENT :

- Un parc nucléaire renforcé (14 EPR2) en baseload permanent
- Un développement ciblé des ENR (offshore prioritaire, solaire limité à ~90 GW)
- Un réseau électrique dimensionné pour les usages directs — sans surdimensionnement
- La conservation et conversion progressive du réseau gazier vers le bio-$CH_4$
- Le développement d'une filière nationale de pyrogazéification et de méthanisation
- Une mobilité légère principalement électrique, complétée par l'ÉREV bio-GNV
- Le bio-$CH_4$ / bio-GNL pour les usages lourds et difficiles à électrifier
- Une production massive de biochar permettant un retrait durable de carbone atmosphérique

**La décision proposée n'est donc pas de choisir entre électricité et gaz. Elle consiste à attribuer à chaque vecteur les usages pour lesquels il est techniquement, énergétiquement et économiquement le plus pertinent.**

Les hypothèses, calculs, dimensionnements et technologies qui la sous-tendent sont développés dans les études détaillées du Programme Résilience disponibles sur resilience2045.fr (plus de 50 documents). Ils peuvent être soumis à une expertise indépendante contradictoire avant décision.

## 1. Les besoins énergétiques de la France en 2045

La France consomme aujourd'hui ~1 500 TWh d'énergie finale (1 350 à 1 500 TWh selon les conventions statistiques), soit ~1 600 TWh en ajoutant les soutes internationales (aviation surtout) et les usages non énergétiques (chimie, plastiques, bitumes : ~75 TWh, non détaillés dans le tableau ci-dessous). Le Programme Résilience V11 retient ce périmètre de 1 600 TWh comme référence-système 2045, intégrant les marges de sécurité stratégiques, la réindustrialisation partielle, les data centers et la production de carburants renouvelables. Seulement 25 à 30 % de l'énergie finale actuelle est électrique (~400 TWh) — le reste est couvert par des énergies stockées (pétrole, gaz, bois).

### Décomposition des besoins par secteur

| Secteur | Aujourd'hui (TWh finale) | Tout-BEV 2045 (TWh élec.) | Résilience — Élec. (TWh élec.) | Résilience — Bio-$CH_4$ (TWh gaz) | Résilience — Therm. |
|---|---|---|---|---|---|
| Logements + tertiaire | 650 | 280 | 280 | — | 30 |
| Industrie | 280 | 200 | 200 | 22 | 10 |
| VL + VU + Bus (ÉREV) | 365 | 150 | 120 | 75 | — |
| Poids lourds longue distance | 105 | 50 | 15 | ~75 | — |
| Aviation (court + long-courrier) | 75 kéro | 75 kéro ✗ | ~10 (VTOL + court-courrier) | ~80 bio-GNL | — |
| Agriculture + autres | 50 | 40 | 40 | ~13 | 10 |

| Secteur | Aujourd'hui (TWh finale) | Tout-BEV 2045 (TWh élec.) | Résilience — Élec. (TWh élec.) | Résilience — Bio-$CH_4$ (TWh gaz) | Résilience — Therm. |
|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL | ~1 600 TWh | ~720 + 75 kéro | 665 TWh | ~265 TWh (~290 avec soutien réseau) | 50 TWh |

**ANGLE MORT DU TOUT-BEV — LECTURE DU POSTE AVIATION**

Tout-BEV conserve ~75 TWh de kerosene fossile (dont ~65 TWh de vols internationaux) faute de solution — ce n est pas un scenario zero fossile. Resilience deploie ~10 TWh electriques (VTOL et court-courrier, rendement 85%) et ~80 TWh de bio-CH4 (bio-GNV regional, bio-GNL moyen et long-courrier, rendement 30-35%). Ces chiffres ne s additionnent pas en TWh equivalents — les rendements sont tres differents. La couverture 2045 repose sur les vecteurs decarbones et l efficacite accrue des appareils. La demande aviation etant structurellement en croissance, aucune hypothese de reduction n est retenue — c est pourquoi le gisement bio-GNL doit etre developpe a grande echelle.

### Les cinq situations critiques à couvrir

| Situation | Déficit BEV | Déficit Résilience | Mécanisme Résilience |
|---|---|---|---|
| Grand froid hivernal (jan, −5 à −10°C) | −65 à −80 GW | −10 à −20 GW | Hydraulique 1re ligne · ÉREV thermique · bio-$CH_4$ pilotable |
| Anticyclone hivernal (3–5 jours sans vent) | −55 à −65 GW | −5 à −15 GW | Stockages souterrains ~130 TWh (Storengy, Teréga) · bio-$CH_4$ météo-indépendant |
| Canicule estivale (35–40°C) | −40 à −55 GW | −5 à −15 GW | Solaire fort · ÉREV limite recharge soirée |
| Grands départs estivaux | −70 à −90 GW | −10 à −20 GW | ÉREV autonomie GNV 500 km sans borne |
| Chassé-croisé (vendredi 18h) | −84 à −116 GW | −8 à −30 GW | ÉREV bio-GNV trajet + recharge lente nocturne |
| **Bilan** | **Rupture 5/5** | **Gérable 5/5** | **Réduction −70 à −90 % · mécanisme passif sans smart grid** |

## 2. Architecture fondamentale — Électricité + Bio-$CH_4$

**PRINCIPE — L'ÉLECTRICITÉ EST LA BASE, LE BIO-$CH_4$ EST SON COMPLÉMENT**

Le Programme Résilience n'est pas un programme bio-méthane. C'est un programme électrique complété par le bio-méthane. L'électricité reste le vecteur de base (~65 % des besoins finaux). Le bio-$CH_4$ intervient en sécurisation du réseau via GRDF et ses stocks, en optimisation des investissements (−7 EPR2, −84 Md€), et en complément sur les secteurs difficiles à électrifier : mobilité lourde longue distance, transport maritime, aviation, industrie haute température.

### Pourquoi $H_2$, carburants de synthèse et SAF ont été écartés

| Vecteur | Rendement puits→usage | Stockage saisonnier | Infrastructure | Verdict |
|---|---|---|---|---|
| Hydrogène $H_2$ | ~25–35 % | Très difficile (700 bar) | Tout à créer | Écarté — coût + géologie française défavorable |
| Carburants de synthèse (e-fuels) | ~15–25 % | Oui (liquide) | Partielle | Écarté — rendement trop faible (×2–3 inférieur au bio-$CH_4$) |
| SAF (aviation) | Variable | Oui | Partielle | Écarté — 0,6 % de la conso actuelle en 2025, ×80 impossible d'ici 2035 |
| Bio-$CH_4$ (Résilience) | ~60–70 % | Stockages ~130 TWh ✓ | 200 000 km existants | Retenu — stockage + infrastructure + co-bénéfices biochar |

## 3. Mix électrique Résilience — Optimisation par disponibilité temporelle

L'objectif est de maximiser la puissance électrique disponible à tout moment, quelles que soient les conditions climatiques, afin de minimiser le recours au bio-$CH_4$ à un rôle de complément structurel et non de secours variable coûteux.

### Matrice de complémentarité des sources

| Source | FC annuel | Hiver | Été | Anticyclone | Nuit | Rôle dans le mix |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nucléaire (baseload) | 85,9 %* | Fort ✓ | Fort ✓ | Fort ✓ | Fort ✓ | Colonne vertébrale — baseload permanent |
| Hydraulique (barrages + STEP) | ~25 %** | Disponible ✓ | Réservoirs bas ≈ | Disponible ✓ | Disponible ✓ | PREMIÈRE LIGNE DE SECOURS PILOTABLE — démarrage en minutes · ~25 GW · atout souverain |
| Éolien offshore | 35–40 % | Très fort ✓ | Modéré ≈ | Nul ✗ | Fort ✓ | Complément hiver · critique pour la Dunkelflaute |
| Éolien terrestre | ~22–25 % | Bon ✓ | Faible ≈ | Nul ✗ | Bon ✓ | Complément diffus · répartition géographique large |
| Solaire PV | 14–16 % | Très faible ✗ | Très fort ✓ | Fort ✓ | Nul ✗ | Complément été · canicule · inutile en Dunkelflaute |
| Sabatier (électrolyseurs) | Variable | Absorbe surplus | Absorbe surplus | Désactivé ✓ | Absorbe surplus | Régulateur — transforme surplus ENR en $CH_4$ stocké |
| Bio-$CH_4$ (secours pilotable) | À la demande | Disponible ✓ | Disponible ✓ | Disponible ✓ | Disponible ✓ | Dernier recours + mobilité lourde + aviation · météo-indépendant |

*FC 85,9 % avec Sabatier vs 75,9 % sans (Tout-BEV). **Hydraulique : FC annuel apparent ~25 % — usage réel en réserve de puissance : les barrages sont retenus pour les pointes critiques (démarrage en quelques minutes) avant recours au bio-$CH_4$. Les STEP stockent les surplus ENR estivaux pour restitution en hiver.

### Mix électrique Résilience — Répartition cible 2045 (665 TWh consommés · ~725 TWh produits)

| Source | Volume | Part | Rôle |
|---|---|---|---|
| Nucléaire (baseload Sabatier) | ~400 TWh | 55 % | Pilotable · permanent · FC 85,9 % |
| Éolien offshore | ~100 TWh | 14 % | Fort en hiver · complément essentiel |
| Solaire PV | ~100 TWh | 14 % | Fort en été · toitures techniques · ombrières · sol sur terrains délaissés · agrivoltaïsme d'élevage |
| Hydraulique | ~65 TWh | 9 % | Réserve de puissance pilotable · STEP |
| Éolien terrestre | ~60 TWh | 8 % | Diffus · complémentaire géographiquement |
| **TOTAL PRODUCTION** | **~725 TWh** | **100 %** | **665 TWh consommés + ~60 TWh de pertes réseau et de surplus valorisés par Sabatier** |

---

## 4. Programmation Pluriannuelle de l'Énergie — Investissements 2025–2045

La PPE Résilience est construite sur un principe simple : investir ce qui est nécessaire et suffisant, dans l'ordre qui maximise la disponibilité à chaque étape, en évitant les dépenses erratiques actuelles.

### Tableau de synthèse des investissements

| Poste | Capacité cible | CAPEX estimé | Qualif. | Logique / Priorité |
|---|---|---|---|---|
| **A — PRODUCTION ÉLECTRIQUE** | | | | |
| Nucléaire — EPR2 (14 unités) | 14 × 1,65 GW = +23,1 GW | 168 Md€ | ✓Robuste | Baseload permanent · max industriellement faisable d'ici 2045 |

| Poste | Capacité cible | CAPEX estimé | Qualif. | Logique / Priorité |
|---|---|---|---|---|
| Éolien offshore (+18–22 GW au-delà des ~7,8 GW attribués) | ~29 GW total | 58–84 Md€ | ✓Robuste | Priorité sur terrestre · FC 35–40 % · meilleure disponibilité hivernale |
| Éolien terrestre (+7–8 GW) | ~31 GW total | 8–12 Md€ | ✓Robuste | Complémentarité géographique · limité pour éviter les conflits d'usage |
| Solaire PV (+65–70 GW) | ~90 GW total | 49–60 Md€ | ✓Robuste | Limité à ~90 GW · au-delà rendement marginal décroissant |
| **Sous-total production** | **—** | **283–324 Md€** | **—** | **—** |
| **B — INFRASTRUCTURE ET FLEXIBILITÉ** | | | | |
| Hydraulique — modernisation + STEP | ~25 GW existants + STEP | 5–10 Md€ | ✓Existant | Réserve de puissance pilotable · atout souverain · parc amorti |
| Réseau RTE — renforcement ciblé | — | 50–70 Md€ | ✓ | Ciblé offshore + ÉREV · −40 à −50 Md€ vs Tout-BEV grâce à GRDF |
| Stations bio-GNV (VL + PL) | ~4 700 stations | 4,5–11 Md€ | ✓ | Réseau autoroutier d'abord · 1–2 M€/station vs 5 M€ borne DC |
| Électrolyseurs PEM Sabatier (50 GW) | 50 GW | 35 Md€ | Plausible TRL 7–8 | Absorbe 67 TWh ENR curtailés · FC nucléaire 85,9 % · −7 EPR2 |
| **Valorisation $CO_2$ biogénique** | **~35 Mt $CO_2$/an dispo** | **8–10 Md€** | **Plausible** | **Séquestration géologique + substitution $CO_2$ fossile industriel** |
| **Sous-total infrastructure** | **—** | **103–136 Md€** | **—** | **—** |
| C — FILIÈRES BIO-$CH_4$ (COUCHE RÉSILIENCE) | | | | |
| Pyrogazéification 150 sites × 1 000 t/j | ~130–145 TWh $CH_4$/an | 69 Md€ | ✓ Autofinancé 8–12 ans | Actif productif · revenus ~12–20 Md€/an · payback 8–12 ans (4–8 ans avec revenus carbone CRCF) |
| Méthanisation biomasse humide + Sabatier | ~110–120 TWh $CH_4$/an (~70 méthanisation + ~40 Sabatier) | 18 Md€ | ✓ | Filière existante (~13 TWh injectés en 2025 ; PPE3 : 44 TWh en 2030) · CIVE + effluents + biodéchets + boues · retour digestat |
| **R&D ÉREV + certifications** | **—** | **4,5 Md€** | **✓** | **Certification RED III · voie carburants neutres règlement 2035 · Renault/Stellantis** |
| **Sous-total filières bio-$CH_4$** | **~262 TWh $CH_4$/an** | **91,5 Md€ brut** | **Autofinancé à partir de ~2035** | **Revenus ~25–30 Md€/an à maturité · ~300 Md€ cumulés sur 20 ans** |
| **D — VÉHICULES** | | | | |
| Surcoût ÉREV vs diesel (33 M véhicules) | 33 M véhicules | 80–140 Md€ | Plausible | Batterie 20 kWh vs 50–80 kWh BEV · surcoût compensé par économies carburant |
| TOTAL CAPEX 2025–2045 | — | 540–690 Md€ | vs 794–1 096 Md€ BEV | Économie ~315 Md€ · auxquels s'ajoutent ~300 Md€ de revenus des filières bio-$CH_4$ sur 20 ans |

## Séquençage 2025–2045 — Phases et jalons

| Phase / Période | Actions clés | CAPEX indicatif |
|---|---|---|
| 2025–2027 Phase réglementaire | Loi bio-$CH_4$ CfD 15 ans · mandat flottes captives GNV · reconnaissance ÉREV bio-GNV dans la révision du règlement 2035 · appel d'offres offshore accéléré · décision Penly + Gravelines | 2–5 Md€ État + 30–50 Md€ privés déclenchés |
| 2027–2030 Phase 0 — Validation | 5 sites pilotes pyrogazéification · 500 stations bio-GNV · 8–10 GW offshore · formation 5 000 techniciens · SANS validation Phase 0 → pas de Phase 1 | ~2,5–3 Md€ pyrogaz. · ~25–35 Md€ ENR · ~5 Md€ stations |
| 2029–2033 Phase 1 — Déploiement | 75 sites pyrogazéification Zone A · 3 M ÉREV · 2 000 stations bio-GNV · éolien offshore 18–22 GW total · solaire ~65–70 GW · Sabatier 1ers 15 GW · acteurs nationaux identifiés (Renault, Stellantis, TotalEnergies, Engie, GRDF, BPI, CDC, BEI) | ~35 Md€ pyrogaz. · ~60–80 Md€ ENR · ~120 Md€ EPR2 (Penly+Gravelines) |

| Phase / Période | Actions clés | CAPEX indicatif |
|---|---|---|
| 2033–2040 Phase 2 — Maturité | 150 sites pyrogazéification · 8–12 M ÉREV · mix électrique complet (~90 GW solaire · ~29 GW offshore · ~53 GW nucléaire) · Sabatier 50 GW · FC nucléaire 85,9 % · 23 Mt $CO_2$/an biochar · export technologie | ~35 Md€ pyrogaz. · ~30 Md€ ENR · ~30 Md€ Sabatier · ~48 Md€ EPR2 |
| 2040–2045 Régime établi | Système complet · zéro fossile · bilan net négatif (~–55 Mt $CO_2$eq/an avec séquestration géologique) · 200 000+ emplois · éolien flottant optionnel · SMR NUWARD si délais tenus · biochar autofinancé | ~20–30 Md€ ajustements · Revenus bio-$CH_4$ ~25–30 Md€/an |

## 5. Bilan — Ce que la PPE évite et ce qu'elle garantit

### Dépenses erratiques évitées

| Problème évité | Coût évité | Comment Résilience l'élimine |
|---|---|---|
| Curtailment ENR (éolien/solaire stoppés) | Milliards €/an | Sabatier absorbe instantanément → méthane injecté et stocké dans le réseau gazier |
| Surdimensionnement nucléaire (21 EPR2 vs 14) | 84 Md€ | FC 85,9 % avec Sabatier → 7 EPR2 évités |
| Renforcement réseau RTE pour pics BEV | 40–50 Md€ réseau | ÉREV décale la demande + GRDF absorbe la pointe |
| Dépréciation actifs GRDF (200 000 km) | 100–200 Md€ | GRDF devient vecteur central bio-$CH_4$ → actif valorisé |
| Aviation non traitée (~75 TWh kérosène) | Objectif climatique non atteint | Bio-GNL long-courrier + électrique court-courrier |
| Pari $H_2$ infrastructure (rendement 25–35 %) | 100–200 Md€ si erreur | Bio-$CH_4$ sur GRDF existant · $H_2$ réservé à l'industrie spécifique |

### Garanties du scénario Résilience

| Indicateur | Valeur | Indicateur | Valeur |
|---|---|---|---|
| Situations critiques couvertes | 5 / 5 | Fossiles résiduels | Zéro |
| Stockage saisonnier | ~130 TWh (stockages souterrains) | Séquestration biochar (conception) | 23 Mt $CO_2$/an |
| Dépendance imports énergie | Quasi zéro | Bilan carbone 2045 | ~–55 Mt/an (–5 à –17 avec biochar seul) |
| CAPEX total transition | 540–690 Md€ | Économie vs Tout-BEV | ~315 Md€ |
| Emplois non délocalisables | 200 000+ | Aviation décarbonée | Oui (bio-GNL) |
| EPR2 évités vs BEV | 7 unités · 84 Md€ | Actifs GRDF préservés | 100–200 Md€ |

## 6. Engagements climatiques — Au-delà de la neutralité

La trajectoire Résilience ne se contente pas de décarboner l'énergie. Elle produit un bilan carbone durablement négatif à partir de ~2042 — elle retire plus de $CO_2$ de l'atmosphère qu'elle n'en émet. C'est la différence entre neutralité carbone (arrêter de dégrader) et restauration climatique (réparer).

| Mécanisme | Volume | Nature du bénéfice | Permanence |
|---|---|---|---|
| 1. Substitution fossile (énergie) | ~250–280 Mt $CO_2$/an évités | Réduction d'émissions — transport, chauffage, industrie | Tant que les fossiles sont substitués |
| 2. Séquestration biochar (EBC certifié) | ~20–23 Mt $CO_2$/an | Retrait durable · H/Corg ≤ 0,4 · T° ≥ 550°C · CRCF UE (3 fév. 2026) | Permanente — CDR reconnu UE |

| Mécanisme | Volume | Nature du bénéfice | Permanence |
|---|---|---|---|
| 3. $CO_2$ biogénique — séquestration géologique | Fraction de ~35 Mt/an | Minéralisation CarbFix ou stockage géologique · additif biochar | Permanente — plurimillénaire |
| 4. $CO_2$ biogénique — valorisation industrielle | Fraction de ~35 Mt/an | Substitution $CO_2$ fossile (serres, chimie verte, Sabatier) | Temporaire — stockage en produit |
| **BILAN NET 2045** | **~–55 Mt $CO_2$eq/an (jusqu'à –80 avec cultures dédiées)** | **France contribue à la restauration du climat** | **Croissant avec le déploiement** |

Le bilan net se construit par étapes : ~−5 à −17 Mt $CO_2$/an avec le biochar seul (socle robuste, biochar de 8 à 23 Mt selon les rendements) ; ~−55 Mt $CO_2$/an avec, en plus, la séquestration géologique du $CO_2$ biogénique concentré (scénario central, infrastructures $CO_2$ à développer) ; jusqu'à −80 Mt $CO_2$/an avec des cultures dédiées sur terres marginales (potentiel prospectif). Périmètre : système énergétique, hors émissions agricoles de $CH_4$ et $N_2O$.

## Miscanthus et reconstruction des territoires dégradés

Les zones forestières brûlées, friches climatiques et terres en déprise constituent un défi croissant. La combinaison miscanthus + pyrogazéification offre un outil économique de reconstruction : le miscanthus s'implante rapidement sur terres dégradées, stabilise les sols, fournit une biomasse contractualisable sur 15 ans dont les revenus de pyrogazéification financent les replantations progressives. Quand la forêt reconstituée prend le relais, le miscanthus se retire progressivement. L'entretien et la reconstruction deviennent une activité productive plutôt qu'une dépense publique.

→ Pour le détail sur la séquestration forestière et la logique stock/puits, voir la note de positionnement stratégique V5 « Pourquoi les puits naturels ne peuvent pas porter seuls la stratégie climatique de 2045 » — disponible sur resilience2045.fr.

## Conformité aux engagements européens et internationaux

| Cadre | Exigence | Réponse Résilience | Statut |
|---|---|---|---|
| Règlement LULUCF | Maintien des puits terrestres | Entretien forestier financé par boucle bio-$CH_4$ · forêts privées gérées | ✓ Conforme et au-delà |
| CRCF UE (3 fév. 2026) | Permanent Carbon Removal certifiable | Biochar EBC Premium (H/Corg ≤ 0,4) reconnu explicitement CDR permanent | ✓ Reconnaissance obtenue |
| Accord de Paris — neutralité 2050 | Émissions nettes = 0 avant 2050 | Bilan net négatif atteint dès ~2042 en scénario central | ✓ Atteint avec avance |
| Règlement 2035 — fin ICE | Zéro émission tailpipe en 2035 | ÉREV bio-GNV = zéro émission · voie « carburants neutres en $CO_2$ » à sécuriser (art. 5a de la proposition de révision du règlement 2019/631, déc. 2025) | ⚠ Exemption à sécuriser |
| REPowerEU | Réduire dépendance aux imports fossiles | Bio-$CH_4$ 100 % national · non délocalisable · non embargable | ✓ Souveraineté totale |

**POUR ALLER PLUS LOIN — LE CORPUS RÉSILIENCE**

Ce document est une synthèse. Chacun des sujets abordés — gisements biomasse, logistique territoriale, économie par site, comparaison CAPEX, modèle fiscal, géopolitique européenne, acteurs industriels, trajectoire $CO_2$ — a fait l'objet d'analyses approfondies dans le corpus de plus de 50 documents disponibles sur resilience2045.fr. Une analyse industrielle sectorielle identifie les acteurs français capables d'intervenir dès la Phase 0 dans chaque maillon de la chaîne.

**Sources et documents de référence**

Programme Resilience V11 (mai 2026) · Note cadrage systeme energetique V11 · Tableau energie V4 (juillet 2026) · Synthese decideurs V3 · Souverainete energetique V11 (mai 2026) · RTE Bilan previsionnel 2023 · RTE Bilan electrique 2024 · SDES Bilan energetique 2023 · ADEME · GRTgaz/GRDF · IEA WEO 2024 · Cour des Comptes EPR 2022 · EDF NP 2023 · BloombergNEF 2024 · BEI 2024 · resilience2045.fr