DU BILAN HISTORIQUE DU CARBONE À LA NÉCESSITÉ D'UN RETRAIT DURABLE

Ce que montrent les bilans, ce qu'impliquent les incertitudes, et pourquoi agir dès maintenant

Programme Résilience — synthèse, octobre 2026 — s'appuie sur les notes « Bilan du carbone depuis 1850 », « CO_2 atmosphérique et températures » V5.1 et « Boucles d'amplification climatique » V1 (resilience2045.fr)

Idée directrice

Les puits naturels ont absorbé environ la moitié de nos émissions. Le GIEC conclut qu'ils en absorberont une part décroissante à mesure que le climat se réchauffe, et le changement climatique réduit déjà leur efficacité. Compter sur eux pour faire redescendre le CO_2 est un pari ; construire dès maintenant des capacités de retrait durable, en parallèle de la réduction des émissions, est une assurance.

1. Depuis 1850, ~750 milliards de tonnes de carbone (GtC) ont été déplacées du sous-sol et des forêts vers l'atmosphère et l'océan ; le CO_2 est passé de 285 à plus de 420 ppm.
2. Les terres ont perdu du carbone en bilan net ; l'océan absorbe toujours, mais le réchauffement affaiblit les mécanismes qui transfèrent le carbone vers ses profondeurs.
3. Réduire les émissions ralentit l'accumulation ; la neutralité stabilise à peu près le climat dans les modèles du GIEC, mais les rétroactions non encore intégrées peuvent annuler la baisse ultérieure du CO_2 ; le faire baisser suffisamment vite demande des absorptions nettes supérieures aux émissions.
4. Les incertitudes portent sur l'ampleur et le calendrier des rétroactions ; elles ne justifient pas de compter sur le maintien des puits.
5. Résilience 2045 propose une architecture qui produit de l'énergie là où l'électricité ne suffit pas, tout en retirant durablement du carbone à partir de résidus.

Les faits établis

Émis depuis 1850 : ~503 GtC fossiles et ciment + ~248 GtC par le changement d'usage des terres = ~751 GtC (~2 750 Gt CO_2). En 2025 : ~38 Gt CO_2 fossile (Global Carbon Budget 2025).

Où il se trouve : atmosphère +292 GtC (~39 %), océan +200 GtC (~27 %), puits terrestre brut +173 GtC (~23 %), le reste dans le béton ou non attribué (incertitudes).

Les terres ont perdu du carbone : +173 GtC absorbés, −248 GtC perdus, soit ~−75 GtC net depuis 1850, avec une incertitude importante.

Le climat réduit déjà l'efficacité des puits : « Le changement climatique réduit l'efficacité des puits naturels de CO_2 , en particulier sur les terres », ce qui a ajouté ~8 ppm de CO_2 dans l'atmosphère depuis 1960 (Global Carbon Budget 2025). En France, le puits forestier est passé de ~63 à ~39 Mt CO_2 /an en une décennie, avec une mortalité doublée (IGN 2024).

Le diagnostic du GIEC (AR6, 2021) : si les émissions augmentent, les puits océanique et terrestre seront moins efficaces pour freiner l'accumulation du CO_2 (confiance élevée) ; des réponses non encore pleinement intégrées aux modèles — dégel du permafrost, zones humides, incendies — accroîtraient encore les concentrations (confiance élevée).

Le retrait durable est quasi inexistant : ~2,2 Gt CO_2 /an retirés dans le monde, à 99,9 % par des forêts et des sols réversibles ; le retrait durable n'atteint que ~2 Mt CO_2 /an ; les plans nationaux sont en retard de plus de 5 Gt CO_2 /an sur le besoin de 2050 (State of CDR, 2026).

1. Le bilan depuis 1850 : les puits naturels ont freiné, pas empêché

Réservoir	Vers 1850 (GtC)	Variation 1850–2024	Aujourd'hui (GtC)
Atmosphère	~605 (285 ppm)	+292	~897 (423 ppm)
Océan	~38 600	+200	~38 800
Végétation + sols (hors permafrost)	~1 950 à 3 050	−75 (+173 absorbés, −248 perdus)	~1 875 à 2 975
Béton, plastiques, bitume	0	+16 à 21	~16 à 21
Gisements fossiles	plusieurs milliers	−503 brûlés	–

Stocks de 1850 : GIEC AR5/AR6. Variations : Global Carbon Budget 2025. Détails : note « Bilan du carbone depuis 1850 ».

Le carbone fossile a été pris dans un réservoir stable, le sous-sol, et placé dans des réservoirs qui échangent avec l'atmosphère : l'air, la surface de l'océan, la végétation. Sa répartition dépend de la vitesse des échanges, non de la taille des réservoirs : l'océan contient ~90 % du carbone mobile mais n'a reçu que ~27 % des émissions, parce que seule sa couche de surface s'équilibre vite avec l'air ; ses eaux profondes ne se renouvellent qu'en plusieurs siècles.

Premier enseignement : les puits naturels ont limité l'accumulation du CO_2 sans empêcher sa forte augmentation. Les terres ont été des puits à certaines périodes et en certains lieux, mais, sur l'ensemble de la période, leurs pertes ont dépassé leurs absorptions : le surplus fossile est, en net, resté dans l'air et l'océan.

2. Des puits dont l'efficacité dépend du climat

Les terres

Le bilan des terres dépend du déboisement, de l'eau, des températures, des incendies et de l'état des écosystèmes. Les évolutions annuelles sont variables — le puits terrestre a fléchi en 2023–2024 avant de se redresser en 2025 —, mais le changement climatique en réduit déjà l'efficacité par rapport à ce qu'elle serait sans réchauffement. En France, la baisse du puits forestier, le doublement de la mortalité des arbres et les incendies de l'été 2026 (plus de 110 000 ha, record EFFIS) illustrent cette vulnérabilité. Les terres ne constituent pas un stock de compensation garanti.

L'océan

Le carbone ne descend pas vers les profondeurs par diffusion, très lente : il est emporté par les eaux de surface qui plongent (Atlantique Nord, pourtour antarctique) et par la pompe biologique. La quantité exportée dépend du débit de ces eaux et de leur teneur en carbone ; le réchauffement agit sur les deux :

- **La teneur :** une eau plus chaude dissout moins de CO_2 .
- **Le débit :** une eau plus chaude est plus légère et se mélange moins avec les eaux profondes (stratification) ; le GIEC juge très probable un affaiblissement de la circulation méridienne de l'Atlantique (AMOC) au cours du XXIe siècle.

Tant que le CO_2 de l'air monte, l'océan continue d'absorber, mais il absorbe moins qu'il ne l'aurait fait dans un climat moins chaud. La taille considérable de son réservoir ne garantit donc pas une absorption rapide : celle-ci dépend de la dynamique des échanges. À cela s'ajoutent, sur les terres, le dégel du permafrost et la dégradation de tourbières drainées ou brûlées, que le GIEC n'intègre pas encore pleinement dans ses projections.

3. Le problème est aussi le stock, pas seulement le flux

Il faut distinguer trois situations :

- **Réduire les émissions** ralentit l'accumulation du CO_2 ; tant qu'elles restent supérieures aux absorptions, la concentration continue de monter.
- **Atteindre zéro émission nette de CO_2** stabilise à peu près la température dans les modèles du GIEC, la concentration baissant ensuite lentement. Mais ces modèles n'intègrent pas encore pleinement le permafrost, les tourbières et les incendies, qui, selon le GIEC, accroîtraient les concentrations. Car même à zéro émission, le système n'est pas au repos : à température élevée, glaciers et calottes continuent de fondre et de réfléchir moins le rayonnement, la végétation et les échanges avec l'océan restent affaiblis, permafrost et tourbières continuent de relâcher du carbone — la chaîne décrite dans la note Boucles. Dans ses scénarios, ces rétroactions ralentissent fortement la baisse du CO_2, l'annulent dans les hypothèses hautes, voire la transforment en remontée.
- **Faire baisser la concentration suffisamment vite** demande des absorptions nettes supérieures aux émissions ; le retrait durable du CO_2 joue alors un rôle essentiel, d'autant plus grand que les puits naturels s'affaiblissent.

Les scénarios des notes Résilience illustrent ces trois situations :

Scénario (note V5.1)	CO_2 en 2200	Effet des boucles (note Boucles)
Électrification maximale (résidu ~2,3 Gt CO_2 /an)	~420 ppm (plateau)	~+18 ppm : le plateau devient une remontée
Zéro fossile dès 2045	~389 ppm (baisse lente)	~+13 ppm
Zéro fossile + retrait durable ~6 Gt CO_2 /an	~332 ppm (sous 350 ppm vers 2164)	~+7 ppm (sous 350 ppm vers 2180)

Hypothèses centrales du modèle simplifié Résilience : réponse impulsionnelle du cycle du carbone (Joos et al. 2013) calée sur les concentrations observées, sensibilité climatique 3 °C, permafrost modulé par la température ; boucles d'affaiblissement des puits paramétrées d'après la littérature. Ces résultats illustrent la sensibilité des trajectoires aux rétroactions ; ils ne constituent pas des prévisions validées indépendamment.

Deuxième enseignement : la neutralité stabilise au mieux ; elle ne fait pas redescendre rapidement le CO_2, et les rétroactions peuvent lui faire reprendre sa hausse. Dans ces scénarios, seule la trajectoire avec retrait durable ramène le CO_2 sous 350 ppm, et les boucles en retardent l'échéance.

4. Ce qu'impliquent les incertitudes

Les incertitudes portent sur l'ampleur, le calendrier et les interactions des rétroactions ; les réponses varient selon les régions, les périodes et les mécanismes. Mais le diagnostic d'ensemble du GIEC est clair : des puits moins efficaces avec le réchauffement, et des émissions naturelles supplémentaires encore imparfaitement prises en compte. Cette incertitude ne justifie pas de compter sur le maintien des puits ; elle justifie de développer des moyens complémentaires de retrait durable.

Permafrost et tourbières : des réservoirs considérables dont la réponse reste difficile à maîtriser

Le permafrost et les tourbières renferment d'importantes quantités de carbone accumulées sur de longues périodes : ~1 400 à 1 700 GtC pour les sols gelés de l'hémisphère Nord (près de deux fois le carbone de l'atmosphère actuelle) et ~500 à 600 GtC pour les tourbières du monde (GIEC AR6 ; Schuur et al. 2015 ; Yu et al. 2010).

Avec le réchauffement, une partie de ce carbone peut être libérée sous forme de CO_2 et de méthane, dont le pouvoir de réchauffement est environ 80 fois celui du CO_2 sur vingt ans (GIEC AR6). Pour le seul permafrost, le GIEC estime l'ordre de grandeur à ~18 GtC par degré de réchauffement d'ici 2100, dans une fourchette très large (3 à 41 GtC).

La quantité libérée, son rythme et la répartition entre les deux gaz dépendront de mécanismes complexes — dégel progressif ou brutal, humidité, décomposition biologique, incendies, évolution des écosystèmes — encore imparfaitement représentés dans les modèles ; la plupart des modèles du système Terre n'incluent pas le carbone du permafrost. Nous ne maîtrisons ni ces processus ni leur évolution future.

Il serait donc imprudent de considérer ces réservoirs comme une incertitude marginale : ils constituent un risque supplémentaire pour la trajectoire climatique, dont il faut tenir compte sans prétendre en connaître précisément l'ampleur.

- **Les risques ne sont pas symétriques :** construire tôt des capacités de retrait a un coût, mais un coût maîtrisable ; construire trop tard laisse s'aggraver des dommages dont certains (glaciers, banquise, écosystèmes) ne se réparent pas à l'échelle humaine.
- **Construire prend des décennies :** passer de quelques millions à plusieurs milliards de tonnes par an demande des filières industrielles, des sites et des autorisations (6 à 10 ans par site dans le cadre réglementaire français actuel).
- **La ressource biologique est exposée :** le retrait biologique dépend de la biomasse, dont la disponibilité future est à évaluer territoire par territoire ; la hausse de la mortalité forestière et des incendies montre que ce risque est réel. Attendre, c'est risquer de construire le retrait quand sa ressource s'est réduite.
- **Retirer demande plus que l'écart à combler :** quand on retire du CO_2 de l'air, l'océan et les terres en restituent une partie. Ramener le CO_2 de ~425 à 350 ppm correspond à ~160 GtC (~590 Gt CO_2) dans l'atmosphère ; la quantité à retirer est supérieure.

Troisième enseignement : attendre de connaître précisément l'ampleur des rétroactions avant de développer le retrait serait une erreur stratégique ; il doit être construit pendant la décarbonation.

5. Où stocker durablement le carbone

Les principales options de stockage durable sont le stockage géologique et la minéralisation ; le biochar peut offrir un stockage de longue durée sous conditions de production. Les forêts et les sols contribuent aussi, mais de façon réversible.

Option	Durée	Condition ou limite principale
Stockage géologique (aquifères salins, anciens gisements)	> 10 000 ans	Coût du captage et de la concentration du CO_2
Minéralisation (basaltes, carbonates)	Permanent	Sites adaptés
Biochar dans les sols	Siècles à millénaires	Pyrolyse à ≥ 700 °C, rapport H/C ≤ 0,4 ; biomasse disponible
Forêts, sols, bois de construction	Décennies, réversible	Incendies, sécheresses, parasites, changements d'usage

Le stockage géologique existe et des sites sont préparés ; ce qui le freine est surtout le coût de la concentration du CO_2 à stocker. Le défi est de passer de démonstrateurs à des capacités industrielles, avec un bilan énergétique et carbone vérifié.

6. Pourquoi cette analyse conduit à Résilience 2045

Résilience 2045 est né de la volonté de ne pas traiter séparément l'électricité, les molécules énergétiques, les infrastructures, les territoires et le carbone. Il est complémentaire de l'électrification, pas concurrent. Il répond aux contraintes identifiées ci-dessus :

- **Retirer à partir de résidus, pas de cultures :** résidus agricoles et forestiers, biomasse à risque d'incendie, fraction solide des digestats de méthanisation. La pyrogazéification en tire du bio-CH_4 et du biochar ; la chaîne produit en outre du CO_2 biogénique déjà concentré.
- **Rendre le stockage géologique plus abordable :** ce CO_2 biogénique concentré réduit le principal coût du stockage géologique. Résilience n'est pas un concurrent des autres voies de retrait : il peut les alimenter.
- **Adosser le retrait à une production utile :** le bio-CH_4 couvre des usages que l'électricité atteint mal (mobilité lourde, aviation, stockage saisonnier) en s'appuyant sur les réseaux et stockages de gaz existants.
- **Aller vite avec l'existant :** Résilience n'invente rien ; il assemble des techniques connues et des infrastructures en place, ce qui raccourcit le délai de construction.
- **Agir tant que la ressource est disponible :** les forêts doivent de toute façon être entretenues contre les incendies ; c'est maintenant que la filière peut se construire.

Objectifs de conception : ~−60 à −80 Mt CO_2 /an pour la France vers 2045 ; à l'échelle mondiale, un retrait de l'ordre de ~6 Gt CO_2 /an, celui de la trajectoire de la note V5.1 qui ramène le CO_2 sous 350 ppm. Ce sont des ambitions du programme, à démontrer : besoins en biomasse, bilans énergétiques, coûts et conditions de stockage sont détaillés dans les documents de Résilience et devront être vérifiés sur démonstrateurs.

Chaque filière doit être évaluée sur sa ressource, son bilan énergétique et carbone, son coût, ses impacts territoriaux et la permanence du stockage obtenu. Sa pertinence se mesure non seulement en TWh produits, mais aussi en carbone effectivement retiré et durablement stocké.

Conclusion

Réduire les émissions et construire le retrait, dès maintenant

Les bilans sont établis : ~750 GtC déplacés depuis 1850, des terres en perte nette, des puits dont le changement climatique réduit déjà l'efficacité, un retrait durable quasi inexistant.

Nous ne savons pas avec certitude si les puits naturels conserveront une capacité suffisante pour permettre une amélioration climatique assez rapide ; plusieurs mécanismes majeurs, reconnus par le GIEC, font craindre leur affaiblissement.

Il est donc prudent de réduire les émissions tout en construisant dès maintenant des capacités complémentaires de retrait durable du CO_2 . L'objectif n'est pas de garantir un résultat que personne ne peut garantir, mais d'en augmenter les chances et de réduire notre dépendance à une trajectoire naturelle incertaine.

C'est la raison d'être de Résilience 2045 : une architecture énergétique, industrielle et territoriale qui ne se contente pas de réduire les émissions futures, mais qui contribue, de façon mesurable et durable, à retirer le carbone déjà accumulé.

Sources : Friedlingstein P. et al. (2025), Global Carbon Budget 2025, Earth Syst. Sci. Data ; GIEC (2021), AR6 GT1, Résumé pour décideurs (B.4) et chapitre 5 ; GIEC (2013), AR5 GT1, chapitre 6

; IGN (2024), Inventaire forestier national ; EFFIS (2026) ; The State of Carbon Dioxide Removal (2026) ; Joos F. et al. (2013), Atmos. Chem. Phys. 13, 2793–2825 ; Schuur E.A.G. et al. (2015), Nature 520, 171–179 ; Yu Z. et al. (2010), Geophys. Res. Lett. 37, L13402 ; notes Résilience « Bilan du carbone depuis 1850 », « CO_2 atmosphérique et températures » V5.1, « Boucles d'amplification climatique » V1 (resilience2045.fr).