

# Pourquoi la nature seule ne suffira pas

## Puits de carbone naturels, limites physiques et nécessité d'une capture active — note de cadrage

Programme Résilience 2045 — note technique V2 — Juillet 2026

### 0. Précision terminologique préalable

Cette note distingue systématiquement deux régimes de stockage du carbone, qu'il ne faut pas confondre sous le terme générique de « puits » :

- le stockage réversible (forêts, sols, biomasse vivante) : le carbone y transite quelques années à quelques décennies avant d'être remis en circulation par les décomposeurs (champignons, bactéries) — voir la note « Cycle du carbone et champignons ». Sur un tronc au sol, environ 95 à 99 % du carbone repart en CO<sub>2</sub> dans les quelques années suivant la mort de l'arbre ; 1 à 5 % seulement s'incorpore durablement à l'humus stable (Sequestration\_CO2\_foret\_vs\_biochar\_v4, §1.2). Le bilan nul d'une forêt à l'équilibre n'est donc pas un stockage manqué : c'est la signature d'un système qui recycle, pas qui retire ;
- la séquestration durable (biochar, minéralisation, stockage géologique) : le carbone y est rendu chimiquement ou physiquement inaccessible aux décomposeurs, pour des durées de plusieurs siècles à plusieurs millénaires.

Le terme « puits naturel », utilisé par le Global Carbon Budget et repris plus bas dans cette note, désigne un flux net mesuré à l'échelle mondiale — actuellement positif parce que les forêts en repousse et l'effet de fertilisation par le CO<sub>2</sub> font que la croissance dépasse, pour l'instant, la décomposition. Ce n'est pas une séquestration au sens propre : c'est un stock provisoire, réversible en quelques années à quelques décennies (incendie, sécheresse, maladie, coupe), et actuellement en train de se réduire sous l'effet du changement climatique lui-même (voir section 4). Dans cette note, l'expression est donc toujours accompagnée de la mention « réversible » lorsqu'elle désigne la composante terrestre.

### 1. Objet de la note

Un article de Sciences et Avenir (n°953/954, juillet-août 2026) présente une expérience de pensée du climatologue Roland Séférian (CNRM/CNRS) : « Et si on n'émettait plus de gaz à effet de serre ? ». Cette note a pour objet de préciser ce que cette expérience de pensée démontre réellement, ce qu'elle ne démontre pas, et pourquoi elle conforte — plutôt qu'elle ne concurrence — l'architecture du Programme Résilience fondée sur la séquestration durable du carbone (biochar, CO<sub>2</sub> biogénique concentré).

Le point de départ est une question simple : si l'arrêt total des émissions de gaz à effet de serre ne suffit déjà pas à ramener rapidement le système climatique à l'équilibre préindustriel, alors la seule action réaliste à l'échelle d'un siècle est d'accélérer artificiellement ce que la nature ne fait pas — puisque son stockage biologique est, par construction, temporaire et réversible.

### 2. Ce que dit précisément l'expérience de pensée de Séférian

Le titre de l'article porte sur l'ensemble des gaz à effet de serre, non sur le seul CO<sub>2</sub> — distinction importante, car elle explique pourquoi l'article doit aussi traiter des aérosols, qui ne sont pas un gaz à effet de serre mais un sous-produit de la combustion fossile associé aux mêmes sources d'émission.

- Pour le CO<sub>2</sub> seul : au cours des 50 ans suivant un arrêt total des émissions, les températures globales cesseraient d'augmenter (stabilisation par compensation entre refroidissement et réchauffement résiduel).
- Pour le méthane (durée de vie atmosphérique de 10 à 12 ans) : un arrêt des émissions ramènerait sa concentration proche des niveaux préindustriels d'ici 2100, avec un refroidissement estimé à environ 0,5 °C à l'échelle mondiale.

- Pour les aérosols (sulfates issus de la combustion fossile, à effet refroidissant) : leur disparition brutale — consécutive à l'arrêt des fossiles — provoquerait un réchauffement transitoire de 10 à 40 ans, le temps que ces particules soient lessivées de l'atmosphère.

Ce dernier point est le garde-fou essentiel contre toute lecture optimiste hâtive : arrêter les fossiles, c'est aussi arrêter le masquage partiel du réchauffement par les aérosols. Le scénario n'est donc pas « tout s'arrange immédiatement », mais « le système se stabilise après une phase d'ajustement, à condition que l'arrêt soit total et rapide ».

### 3. Une base scientifique solide, mais un cadre contrefactuel

L'estimation retenue par le GIEC (AR6) pour le Zero Emissions Commitment (ZEC — l'évolution de la température après cessation complète des émissions de CO<sub>2</sub>) est de  $0 \pm 0,3$  °C pour un réchauffement initial proche de 2 °C. L'idée ancienne d'un réchauffement qui se poursuivrait mécaniquement pendant des siècles après l'arrêt des émissions est donc bien dépassée dans la littérature récente — l'article de Sciences et Avenir reflète l'état de l'art, pas une position isolée.

Mais il s'agit d'un cadre contrefactuel : un arrêt total et brutal de toutes les émissions anthropiques n'est, par construction, ni une prévision ni une trajectoire réaliste. Il sert à isoler la physique du système climatique, pas à décrire ce qui va se passer. Deux raisons structurelles rendent cet arrêt total improbable à l'échelle du siècle :

- des réticences politiques et économiques persistantes, à l'échelle mondiale, sur le rythme de sortie des fossiles ;
- des usages du pétrole aujourd'hui sans substitut industriel à grande échelle — bitume routier, feedstocks pétrochimiques (plastiques, engrais azotés, lubrifiants), certains carburants d'aviation long-courrier.

Le scénario 3 du corpus Résilience (Note CO<sub>2</sub> atmosphérique V4) chiffre précisément ce résidu incompressible à environ 6 Gt CO<sub>2</sub>/an après 2070, même dans une trajectoire d'électrification mondiale ambitieuse.

### 4. Le stockage réversible (forêts, sols, océan de surface) : une capacité limitée et en déclin

Les données les plus récentes du Global Carbon Budget (rapport 2025, Friedlingstein et al., publié en amont de la COP30) permettent de chiffrer précisément les limites de ce stockage :

- sur la dernière décennie, le stockage réversible absorbe en moyenne environ la moitié des émissions anthropiques annuelles — 21 % par les sols et les forêts, 29 % par l'océan — mais ce chiffre porte sur le flux émis chaque année, non sur le retrait du stock déjà accumulé dans l'atmosphère depuis 1750 ;
- cette capacité se dégrade déjà, mesurablement : le réchauffement climatique la rend aujourd'hui 25 % moins efficace côté terrestre et 7 % moins efficace côté océanique (solubilité réduite du CO<sub>2</sub> en eau plus chaude, sécheresses limitant la photosynthèse) ;
- le Global Carbon Project estime qu'environ 8 % de la hausse du CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis 1960 est directement imputable à cet affaiblissement — ce n'est plus un risque prospectif, c'est un phénomène déjà mesuré ;
- ce stockage reste, par nature, réversible à court terme : les incendies canadiens de 2023 (18 Mha brûlés) ont transformé en quelques semaines un stock accumulé sur un siècle en source nette de CO<sub>2</sub> (Sequestration\_CO2\_foret\_vs\_biochar\_v4, §1.4) — illustration directe de la fragilité du stockage biologique face au changement climatique qu'il est censé atténuer.

Même la fraction qui rejoint l'océan profond et s'y stabilise met plusieurs milliers d'années à s'équilibrer complètement avec les sédiments (Rapport Quinet, France Stratégie, 2025) — c'est la seule composante de ce paragraphe qui relève d'une séquestration réellement longue, mais à une échelle de temps sans pertinence pour l'action climatique du siècle en cours.

Conclusion directe : aucune configuration réaliste — même avec arrêt total et immédiat des émissions, hypothèse déjà écartée au point 3 — ne permettrait un retour à l'équilibre préindustriel avant la fin du siècle par le seul stockage biologique réversible. Ce stockage recycle le carbone sur des décennies ; il ne le retire pas sur des siècles.

## 5. Cohérence avec l'analyse du cycle biologique du carbone (note « Champignons »)

Ce constat rejoint directement l'analyse développée dans la note sur le cycle du carbone et les champignons décomposeurs : le cycle biologique (photosynthèse → biomasse → décomposition fongique → CO<sub>2</sub>) est un système de recyclage extrêmement performant, mais qui n'a pas vocation à retirer durablement le carbone de l'atmosphère — il le fait circuler, il ne le séquestre pas. C'est très exactement ce que confirme le bilan carbone détaillé de la décomposition forestière : ~50 % du carbone réémis directement par respiration bactérienne et fongique, ~45 % via le métabolisme des décomposeurs, 1 à 5 % seulement incorporés en humus stable.

Autrement dit, la nature dispose de deux vitesses, et d'aucune échelle intermédiaire : un recyclage rapide (années à décennies, où l'essentiel du carbone repasse par les champignons) et une séquestration lente à l'échelle géologique (millénaires, via les sédiments océaniques profonds). Aucune des deux ne correspond à l'échelle de temps sur laquelle il faudrait agir pour limiter le réchauffement à un niveau gérable.

## 6. Conséquence pour le Programme Résilience : la séquestration durable n'est pas une option

C'est précisément cet écart d'échelle de temps que le Programme Résilience cherche à combler. Le biochar transforme la fraction du carbone qui, autrement, repartirait à 95–99 % en CO<sub>2</sub> par décomposition, en une forme chimiquement stable pour 500 à 5 000 ans (standards EBC, reconnaissance CRCF UE depuis le 3 février 2026). La valorisation du CO<sub>2</sub> biogénique concentré (méthanation Sabatier, carbonatation minérale, stockage géologique piloté) ajoute un second puits, distinct et cumulable.

Le biochar et le CO<sub>2</sub> biogénique concentré ne sont donc pas des compléments optionnels à la décarbonation : ils sont le seul mécanisme documenté capable d'agir sur une échelle de décennies plutôt que de millénaires, précisément parce que le stockage naturel, laissé à lui-même, est réversible et actuellement en déclin.

## 7. Compatibilité avec la trajectoire CO<sub>2</sub> du corpus (retour à 280 ppm, 2145–2170)

Le chiffrage du corpus Résilience (Note CO<sub>2</sub> atmosphérique V4, scénario 4a) situe un retour possible à 280 ppm entre 2145 et 2170 sur la base d'une extraction nette additionnelle de 5,94 Gt CO<sub>2</sub>/an à plein déploiement mondial (2060), obtenue par pyrogazéification et biochar sur 800 Mha de terres marginales — et non par un renforcement du stockage réversible naturel, qui resterait, comme démontré ci-dessus, plafonné et déclinant.

Le document précise déjà, à raison, que le scénario réaliste (4b — fossiles résiduels 6 Gt/an, permafrost, puits dégradés) ne ramène pas le CO<sub>2</sub> à 280 ppm mais le stabilise à environ 442 ppm en 2200. Cette note en renforce la justification physique : le stockage réversible naturel n'apporte aucune marge de manœuvre supplémentaire dans le scénario réaliste, puisqu'il est déjà compté comme dégradé (-30 % après 2080) dans les hypothèses du modèle.

Il est recommandé que toute page ou document du site mentionnant l'échéance 2145–2170 rappelle, en une phrase, qu'elle repose sur une hypothèse de déploiement mondial de séquestration durable active — jamais sur une capacité renforcée des puits naturels réversibles, qui décline structurellement.

## 8. Synthèse

L'expérience de pensée de Sférian est scientifiquement solide et conforme à l'état de l'art (GIEC AR6, ZEC). Mais elle répond à une question de physique du climat — la stabilisation des températures après arrêt total des émissions — qui n'est pas celle du retour de la concentration de CO<sub>2</sub> à son niveau préindustriel. Le

stockage naturel réversible (forêts, sols, océan de surface) n'absorbe qu'une fraction du flux annuel d'émissions, ne retire pas le stock déjà accumulé, se dégrade déjà sous l'effet du changement climatique lui-même, et reste par construction réversible en quelques années à quelques décennies — contrairement à la séquestration durable (biochar, minéraux, stockage géologique), seule catégorie à l'échelle de temps humaine pertinente. Combiné à l'improbabilité d'un arrêt total et immédiat des fossiles, ce constat confirme qu'aucun retour à l'équilibre préindustriel n'est plausible avant la fin du siècle sans séquestration durable à grande échelle — ce qui est précisément la fonction du biochar et du CO<sub>2</sub> biogénique dans l'architecture du Programme Résilience.

*Sources principales : GIEC AR6 (ZEC,  $0 \pm 0,3$  °C) ; Global Carbon Budget 2025, Friedlingstein et al. (Global Carbon Project) ; Rapport Quinet 2025, France Stratégie ; Sciences et Avenir n°953/954, juillet-août 2026, entretien avec Roland Séférian (CNRM/CNRS) ; Sequestration\_CO2\_foret\_vs\_biochar\_v4 et Note CO<sub>2</sub> atmosphérique V4, Programme Résilience.*