

PROGRAMME RÉSILIENCE 2045

Les puits naturels de carbone : effondrement simultané d'un système de régulation planétaire

Note de synthèse scientifique V3 — Août 2026

resilience2045.fr

Contexte de cette note

Les scénarios officiels de neutralité carbone 2050 reposent sur une hypothèse implicite : les grands puits naturels de carbone (forêts, océans, sols) continuent d'absorber 25 à 30% des émissions anthropiques.

Cette note documente pourquoi cette hypothèse est en train de devenir fausse — puits par puits — et pourquoi le biochar co-produit de la chaîne Résilience 2045 est la seule séquestration qui ne peut pas s'inverser, quelle que soit la trajectoire climatique.

Sources principales : T. Rabotin, D. Fages-Gouyou, G. Billen, J. Le Noë (Rev. For. Fr., 76-4, 2025) ; IGN — Inventaire Forestier National 2025 ; AR6 GIEC (2021) ; CMIP6 (2023-2025) ; Météo-France (2026) ; SciencePost / Dr T. Harris — The Great Decoupling (mars 2026).

1. Le cadre — ce que les scénarios officiels supposent

Les trajectoires SNBC3, PPE3 et Accord de Paris supposent que les puits naturels restent stables. Ce qu'on observe depuis 2015 est l'inverse : une dégradation simultanée de tous les grands réservoirs de carbone terrestres et marins, sous l'effet combiné du réchauffement, des sécheresses, des incendies et de l'acidification.

1.1 Une confusion fondamentale : flux vs stock

Les scénarios officiels comptabilisent comme un **flux net positif** — la croissance annuelle de biomasse qui immobilise du carbone. Mais une forêt n'absorbe du CO₂ que lorsqu'elle est en **croissance active**. Une forêt mature, stable ou en déclin peut avoir une biomasse constante ou décroissante tout en respirant — elle n'absorbe plus rien en net, ou relâche. C'est la physique élémentaire de la photosynthèse nette.

La conséquence est directe : si la quantité de biomasse totale sur Terre est stable ou en réduction — ce qui est maintenant mesurable par satellite — alors l'hypothèse d'absorption de 25 à 30% des émissions anthropiques par les forêts ne peut pas être vraie simultanément. **Un puits forestier n'est pas une propriété permanente de la forêt. C'est une propriété transitoire de sa croissance.** Une forêt qui ne croît plus n'absorbe plus. Ce que les comptabilités carbone officielles ne reflètent pas encore correctement.

L'absorption résiduelle mesurée tient pour une part à la repousse sur terres anciennement déboisées — jeunes forêts en croissance rapide, notamment en Europe du Nord et en Russie. Mais ce stock de terres reboisables s'épuise, les jeunes forêts mûrissent et ralentissent leur croissance, et l'effet de fertilisation par le CO₂ atmosphérique lui-même — qui stimule temporairement la photosynthèse — est annulé par les sécheresses répétées dans de nombreuses régions.

1.2 La désertification — la perte définitive du puits

La désertification est le prolongement le plus irréversible de ce raisonnement. Selon la CNULCD (Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification), environ **24 millions d'hectares de terres productives sont perdus chaque année** par dégradation et désertification. La région méditerranéenne, le Sahel, l'Asie centrale, le nord-est du Brésil et le sud-ouest américain sont en expansion désertique mesurable. En France même, la dégradation des sols agricoles du pourtour méditerranéen est documentée.

La distinction avec l'incendie forestier est fondamentale : **une forêt brûlée peut repousser en quelques décennies**. Une zone désertifiée perd ses sols, sa matière organique, sa capacité de rétention en eau — **c'est une dégradation structurelle qui peut prendre des siècles à s'inverser, si elle s'inverse**. Chaque hectare qui bascule vers le désert perd non seulement sa végétation mais aussi son sol organique — carbone accumulé sur des siècles qui se minéralise et s'émet. C'est une sortie définitive du puits, pas une pause.

La triple perte des puits terrestres

- ① Forêts : flux net positif qui s'annule quand la biomasse stagne ou brûle
- ② Désertification : sortie définitive du puits — sol organique perdu sur des siècles
- ③ Tourbières drainées : source permanente de CO₂ et N₂O après drainage

Ces trois processus s'additionnent silencieusement dans les comptabilités carbone officielles qui continuent de supposer un puits stable à 25–30% des émissions anthropiques.

La durée de résidence du CO₂ dans l'atmosphère est de **300 à 1 000 ans** selon les mécanismes d'absorption. Cela signifie que le CO₂ déjà émis depuis 180 ans d'industrialisation continue de réchauffer, même si toutes les émissions humaines s'arrêtaient demain. Une trajectoire "neutralité carbone en 2050" ne réduit pas le stock atmosphérique — elle stabilise seulement le flux d'entrée. C'est la différence entre arrêter de remplir une baignoire et commencer à la vider.

2. Les forêts — du puits net au puits zéro

2.1 Le cas des Landes — T. Rabotin, G. Billen, J. Le Noë (2025)

L'étude publiée dans la Revue Forestière Française (vol. 76, n°4, 2025) par T. Rabotin (Mines Paris-PSL), D. Fages-Gouyou, G. Billen (Sorbonne Université) et J. Le Noë (IRD) documente avec précision la trajectoire carbone du massif landais sur 172 ans (1850-2022). C'est l'étude de référence la plus récente et la plus complète disponible sur un grand massif forestier français.

Résultats quantifiés : au cours de la période d'établissement du massif, la forêt stockait **0,63 Mton C par an**. La seconde période d'exploitation intensive ne montrait plus que **0,14 Mton C/an**. Dans la période la plus récente, **la séquestration s'annule**. Et ce n'est pas seulement la faute des incendies — une réduction des taux de croissance forestiers liée à la vulnérabilité aux sécheresses et aux ravageurs est nécessaire pour reproduire les données observées.

2.2 Ce que l'étude ne dit pas — le bois combustible comme accélérateur

L'étude de T. Rabotin et al. comptabilise le bois d'œuvre et de papeterie comme stock de carbone — méthodologiquement correct à court terme. Mais ce stock est temporaire : le papier se dégrade en quelques années, le bois de construction en quelques décennies. Et surtout, le bois énergie retourne à l'atmosphère immédiatement à la combustion.

Un arbre qui a séquestré du carbone pendant 60 ans **le relâche en une heure de combustion**. C'est une accélération temporelle massive par rapport au cycle fossile uniquement en termes de flux, même si le carbone est biogénique. Le bois énergie n'est pas climatiquement neutre sur le temps court — c'est une fausse solution de transition.

2.3 Confirmation nationale — IGN, Inventaire Forestier National 2025

Sur la période 2015-2023, les forêts françaises ont séquestré en moyenne **39 Mt CO₂ /an**, contre **63 Mt CO₂ /an sur 2005-2013** — un ralentissement de **38% en moins de dix ans**, lié aux crises sanitaires (scolytes, chalarose, dépérissement du châtaignier) et aux sécheresses répétées. Dans certains massifs, notamment le Nord-Est, la mortalité et les prélèvements dépassent la production biologique, entraînant une baisse brutale des stocks constitués sur plusieurs décennies.

2.4 L'échelle planétaire — addition des sources

L'Amazonie a basculé par endroits de puits net à source nette de CO₂ selon les mesures aériennes depuis 2021. Les forêts boréales canadiennes et sibériennes brûlent à des superficies records depuis 2020. En France, l'été 2022 (72 000 ha), l'été 2024, et l'été 2026 (110 000 ha au 10 août — record absolu depuis le début des observations satellitaires EFFIS) illustrent que des forêts qui étaient des puits de carbone peuvent devenir en quelques semaines des sources nettes.

2.5 La biomasse résiduelle de Résilience — une ressource complémentaire, non concurrente

Une objection fréquente mérite d'être anticipée : si les forêts dépérissent, où trouver la biomasse pour une filière de pyrogasification à grande échelle ? La réponse est dans la nature même de la crise forestière : le dépérissement produit précisément la biomasse résiduelle que Résilience 2045 valorise.

Résilience ne repose pas sur les coupes rases de bois d'œuvre. Les 9 filières de biomasse identifiées dans le corpus V11 sont : résidus agricoles non méthanisables (pailles, rafles, sarments), bois mort et bois d'éclaircie sanitaire qu'il faut sortir des forêts pour prévenir les incendies, digestats solides de méthanisation, boues de STEP séchées, CSR (combustibles solides de récupération), bois de haies et de bocage. Ces gisements sont abondants, géographiquement distribués, et structurellement distincts du bois d'œuvre.

La crise forestière crée donc une synergie inattendue : plus les forêts dépérissent, plus la biomasse résiduelle d'entretien et sanitaire disponible augmente — biomasse qu'il faut de toute façon extraire pour réduire le risque incendie.

Temps de rétention du carbone forestier

50 à 300 ans — avant incendie, tempête, sécheresse ou exploitation

La forêt séquestre à l'échelle du temps humain et peut tout relâcher à l'échelle d'un été.

3. Le permafrost — la bombe à retardement non linéaire

Entre **1 460 et 1 600 milliards de tonnes de carbone organique** sont stockées dans les sols gelés de l'Arctique — soit deux fois plus que tout le CO₂ actuellement présent dans l'atmosphère. C'est le réservoir de carbone le plus important et le plus vulnérable au réchauffement climatique.

3.1 Les estimations du GIEC et des modèles récents

Le sixième rapport du GIEC (AR6, 2021) estime que le permafrost pourrait libérer entre **30 et 150 Gt de carbone d'ici 2100** selon la trajectoire d'émissions. Les modèles les plus récents (CMIP6, 2023-2025) privilégient des fourchettes centrales de **60 à 100 Gt C à horizon 2100** — ce qui pourrait amputer d'environ **0,1 à 0,3°C** le budget carbone restant pour tenir sous +1,5°C, budget déjà largement entamé.

3.2 Le mécanisme auto-amplificateur

Le dégel du permafrost libère du méthane (CH_4) et du CO_2 . En zone anaérobie (lacs, zones humides formées par l'affaissement des terrains), le méthane est prédominant — il est 82 fois plus puissant que le CO_2 sur 20 ans. Ce méthane réchauffe l'atmosphère, ce qui accélère le dégel, qui libère davantage de méthane. C'est une boucle de rétroaction positive sans mécanisme naturel de saturation à l'échelle humaine.

Les modèles climatiques suggèrent que plus de **50% des territoires couverts de permafrost** pourraient fondre d'ici 2050, et jusqu'à **90% d'ici 2100** dans le scénario de hautes émissions. Contrairement à une forêt qui peut théoriquement repousser, **un permafrost qui dégèle ne se règle pas à l'échelle humaine**. C'est un basculement à sens unique.

Impact sur les budgets carbone (étude Nature Geoscience)

En cas de dépassement de l'objectif de Paris, le permafrost risque d'annihiler tous les efforts de réduction.

Le budget carbone pour rester sous 2°C est réduit de 100 à 190 GtCO_2 dès lors que les émissions **du permafrost sont intégrées — réduction qui s'aggrave avec chaque dixième de degré de dépassement**.

Temps de rétention dans le permafrost

Des milliers à des dizaines de milliers d'années — jusqu'au dégel.

Après dégel : libération progressive sur des décennies à siècles, irréversible.

4. Les océans — la bulle sous pression

Les océans absorbaient historiquement 25 à 30% du CO_2 anthropique annuel. Ce rôle est en train de se fragiliser par deux mécanismes distincts et convergents, documentés par Météo-France (2026) et l'analyse du Dr T. Harris (mars 2026) sur la base des données NOAA et CMEMS.

4.1 La stratification — le « Grand Découplage »

Depuis les années 1980, une tendance au rafraîchissement des couches supérieures a renforcé la **stratification océanique** : les couches se figent, refusent de se mélanger. Le signal riche en CO_2 venant des profondeurs reste isolé sous la surface. Dans l'océan Austral, ce blocage a **temporairement** renforcé le puits de carbone en surface. Mais sous la surface, entre 100 et 200 mètres de profondeur, la pression de CO_2 n'a cessé d'augmenter depuis les années 1990 — **le carbone s'accumule comme une bulle sous pression**.

En 2023 et 2024, l'essentiel de l'absorption de chaleur s'est produit dans les 300 premiers mètres des océans avec un pic massif de stratification. La NOAA prédit 60% de probabilité d'un nouvel El Niño fin 2026. Scénario de risque quantifié : un El Niño fort pourrait provoquer un dégazage significatif du CO_2 accumulé en subsurface (100–200 m). L'amplitude de ce dégazage reste incertaine, mais le mécanisme physique est établi — la stratification n'est pas un stockage permanent, c'est un stockage conditionnel à la stabilité thermique des couches.

4.2 Le réchauffement de surface — réduction structurelle

Sur la période 2016-2025, la température des océans a augmenté d'environ **$1,03^\circ\text{C}$** par rapport à la période préindustrielle. Un océan plus chaud dissout moins de CO_2 — c'est une loi physique (loi de Henry). Cette réduction de la capacité d'absorption est **structurelle et s'aggrave avec chaque degré supplémentaire**. La mer Méditerranée se réchauffe deux fois plus rapidement que la moyenne globale. Météo-France confirme que le réchauffement "provoque des épisodes de dégazage de gaz à effet de serre".

Temps de rétention océanique

Couches superficielles : quelques décennies.

Couches profondes (circulation thermohaline) : plusieurs siècles à millénaires.

Mais l'accès au stockage profond est précisément ce que la stratification bloque.

5. Les tourbières et sols — les puits oubliés

Les tourbières couvrent 3% de la surface terrestre mais stockent **environ 30% du carbone des sols — ~550 Gt C**. Le drainage pour l'agriculture et l'exploitation de la tourbe transforme ces puits en sources : une tourbière drainée libère du CO₂ et du N₂O en continu. L'assèchement climatique aggrave ce processus indépendamment des pratiques agricoles. Les tourbières de pergélisol d'Europe et de Sibérie occidentale sont particulièrement vulnérables.

Les sols agricoles européens, dont la teneur en matière organique a décliné de 20 à 30% au cours du XXe siècle sous l'effet des pratiques intensives, sont des sources nettes de CO₂ dans de nombreuses régions. La mécanisation, l'irrigation et les intrants chimiques ont accéléré la minéralisation de la matière organique sans que les stocks soient reconstitués.

6. Synthèse comparative — Puits naturels vs Biochar

Puits	Stock total	Tendance actuelle	Irréversibilité	Temps rétention
Forêts mondiales	~860 Gt C	Déclin rapide — ~38% France 2005-2023 (IGN). Basculement vers source dans les zones brûlées	Partielle — repousse possible en siècles, mais vulnérable aux aléas climatiques	50 à 300 ans avant incendie ou exploitation
Permafrost	1 460–1 600 Gt C (2× stock atmosphérique)	60–100 Gt C libérés d'ici 2100 (CMIP6). Boucle auto-amplificatrice méthane	Forte — pas de regel à l'échelle humaine. Risque d'annihiler les budgets carbone	Millénaires à dizaines de millénaires — jusqu'au dégel
Océans (couches superficielles)	~38 Gt CO ₂ absorbés/an	Stratification croissante. Bulle de CO ₂ sous pression (100-200m). Risque de libération massive lors d'El Niño fort 2026/2027	Partielle selon vitesse de stratification et événements El Niño	Couches superficielles : décennies. Profondes (thermohaline) : siècles à millénaires
Tourbières et sols agricoles	~550 Gt C (tourbières)	Sources nettes dans zones drainées. Aggravation climatique indépendante des pratiques agricoles	Forte sur terres drainées	Variable — siècles si préservées
Biochar (Résilience 2045)	7,5–9 Mt/an → 19–28 Mt CO₂ eq/an	Croissante avec déploiement industriel. Co-produit de la chaîne bio-CH ₄	Nulle — ne brûle pas, ne se décompose pas, ne se dissout pas. Irréversible par conception	≥ 1 000 ans certifiés EBC/Puro.earth (H/Corg ≤ 0,4 à ≥ 700°C)

(*) Le biochar Résilience 2045 est produit à ≥ 700°C avec H/Corg ≤ 0,4 — garantissant une stabilité millénaire certifiable EBC/Puro.earth.

7. Ce que cela signifie pour la politique climatique

Le diagnostic de fond

Les scénarios officiels de neutralité carbone 2050 sont calculés sur des puits qui s'effondrent. Si l'on intègre les émissions du permafrost (60–100 Gt C d'ici 2100), la réduction de l'absorption océanique, et la transformation des forêts de puits en sources, la trajectoire de CO₂ atmosphérique **dépasse les projections officielles même si les émissions humaines atteignent zéro net en 2050.**

Arrêter les émissions fossiles ne suffit plus.

Le CO₂ déjà émis continue de réchauffer, ce réchauffement libère le carbone des puits naturels, et cette libération supplémentaire continue de réchauffer. C'est une boucle que la neutralité carbone ne brise pas — elle la ralentit seulement.

Ce que Résilience 2045 apporte que les puits naturels ne peuvent pas faire

Le biochar est structurellement différent de tous les puits naturels décrits dans cette note sur un point décisif : il ne peut pas s'inverser.

Une forêt brûle. Un pergélisol dégèle. Un océan se stratifie et dégazé. Une tourbière se draine. Dans chaque cas, le carbone stocké retourne à l'atmosphère sous une contrainte externe. **Le biochar, lui, ne répond à aucune contrainte climatique.**

C'est la seule technologie de séquestration qui soit simultanément permanente à l'échelle millénaire, non réversible par le réchauffement climatique lui-même, co-produite par une filière énergétique produisant du bio-CH₄, certifiable et traçable à l'unité de production, et à coût décroissant avec l'échelle industrielle.

À l'échelle de Résilience 2045

150 sites × 1 000 t/j de biomasse → 7,5 à 9 Mt de biochar/an

Séquestration biochar seul : 19 à 28 Mt CO₂ eq/an

Bilan carbone France –60 à –80 Mt CO₂ /an à ~2045 (ensemble de la chaîne) :

- Séquestration biochar : 19–28 Mt CO₂ eq/an
- Substitution du gaz naturel fossile par bio-CH₄ : ~20–25 Mt CO₂ eq/an
- Décarbonation mobilité (bio-GNV/GNL vs diesel/kérosène) : ~15–20 Mt CO₂ eq/an
- Réduction émissions agricoles (digestat, méthanisation) : ~5–10 Mt CO₂ eq/an

Dans le contexte de l'effondrement simultané des puits naturels, ce n'est pas un objectif ambitieux.

C'est une nécessité minimale pour compenser ce que la nature va relâcher quoi qu'il arrive.

Jacques Diez — ingénieur retraité — Programme Résilience 2045

resilience2045.fr