

CO₂ ATMOSPHÉRIQUE ET TEMPÉRATURES

Trajectoires 2026–2200 — Cinq scénarios comparés

Note de synthèse V4 — Programme Résilience | Juin 2026

► Message central

Sans extraction nette du CO₂ atmosphérique, même une forte décarbonation laisse le système climatique sur un plateau élevé pendant plusieurs siècles. Tant que les sorties de CO₂ de l'atmosphère restent inférieures aux entrées, le stock ne peut pas diminuer.

Programme Résilience augmente les sorties nettes en combinant production d'énergie, séquestration par biochar, et valorisation d'un flux de CO₂ biogénique déjà concentré. C'est cette combinaison qui constitue son originalité — et son irréductibilité.

Sur base idéale : retour vers 280 ppm préindustriel à l'horizon 2145–2170.

Sur base réaliste : stabilisation à ~430 ppm au lieu d'une montée vers 561 ppm (gain 130 ppm).

Dans les deux cas : seul levier documenté capable d'agir sur le stock atmosphérique.

1. Le CO₂ atmosphérique : l'indicateur central

Le CO₂ atmosphérique est mesuré en parties par million (ppm). Sa concentration actuelle est de 420 ppm, contre 280 ppm à l'ère préindustrielle. Cette augmentation de 50 % est la cause principale du réchauffement climatique observé depuis 1850.

La relation CO₂ /température est logarithmique : chaque doublement de la concentration CO₂ entraîne une hausse de 3°C (sensibilité climatique à l'équilibre ECS, médiane GIEC AR6 2021, fourchette 2,5–4°C). La température ne suit pas le CO₂ instantanément : l'inertie thermique des océans introduit un délai de 20 à 40 ans. Les graphiques ci-dessous utilisent un décalage de 30 ans.

Correspondances CO₂ / température (référence préindustrielle 280 ppm = 0°C)

280 ppm → 0°C	préindustriel — objectif de retour Programme Résilience (base idéale)
350 ppm → +0,65°C	objectif climatique sûr (Hansen/NASA)
420 ppm → +1,25°C	niveau actuel 2026 — canicules et sécheresses flash actuelles
450 ppm → +1,68°C	seuil correspondant à +2°C à l'équilibre thermique
560 ppm → +3,0°C	doublement du niveau préindustriel — seuil critique
720 ppm → +3,4°C	scénario statu quo en 2200 (valeur d'équilibre directe)
840 ppm → +4,0°C	seuil catastrophique — dérèglement avancé

▲ Incertitudes et limites de la modélisation

Les trajectoires présentées sont des projections paramétriques, non des modèles de circulation générale.

Elles doivent être lues comme des ordres de grandeur illustratifs, cohérents avec AR6, non comme

des prévisions ponctuelles. Les principales incertitudes sont :

- Sensibilité climatique ECS : fourchette AR6 = 2,5–4,0°C/doublement. Ce document utilise 3,0°C (médiane).
Un ECS à 4°C aggraverait toutes les trajectoires de ~33 %.
- Permafrost : estimations AR6 = 50 à 200 Gt CO₂ eq d'ici 2100 selon le scénario.
Ce document utilise la médiane (~100 Gt). L'incertitude haute doublerait l'effet.
- Potentiel de déploiement Résilience : 800 Mha est une estimation haute.
Une estimation basse (400 Mha) diviserait l'extraction nette par deux (~3 Gt/an).
- Interactions non linéaires entre feedbacks : non modélisées ici.

2. Les cinq scénarios modélisés

Scénario 1 — SSP3-7.0 : statu quo

Les émissions mondiales continuent à croître de 0,5 à 0,7 %/an sans rupture politique. Le CO₂ atteint 578 ppm (+2,6°C) en 2100 et 720 ppm (+4,0°C) en 2200. Ce scénario correspond aux politiques actuelles sans renforcement significatif.

Scénario 2 — SSP1-2.6 idéal : électrification totale mondiale

Scénario normatif du GIEC : coopération mondiale totale, décarbonation ambitieuse à partir de 2030, zéro émissions fossiles vers 2070, permafrost modéré, puits naturels stables. Le CO₂ plafonne à ~455 ppm vers 2040–2050 puis décline lentement : 422 ppm (+2,0°C) en 2100, 378 ppm en 2200.

⚠ Limite fondamentale du SSP1-2.6 idéal

Même dans ce scénario optimal, le CO₂ reste supérieur au niveau actuel pendant 50 à 80 ans.

Le seuil de 350 ppm (objectif climatique sûr) n'est franchi qu'après 2150.

Ce scénario suppose une coopération mondiale parfaite — hypothèse géopolitiquement irréaliste.

C'est la démonstration physique centrale : « Pourquoi l'arrêt des fossiles ne suffit pas ».

Scénario 3 — SSP1-2.6 réaliste : trois corrections physiques

Le scénario idéal repose sur des hypothèses optimistes que la réalité physique invalide partiellement :

- Fossiles résiduels incompressibles (6 Gt CO₂ /an après 2070) : certains usages resteront fossiles — bitume, procédés chimiques, pays non-coopérants, aviation longue distance.
- Dégradation des puits naturels (–30 % après 2080) : les forêts tropicales se saturent, l'Amazonie est localement devenue source nette de CO₂. Les océans absorbent moins efficacement en se réchauffant et s'acidifiant.
- Relargage permafrost (1 à 3,5 Gt/an d'ici 2100) : le permafrost sibérien et canadien contient ~1 500 Gt de carbone. À +2°C, le dégel libère CO₂ et méthane (GWP×80 sur 20 ans). Ce feedback n'est pas contrôlable par les politiques humaines.

Résultat : le CO₂ atteint 471 ppm (+2,1°C) en 2100 et continue de monter vers 561 ppm en 2200. L'électrification ambitieuse ralentit la hausse mais ne l'arrête pas.

Scénarios 4a et 4b — Programme Résilience mondial

Programme Résilience ajoute une extraction nette de CO₂ de 5,94 Gt/an à plein déploiement (2060), via pyrogazéification de biomasse + biochar. Déploiement progressif 2030–2060 sur 800 Mha de terres marginales et forêts gérées mondiales.

- 4a — base idéale (fossiles résiduels <2 Gt/an, permafrost modéré) : le CO₂ franchit 350 ppm avant 2100 (387 ppm / +1,8°C) et converge vers 280 ppm à l'horizon 2145–2170.

- 4b — base réaliste (fossiles résiduels 6 Gt/an + permafrost + puits dégradés) : le CO₂ est stabilisé à ~429 ppm (+1,9°C) en 2100 et ~442 ppm en 2200. Gain de 130 ppm vs scénario réaliste sans Résilience.

Scénario 5 — SSP5-8.5 : dérèglement complet

Cumul des feedbacks sans décarbonation : émissions fossiles en hausse (+0,7 %/an), permafrost ×2, puits naturels -45 %, feux de forêts amplifiés. Le CO₂ atteint 788 ppm (+3,2°C) en 2100. Territoire de feedbacks non linéaires potentiellement irréversibles.

3. Figure 1 — Scénario idéal

Ce graphique montre le potentiel complet de Programme Résilience dans des conditions idéales : fossiles résiduels <2 Gt/an, permafrost modéré, déploiement mondial effectif. Il illustre la limite structurelle de l'électrification seule même dans ses meilleures hypothèses.

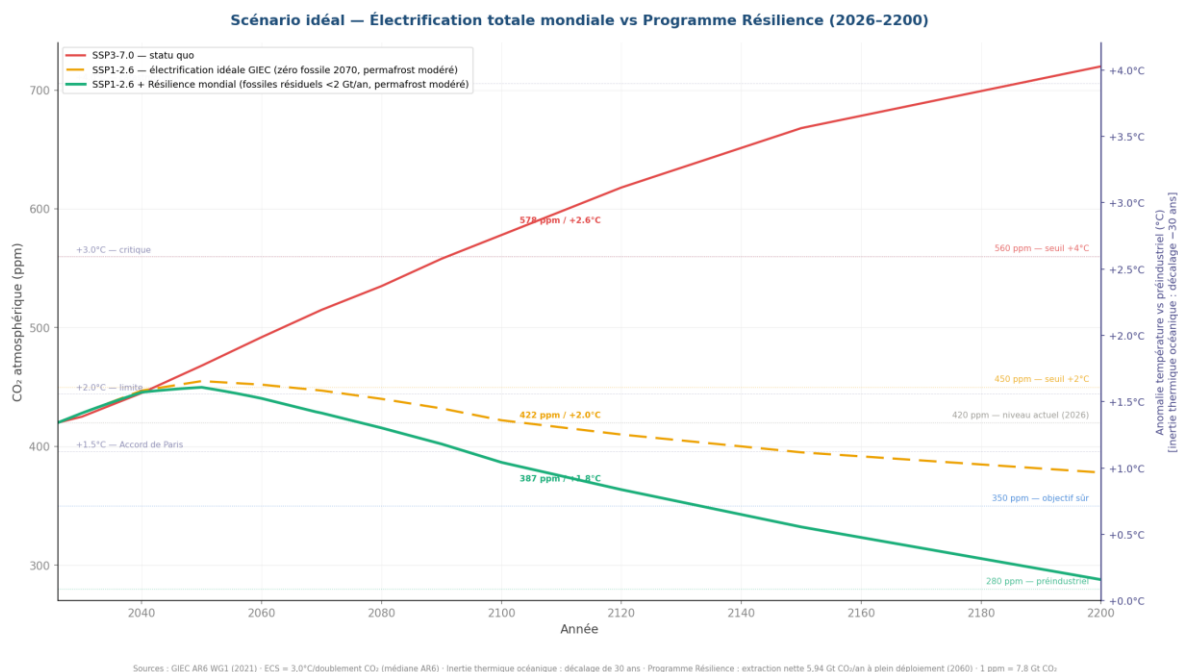


Figure 1 — SSP3-7.0 (statu quo), SSP1-2.6 électrification idéale GIEC, et Programme Résilience sur base idéale (fossiles <2 Gt/an, permafrost modéré). Axe droit : anomalie de température avec inertie thermique -30 ans. Sources : GIEC AR6 WG1 (2021). ECS = 3,0°C/doublement CO₂ (médiane — fourchette 2,5–4,0°C).

✓ Lecture — Figure 1 (scénario idéal)

- Statu quo (rouge) : 578 ppm (+2,6°C) en 2100, 720 ppm (+4,0°C) en 2200.
- Électrification idéale (orange) : plafond ~455 ppm vers 2045, déclin très lent. 422 ppm (+2,0°C) en 2100. Reste au-dessus de 420 ppm actuels pendant 50–80 ans. N'atteint 350 ppm qu'après 2150 — même dans le meilleur scénario GIEC.
- Résilience idéal (vert) : 387 ppm (+1,8°C) en 2100. Franchit 350 ppm avant 2100. Retour vers 280 ppm préindustriel vers 2145–2170.

Message physique fondamental : sans extraction nette, le stock de CO₂ ne peut pas diminuer.

L'électrification réduit les entrées ; Résilience augmente les sorties.

Les deux sont nécessaires — Résilience seul est insuffisant, l'électrification seule est insuffisante.

4. Figure 2 — Scénario réaliste

Ce graphique présente les trajectoires les plus pertinentes sur base réaliste. Il montre le rôle de stabilisation de Programme Résilience dans un monde imparfait, sans supposer de coopération mondiale totale.

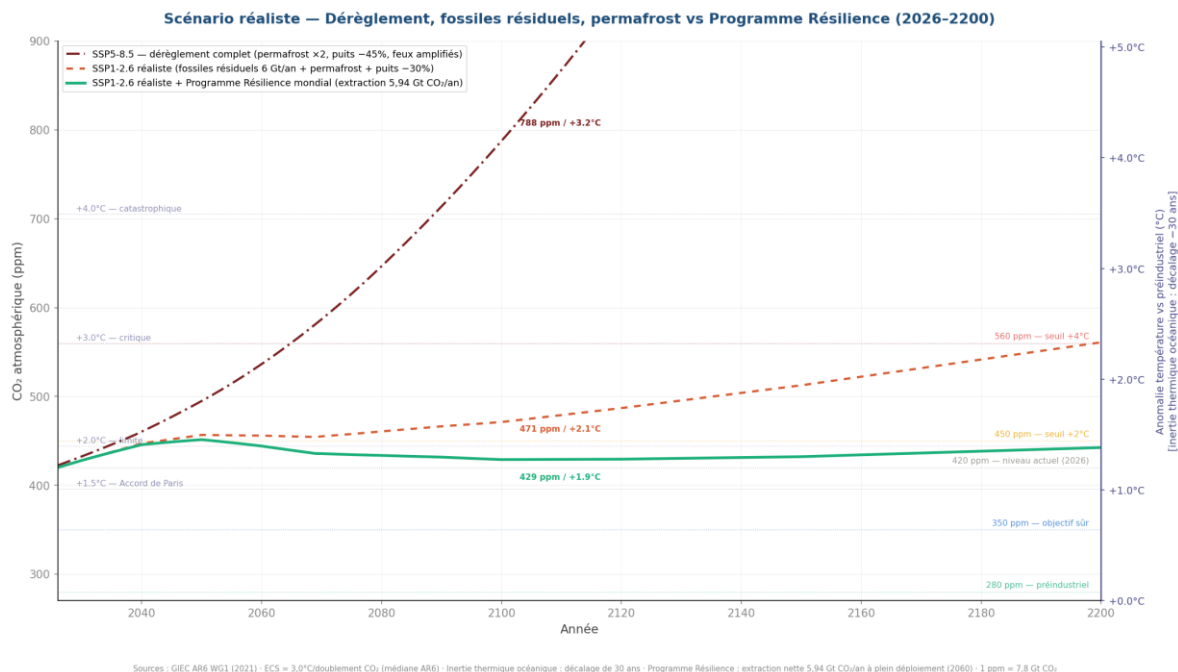


Figure 2 — SSP5-8.5 dérèglement complet, SSP1-2.6 réaliste (fossiles résiduels 6 Gt/an + permafrost + puits -30%), et Programme Résilience sur base réaliste. Sources : GIEC AR6 WG1 (2021).

✓ Lecture — Figure 2 (scénario réaliste)

- Dérèglement complet (bordeaux) : 788 ppm (+3,2°C) en 2100. Feedbacks cumulés irréversibles.
- SSP1-2.6 réaliste (orange tiret) : 471 ppm (+2,1°C) en 2100, montée vers 561 ppm en 2200.
L'électrification ambitieuse seule ne stabilise pas le CO₂ sur base réaliste.
- Résilience réaliste (vert) : 429 ppm (+1,9°C) en 2100, stable à ~442 ppm en 2200.
Gain de 130 ppm vs scénario réaliste sans Résilience.

Message physique fondamental : Résilience ne ramène pas seul le CO₂ à 280 ppm si les fossiles résiduels + permafrost totalisent plus de 6 Gt/an. Mais il est le seul levier qui stabilise le CO₂ et empêche la montée continue. Chaque Gt de fossiles résiduels éliminée renforce proportionnellement l'efficacité de Résilience.

5. L'originalité technique de Programme Résilience

5.1 Le principe physique fondamental

Les scénarios GIEC modélisent exclusivement la réduction des émissions fossiles — c'est-à-dire la diminution des entrées de CO₂ dans l'atmosphère. Aucun ne modélise une augmentation systématique des sorties nettes via extraction active.

La physique est simple : le stock atmosphérique de CO₂ ne peut diminuer que si les sorties dépassent les entrées. Programme Résilience agit sur les sorties en combinant trois mécanismes complémentaires : production de biochar (séquestration solide permanente), valorisation du CO₂ biogénique concentré, et substitution des fossiles par du biométhane (réduction des entrées fossiles).

5.2 L'avantage décisif : le CO₂ biogénique concentré

L'argument le plus original de Programme Résilience est souvent sous-estimé. Comparons les trois familles de captage de CO₂ :

- DAC (Direct Air Capture) : l'air contient ~0,043 % de CO₂. L'essentiel de l'énergie est consacré à trouver quelques molécules dans une immense masse d'air. Coût actuel : 300–1 000 €/t CO₂.
- Captage sur fumées industrielles (CCS classique) : concentration de 5 à 15 % de CO₂ dans les fumées — meilleure que l'air, mais nécessite une étape de séparation énergivore. Coût : 60–120 €/t CO₂.
- Programme Résilience : la séparation est déjà réalisée par le procédé de pyrogazéification lui-même. Un flux de CO₂ biogénique concentré est disponible directement, sans captage additionnel. Coût de captage : ~0 €/t CO₂ supplémentaire — c'est un co-produit du processus énergétique.

Résilience est donc compatible avec la quasi-totalité des voies actuelles de stockage ou de valorisation du CO₂, grâce à ce flux déjà concentré et d'origine biogénique. Chaque site peut exploiter une ou plusieurs voies adaptées à son contexte géologique et économique local :

- Carbonatation minérale : injection dans des formations basaltiques ou calcaires — minéralisation rapide et permanente, sans risque de fuite. Procédé opérationnel (CarbFix, Islande).
- Stockage géologique : injection directe dans aquifères salins ou champs épuisés — bilan carbone négatif garanti car CO₂ d'origine biologique. Pas d'étape de captage additionnelle.
- Méthanation Sabatier : CO₂ biogénique concentré + H₂ (électrolyse ENR ou géologique) → biométhane de synthèse. Stockage saisonnier dans le réseau gazier existant.
- Valorisation en serres maraîchères : injection directe → +20 à +30 % de rendements agricoles. Rentabilité économique immédiate sans séquestration géologique.
- Chimie biosourcée : méthanol, e-fuels, polymères — bilan carbone neutre ou négatif car CO₂ extrait de l'atmosphère par voie biologique.

5.3 La séquestration par biochar

Le biochar co-produit de la pyrogazéification constitue la voie de séquestration solide permanente : durée 500 à 5 000 ans, certifiable selon les standards EBC, reconnue par le règlement CRCF UE

(acte délégué adopté le 3 février 2026). Co-bénéfices agronomiques documentés : rétention d'eau +10 à +30 %, réduction des besoins en engrais, amélioration de la structure des sols.

5.4 Complémentarité avec l'électrification

Programme Résilience couvre les usages que l'électrification ne peut pas assurer : mobilité lourde longue distance, aviation, stockage saisonnier de l'énergie, usage agricole et engins de chantier. L'électrolyse ENR alimente la méthanation Sabatier ; le biométhane assure la flexibilité du réseau électrique. Les deux filières se renforcent mutuellement.

6. Le verrou réglementaire à lever en priorité

Levier d'action direct pour les décideurs politiques

L'Europe reconnaît le biochar comme solution de séquestration certifiable depuis le 3 février 2026

(règlement CRCF UE, acte délégué biochar). La France, par l'article R.446-105, exclut encore

la pyrogazéification de l'éligibilité aux certificats de production de biogaz (CPB).

Ce verrou réglementaire bloque l'équation économique de la filière : sans CPB, le modèle économique des sites de pyrogazéification n'est pas bouclé, et les industriels ne peuvent pas s'engager à l'échelle requise.

Le sénateur S.Piednoir a déposé une question sénatoriale sur ce point en avril 2026.

Une modification de l'article R.446-105 permettrait à la France de devenir le premier pays européen à déployer industriellement cette filière, avec une avance de 5 à 10 ans sur les autres États membres.

Trois arguments pour les décideurs :

- Souveraineté énergétique : réduction de la dépendance aux importations gazières.
- Leadership climatique : la France dispose des acteurs industriels (Novéa, Charwood, TotalEnergies, GRDF) et de la biomasse nécessaire pour déployer à l'échelle.
- Cohérence réglementaire : aligner le droit français sur le droit européen déjà acquis.

► Synthèse pour décideurs

Deux conclusions physiques s'imposent, indépendantes des modèles :

— Principe 1 : tant que les sorties de CO₂ atmosphérique restent inférieures aux entrées,

le stock ne peut pas diminuer. Toute politique réduisant uniquement les entrées (décarbonation) est nécessaire mais insuffisante à elle seule.

— Principe 2 : Programme Résilience augmente les sorties nettes via biochar + CO₂ biogénique

concentré valorisable sur plusieurs voies. C'est la seule filière industriellement mature qui combine production d'énergie décarbonée et extraction nette du stock atmosphérique.

Sur base idéale : retour vers 280 ppm préindustriel à l'horizon 2145–2170.

Sur base réaliste : stabilisation à ~430 ppm au lieu d'une montée vers 561 ppm (gain 130 ppm).

L'urgence est de lever le verrou réglementaire R.446-105 et d'engager les industriels capables de porter cette filière à l'échelle nationale, puis mondiale.

Site complet : <https://helion31412.github.io/resilience2045>

Sources : GIEC AR6 WG1 (2021), LSCE (Philippe Ciais), Forest Europe, Directive RED III, Règlement CRCF UE, CarbFix (Islande), Note OPECST n°48 (Piednoir, oct. 2025).