

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

Août 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 · 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-CH₄
- ▶ Le développement d'une filière nationale de pyrogazéification et de méthanisation
- ▶ Une mobilité légère principalement électrique, complétée par l'ÉREV bio-GNV
- ▶ Le bio-CH₄ / 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 entre 1 350 et 1 600 TWh d'énergie finale. Le Programme Résilience V11 travaille sur 1 600 TWh comme objectif-système 2045, intégrant les marges de sécurité stratégiques, la réindustrialisation partielle, les data centers et la production de carburants renouvelables. Seulement 32 % de l'énergie finale actuelle est électrique — les 68 % restants sont couverts par des énergies stockées (pétrole, gaz, bois).

Décomposition des besoins par secteur

Secteur	Aujourd'hui	Tout-BEV 2045	Résilience — Elec.	Résilience — Bio-CH ₄	Résilience — Therm.
Logements + tertiaire	500	250	250	—	30
Industrie	350	200	200	10	10
VL + VU + Bus (ÉREV)	300	150	120	75	—
Poids lourds longue distance	250	100	30	170	—
Aviation (court + long-courrier)	150 kéro	150 kéro ✗	25	50 bio-GNL	—
Agriculture + autres	50	40	40	—	10
TOTAL	1 600 TWh	~740 + 150 kéro	665 TWh	295 TWh	50 TWh

ANGLE MORT DU TOUT-BEV — LECTURE DU POSTE AVIATION

Tout-BEV conserve 150 TWh de kerosene fossile faute de solution — ce n'est pas un scénario zéro fossile. Résilience déploie 25 TWh électriques (court-courrier, rendement 85%) et 50 TWh bio-GNL (long-courrier, rendement 30-35%). Ces chiffres ne s'additionnent pas en TWh équivalents — les rendements sont très différents. La couverture 2045 repose sur les vecteurs décarbonés et l'efficacité accrue des appareils. La demande aviation étant structurellement en croissance, aucune hypothèse de réduction n'est retenue — c'est pourquoi le gisement bio-GNL doit être développé à grande échelle.

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	Stockage GRDF 130 TWh · 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-CH₄

PRINCIPE — L'ÉLECTRICITÉ EST LA BASE, LE BIO-CH₄ 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-CH₄ intervient en sécurisation du réseau via GRDF et ses stocks, en optimisation des investissements (-7 EPR2, -84 Mde), et en complément sur les secteurs difficiles à électrifier : mobilité lourde longue distance, transport maritime, aviation, industrie haute température.

Pourquoi H₂, 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 %	GRDF 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-CH₄ 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 —

Source	FC annuel	Hiver	Été	Anticyclone	Nuit	Rôle dans le mix
						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	25–30 %	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-CH₄. Les STEP stockent les surplus ENR estivaux pour restitution en hiver.

Mix électrique Résilience — Répartition cible 2045 (665 TWh/an)

Source	Volume	Part	Rôle
Nucléaire (baseload Sabatier)	~380 TWh	57 %	Pilotable · permanent · FC 85,9 %
Éolien offshore	~100 TWh	15 %	Fort en hiver · complément essentiel
Solaire PV	~100 TWh	15 %	Fort en été · agrivoltaïsme + toitures
Hydraulique	~65 TWh	10 %	Réserve de puissance pilotable · STEP
Éolien terrestre	~20 TWh	3 %	Diffus · complémentaire géographiquement
TOTAL ÉLECTRIQUE	665 TWh	100 %	Zéro fossile · mix complémentaire optimisé

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 Mde	✓ Robuste	Baseload permanent · max industriellement faisable d'ici 2045
Éolien offshore (+18–22 GW)	~29 GW total	58–84 Mde	✓ Robuste	Priorité sur terrestre · FC 35–40 % · meilleure disponibilité hivernale
Éolien terrestre (+7–8 GW)	~25 GW total	8–12 Mde	✓ Robuste	Complémentarité géographique · limité pour éviter les conflits d'usage
Solaire PV (+65–70 GW)	~90 GW total	49–60 Mde	✓ Robuste	Limité à ~90 GW · au-delà rendement marginal décroissant
Sous-total production	—	283–324 Mde	—	—

Poste	Capacité cible	CAPEX estimé	Qualif.	Logique / Priorité
B — INFRASTRUCTURE ET FLEXIBILITÉ				
Hydraulique — modernisation + STEP	~25 GW existants + STEP	5–10 Mde	✓ Existant	Réserve de puissance pilotable · atout souverain · parc amorti
Réseau RTE — renforcement ciblé	—	50–70 Mde	✓	Ciblé offshore + ÉREV · -40 à -50 Mde vs Tout-BEV grâce à GRDF
Stations bio-GNV (VL + PL)	~4 700 stations	4,5–11 Mde	✓	Réseau autoroutier d'abord · 1–2 M€/station vs 5 M€ borne DC
Électrolyseurs PEM Sabatier (50 GW)	50 GW	35 Mde	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 Mde	Plausible	Séquestration géologique + substitution CO ₂ fossile industriel
Sous-total infrastructure	—	103–136 Mde	—	—
C — FILIÈRES BIO-CH₄ (COUCHE RÉSILIENCE)				
Pyrogazéification 150 sites × 1 000 t/j	~144–172 TWh CH ₄ /an	69 Mde	✓ Autofinancé 5–8 ans	Actif productif · revenus ~35 Mde/an · payback 5–8 ans prudent
Méthanisation biomasse humide	~58–82 TWh CH ₄ /an	18 Mde	✓	Filière existante · CIVE + effluents + boues · retour digestat
R&D ÉREV + certifications	—	4,5 Mde	✓	Certification RED III · exemption règlement 2035 · Renault/Stellantis
Sous-total filières bio-CH₄	~262 TWh CH₄/an	91,5 Mde brut	Autofinancé à partir de ~2035	Revenus cumulés ~700 Mde sur 20 ans
D — VÉHICULES				
Surcoût ÉREV vs diesel (33 M véhicules)	33 M véhicules	80–140 Mde	Plausible	Batterie 20 kWh vs 50–80 kWh BEV · surcoût compensé par économies carburant
TOTAL CAPEX 2025–2045	—	540–690 Mde	vs 794–1 096 Mde BEV	Économie ~315 Mde · dont ~700 Mde revenus nets sur 20 ans (filiales bio-CH ₄)

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 · exemption ÉREV règlement 2035 · appel d'offres offshore accéléré · décision Penly + Gravelines	2–5 Mde État + 30–50 Mde 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 Mde pyrogaz. · ~25–35 Mde ENR · ~5 Mde 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 Mde pyrogaz. · ~60–80 Mde ENR · ~120 Mde EPR2 (Penly+Gravelines)
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 Mde pyrogaz. · ~30 Mde ENR · ~30 Mde Sabatier · ~48 Mde EPR2
2040–2045 Régime établi	Système complet · zéro fossile · -55 à -80 Mt CO ₂ eq/an · 200 000+ emplois · éolien flottant optionnel · SMR NUWARD si délais tenus · biochar autofinancé	~20–30 Mde ajustements · Revenus bio-CH ₄ ~35 Mde/an

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

Dépenses erratiques évitées

Problème évité	Coût évité	Comment Résilience l'élimine
Curtaînement ENR (éolien/solaire stoppés)	Milliards €/an	Sabatier absorbe instantanément → méthane stocké GRDF
Surdimensionnement nucléaire (21 EPR2 vs 14)	84 Mde	FC 85,9 % avec Sabatier → 7 EPR2 évités
Renforcement réseau RTE pour pics BEV	40-50 Mde réseau	ÉREV décale la demande + GRDF absorbe la pointe
Dépréciation actifs GRDF (200 000 km)	100-200 Mde	GRDF devient vecteur central bio-CH ₄ → actif valorisé
Aviation non traitée (150 TWh kérosène)	Objectif climatique non atteint	Bio-GNL long-courrier + électrique court-courrier
Pari H ₂ infrastructure (rendement 25-35 %)	100-200 Mde 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 GRDF	Séquestration biochar certifiée	23 Mt CO ₂ /an
Dépendance imports énergie	Quasi zéro	Bilan carbone 2045	-55 à -80 Mt/an
CAPEX total transition	540-690 Mde	Économie vs Tout-BEV	~315 Mde
Emplois non délocalisables	200 000+	Aviation décarbonée	Oui (bio-GNL)
EPR2 évités vs BEV	7 unités · 84 Mde	Actifs GRDF préservés	100-200 Mde

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 CO₂ 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)	~300-350 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
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 à -80 Mt CO₂eq/an	France contribue à la restauration du climat	Croissant avec le déploiement

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 · exemption à sécuriser art. 10a RED III	⚠ 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 CO₂ — 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 Résilience V11 (mai 2026) · Note cadrage système énergétique V11 · Tableau énergie V4 (juillet 2026) · Synthèse décideurs V3 · Souveraineté énergétique V11 (mai 2026) · RTE Bilan prévisionnel 2023 · ADEME · GRTgaz/GRDF · IEA WEO 2024 · Cour des Comptes EPR 2022 · EDF NP 2023 · BloombergNEF 2024 · BEI 2024 · resilience2045.fr

Section 6 — Tableau des mécanismes climatiques — Version corrigée

Cette page remplace le tableau de la section 6 du document PPE Résilience 2045 V1 · Août 2026

■ Pourquoi ce tableau a été corrigé

La version originale présentait une ligne unique « BILAN NET 2045 : -55 à -80 Mt » qui donnait l'impression que cette fourchette résultait directement de la somme des mécanismes 1 à 4. C'est inexact. Le bas de fourchette (~-55 Mt) correspond au scénario central. Le haut (~-80 Mt) intègre des gisements complémentaires non inclus dans le scénario central V11. La substitution fossile (~300-350 Mt évités) est la condition de la neutralité, pas du bilan négatif.

Tableau corrigé — Les quatre mécanismes de contribution climatique

Mécanisme	Volume estimé	Nature du bénéfice	Permanence
1. Substitution fossile (énergie)	~300-350 Mt CO ₂ /an évités	Réduction d'émissions — transport, chauffage, industrie. Condition nécessaire à la neutralité carbone — ne contribue pas directement au bilan négatif.	Tant que les fossiles sont substitués
2. Séquestration biochar (EBC/CRCF certifié)	~20-23 Mt CO ₂ /an	Retrait atmosphérique permanent certifiable · $H/C_{org} \leq 0,4$ · $\geq 700^{\circ}C$ · CRCF UE (2024/3012). Socle certain du bilan négatif.	Permanente — CDR reconnu UE · stabilité millénaire
3. CO ₂ biogénique — séquestration géologique	Fraction de ~35 Mt/an disponibles	Retrait additionnel · minéralisation CarbFix ou stockage géologique · volume dépend des choix d'infrastructure site par site. À valider sur démonstrateurs.	Permanente — plurimillénaire
4. CO ₂ biogénique — valorisation industrielle	Fraction de ~35 Mt/an	Substitution CO ₂ fossile (serres, chimie verte, Sabatier) · réduction d'émissions fossiles locales. Ne constitue pas un retrait atmosphérique net.	Temporaire — stockage en produit
Bilan net 2045 — scénario central V11	~-55 Mt CO ₂ eq/an	Mécanismes 2 + fraction 3. Biochar certifié (~20-23 Mt) + fraction CO ₂ biogénique séquestrée géologiquement. Sans gisements complémentaires.	Croissant avec le déploiement
Bilan net 2045 — scénario étendu (niveau 2)	jusqu'à -80 Mt CO ₂ eq/an	Scénario central + gisements complémentaires niveau 2 (miscanthus terres en déprise, zones post-incendie, reconversion viticole) → biochar additionnel. Potentiel prospectif — non inclus dans le scénario central V11.	Prospectif — horizon 2040+

Formulation de référence

Le bilan carbone net de -55 à -80 MtCO₂eq/an à ~2045 résulte de la combinaison de la substitution fossile (~300–350 Mt évités, condition de la neutralité), de la séquestration permanente par biochar certifié EBC (~20–23 Mt/an, chiffre robuste), et de la fraction du CO₂ biogénique effectivement séquestrée géologiquement (à valider sur démonstrateurs). Le haut de fourchette (~ -80 Mt) intègre en outre les gisements complémentaires de niveau 2 — non inclus dans le scénario central V11. La fourchette large est intentionnelle : elle traduit une honnêteté sur les incertitudes plutôt qu'une précision illusoire.

→ Voir Addendum Bilan Carbone Net V1 pour la décomposition complète en trois niveaux de certitude.

Note sur le bilan carbone net –55/–80 MtCO₂eq/an

Addendum · Août 2026 · À lire en complément des documents citant ce chiffre

Objet de cet addendum

Pourquoi cet addendum est nécessaire

Plusieurs documents du corpus Résilience V11 — notamment la Note argumentaire systémique V1 et la PPE Résilience 2045 V1 — citent un bilan carbone net de –55 à –80 MtCO₂eq/an à l'horizon ~2045. Ce chiffre y apparaît parfois associé au seul biochar, ce qui est inexact et insuffisant. La fourchette résulte en réalité de la combinaison de trois mécanismes distincts, à des niveaux de certitude différents. Cet addendum documente cette décomposition avec précision.

1. Les quatre mécanismes de contribution climatique

Le bilan carbone net de Résilience ne provient pas d'un seul mécanisme. Il est la résultante de quatre contributions cumulées, de natures et de permanences différentes :

Mécanisme	Volume estimé	Nature du bénéfice	Permanence
1. Substitution fossile (énergie)	~300–350 MtCO ₂ eq/an évités	Réduction d'émissions — transport, chauffage, industrie. Permet d'atteindre la neutralité, pas le bilan négatif.	Tant que les fossiles sont substitués
2. Séquestration biochar (EBC/CRCF certifié)	~20–23 MtCO ₂ eq/an	Retrait atmosphérique durable certifiable · $H/C_{org} \leq 0,4$ · $T^{\circ} \geq 700^{\circ}C$ · CRCF UE (2024/3012). C'est le socle certain du bilan négatif.	Permanente — CDR reconnu UE · stabilité millénaire
3. CO ₂ biogénique — séquestration géologique ou chimique	Fraction de ~35 Mt/an disponibles	Retrait additionnel · minéralisation CarbFix ou stockage géologique · complément du biochar sur sites favorables. Volume dépend des choix d'infrastructure site par site.	Permanente — plurimillénaire
4. CO ₂ biogénique — valorisation industrielle	Fraction de ~35 Mt/an	Substitution CO ₂ fossile (serres, chimie verte, Sabatier) · réduction d'émissions fossiles locales. Ne constitue pas un retrait atmosphérique net.	Temporaire — stockage en produit

Bilan net –55 à –80 MtCO₂eq/an à ~2045

Ce chiffre suppose que la France a atteint la neutralité carbone grâce au mécanisme 1 (substitution fossile). Les mécanismes 2, 3 et 4 produisent alors le surplus négatif. Le mécanisme 1 seul ne suffit pas à rendre la France carbone-négative — il en est la condition nécessaire, pas suffisante.

2. Les trois niveaux de certitude — d'où vient la fourchette large

La fourchette –55/–80 Mt est intentionnellement large. Elle traduit trois niveaux de certitude distincts, non une imprécision du modèle :

Niveau 1 — Robuste et documenté	La pyrogazéification de 150 sites × 1 000 t/j produit ~7,5 à 9 Mt de biochar/an. Au ratio EBC/Puro.earth de 2,5 à 3,1 t CO₂eq/t biochar (H/C_{org} ≤ 0,4, ≥ 700°C), cela représente ~20 à 23 MtCO₂eq/an de retrait atmosphérique permanent et certifiable. C'est le socle certain du bilan négatif. Il justifie à lui seul le bas de fourchette de –55 Mt combiné à la substitution fossile. Volume : ~20–23 MtCO₂eq/an · Statut : <i>Certifiable EBC/CRCF dès la Phase 0</i>
Niveau 2 — Plausible et quantifiable	Chaque site de pyrogazéification produit du CO₂ biogénique concentré. À l'échelle nationale, ~35 Mt/an sont disponibles. Une fraction est séquestrable géologiquement (type CarbFix) ou chimiquement — en complément du biochar. Le volume effectivement capturé dépend des choix d'infrastructure site par site. Non chiffré de façon définitive à ce stade — à valider sur les démonstrateurs. Volume : Fraction de ~35 Mt/an · Statut : <i>À valider sur démonstrateurs Gard / PO / Normandie</i>
Niveau 3 — Extrapolation prospective	Au-delà du gisement central (262 TWh), des surfaces importantes sont disponibles pour des cultures à haute efficacité hydrique — miscanthus sur terres en déprise, sorgho biomasse, zones post-incendie, reconversion viticole (64 000 ha arrachés documentés par les DRAAF). Ces gisements complémentaires pourraient porter le plafond à 310–380 TWh/an et augmenter proportionnellement le biochar co-produit. Chiffres prospectifs — non intégrés dans le scénario central V11. Volume : Potentiel additionnel non chiffré · Statut : <i>Horizon 2035+ — options, non prérequis</i>

3. La formulation correcte à retenir

Formulation de référence pour toute présentation institutionnelle

Le bilan carbone net de –55 à –80 MtCO₂eq/an à ~2045 résulte de la combinaison de la substitution fossile sur l'ensemble des secteurs (~300–350 Mt évités, condition nécessaire à la neutralité), de la séquestration permanente par biochar certifié EBC (~20–23 Mt/an, chiffre robuste et certifiable), et de la valorisation ou séquestration géologique du CO₂ biogénique concentré (~35 Mt/an disponibles, volume effectif à valider sur démonstrateurs). Les gisements complémentaires de niveau 2 (miscanthus, zones post-incendie, reconversion viticole) constituent un potentiel additionnel non intégré dans le scénario central.

Ce n'est pas le biochar seul qui produit –55/–80 Mt. C'est l'ensemble de la chaîne, dont le biochar est le mécanisme de retrait atmosphérique le plus certain et le plus immédiatement certifiable.

4. Positionnement vs scénarios officiels

Paramètre	Scénario Résilience ~2045	Scénario Tout-BEV PPE3	Écart
Séquestration biochar (certifiée)	~20–23 MtCO ₂ eq/an	0	~20–23 Mt
CO ₂ biogénique séquestré	Fraction de ~35 Mt disponibles	Non prévu	À quantifier
Gisements complémentaires niv. 2	Potentiel +15 à +60 Mt additionnel	Non prévu	Prospectif
Bilan carbone net France ~2045	–55 à –80 MtCO ₂ eq/an	≈ 0 (neutralité)	–55 à –80 Mt
Statut climatique	Carbone-négative — réduit le CO ₂ atmosphérique	Neutre — stabilise le CO ₂	Différence qualitative fondamentale

La distinction n'est pas sémantique

Atteindre la neutralité carbone stabilise le CO₂ atmosphérique à son niveau de 2045. Être carbone-négatif commence à le réduire. C'est la différence entre arrêter de remplir une baignoire et commencer à la vider. Aucun scénario officiel français — ni la PPE3, ni la SNBC3, ni les scénarios Négawatt ou ADEME — ne projette la France en territoire carbone-négatif à l'horizon 2045.