

CARBONE ACTIF, CARBONE FOSSILE, PUIT ET RÉSERVOIRS

Guide physique pour sortir des confusions

Note de synthèse transversale — Programme Résilience 2045 — Juillet 2026

Principe directeur : le climat dépend du stock de carbone présent dans le système actif, alors que les politiques publiques se focalisent le plus souvent sur les flux annuels. Toute stratégie climatique sérieuse doit donc distinguer les actions qui réduisent un flux de celles qui modifient durablement ce stock.

Introduction

Les débats sur le climat souffrent d'une confusion persistante entre des phénomènes physiquement distincts. On assimile le méthane érécté par une vache au méthane d'un gisement gazier. On présente une forêt en croissance comme un « puits de carbone » au même titre qu'une formation géologique. On compte des crédits carbone forestiers comme des séquestrations permanentes. On demande aux éleveurs bovins de réduire leur troupeau pour atteindre des objectifs climatiques dont l'effet physique réel est beaucoup plus limité qu'on ne le suppose généralement.

Ces confusions ne sont pas anodines : elles orientent des politiques coûteuses vers des leviers inefficaces, tout en détournant l'attention des seuls mécanismes capables d'agir durablement sur le stock de carbone atmosphérique.

Cette note pose les distinctions fondamentales. Elle ne propose pas une politique — elle fournit le cadre physique sans lequel aucune politique climatique ne peut être correctement évaluée.

1. Deux systèmes, pas un

Avant 1750, le cycle du carbone terrestre fonctionnait en équilibre dynamique autour de 280 ppm de CO₂ atmosphérique. Le carbone circulait en permanence entre trois compartiments — atmosphère, biosphère, océans superficiels — mais la quantité totale de carbone libre dans ce système restait constante à l'échelle des temps humains. Les arbres naissaient, mouraient, se décomposaient. Les champignons et bactéries recycloient la matière organique. Le carbone changeait de compartiment sans jamais quitter le système.

C'est le **carbone actif** : en circulation permanente, il constitue le substrat du vivant depuis des centaines de millions d'années.

En face, immobilisé dans les roches sédimentaires depuis 100 à 400 millions d'années, existe un autre carbone : pétrole, gaz naturel, charbon. Ce **carbone fossile** a été soustrait au cycle biologique principalement au Carbonifère, lorsque la lignine des végétaux s'accumulait sans être dégradée efficacement. Il n'appartient pas au système actif. Il en est sorti.

La révolution industrielle a profondément modifié le fonctionnement du cycle du carbone en réinjectant dans le système actif un carbone jusque-là isolé depuis des centaines de millions d'années. Chaque tonne de pétrole, de gaz ou de charbon combustée transfère dans le système actif du carbone qui en était absent depuis des dizaines de millions d'années. Le stock total de carbone libre augmente. La concentration atmosphérique de CO₂ monte — de 280 ppm avant 1750 à 420 ppm aujourd'hui.

La cause principale du dérèglement climatique est cette injection de carbone extérieur dans un système qui était auparavant proche d'un équilibre dynamique. Tout le reste — déforestation, élevage, biomasse — redistribue du carbone à l'intérieur du système actif. Ce n'est pas sans importance, mais c'est d'une nature physique radicalement différente.

La déforestation mérite une précision : elle redistribue du carbone actif, mais elle réduit aussi durablement la capacité de stockage des écosystèmes. Ces deux mécanismes se cumulent sans se confondre : l'un injecte du carbone extérieur, l'autre réorganise le système actif en réduisant ses tampons. Les émissions cumulées de la déforestation représentent environ 10 à 15 % du total depuis 1850.

2. Flux et stocks — la distinction qui manque au débat

Un **flux** est une quantité de carbone qui se déplace par unité de temps. Un **stock** est une quantité immobilisée quelque part. La confusion entre les deux est à l'origine de la majorité des erreurs de politique climatique.

Les forêts mondiales absorbent chaque année environ 120 milliards de tonnes de carbone par photosynthèse. Ce chiffre est souvent présenté comme la preuve que la nature « gère » le problème. Il ne le prouve pas : la quasi-totalité de ce flux repart dans l'atmosphère par la respiration des plantes, la décomposition fongique et bactérienne, les incendies. Le flux net de séquestration réelle des forêts mondiales est de l'ordre de 2 à 9 Gt CO₂ par an selon les années — et ce chiffre décline : l'absorption terrestre est tombée de 9,5 Gt CO₂ en 2022 à 1,5–2,6 Gt en 2023 (Philippe Ciais, LSCE/CNRS, National Science Review 2026). Ce signal d'alerte révèle la vulnérabilité structurelle des puits terrestres face aux épisodes climatiques extrêmes.

Un **réservoir labile** est un stock temporaire, réversible à court terme. Une forêt jeune en croissance est un puits net positif. Une forêt mature en équilibre dynamique a un bilan net proche de zéro — ce qu'elle capte par photosynthèse est compensé par ce que la décomposition restitue. Et une forêt brûlée ou coupée devient source nette : les forêts canadiennes ont brûlé 18 millions d'hectares en 2023, transformant un siècle de stockage en émissions massives en une seule saison.

Un **puits structurel** est une séquestration durable, résistante à la perturbation, sur des durées de siècles à millénaires. Les carbonates géologiques, le carbone aromatique condensé du biochar, les formations géologiques profondes en sont des exemples. La différence avec un réservoir labile n'est pas de degré — elle est de nature.

Type de stockage	Durée	Réversibilité	Exemples
Réservoir labile	2–100 ans	Totale	Prairie, forêt mature, sol agricole
Puits intermédiaire	Siècles	Faible	Humus stable, tourbières profondes
Puits structurel	Siècles–millénaires	Quasi nulle	Biochar EBC, carbonatation minérale, CCS
Puits géologique	Dizaines–centaines de Ma	Nulle	Charbon, pétrole, gaz (avant extraction)

La neutralité carbone par compensation mérite ici une clarification : mettre en regard un réservoir labile (crédits forestiers) contre une injection irréversible (carbone fossile), c'est de la neutralité comptable — non de la neutralité climatique.

3. Le méthane — deux molécules, deux statuts physiques opposés

Le méthane (CH₄) est un gaz à effet de serre puissant : son pouvoir réchauffant est 28 fois celui du CO₂ sur 100 ans, et 80 à 84 fois sur 20 ans (GIEC AR5/AR6). Ces chiffres sont exacts. Ce qui est inexact, c'est de les appliquer de façon identique à toutes les sources de méthane sans distinguer leur origine.

Le méthane biogénique — bovins, rizières, zones humides, décharges organiques — est du carbone actif en circuit fermé. La vache ingère de l'herbe qui a fixé du CO₂ atmosphérique par photosynthèse. Elle rejette du CH₄. Ce méthane est oxydé par les radicaux OH atmosphériques en 10 à 12 ans, redevenant CO₂. Ce CO₂ est re-fixé par la photosynthèse de la prochaine génération d'herbe. Le carbone n'a pas quitté le système actif. La quantité totale de carbone libre n'a pas changé.

Le méthane fossile — fuites de puits de gaz, extraction de charbon, gazoducs — est du carbone hors système réintroduit dans le système actif. Chaque molécule de CH₄ fossile qui s'échappe injecte du carbone géologique dans l'atmosphère de façon irréversible à l'échelle humaine.

Les inventaires nationaux appliquent le même PRG (Pouvoir de Réchauffement Global) à ces deux sources. C'est une convention comptable adaptée au calcul des émissions totales, mais qui ne distingue pas les conséquences physiques des différentes origines du méthane : l'un recycle du carbone actif en circuit fermé, l'autre injecte du carbone fossile dans le système. Les effets sur le stock de carbone atmosphérique à long terme sont pourtant radicalement différents.

La métrique GWP* (Lynch et al., Nature Climate Change, 2020) formalise cette distinction : pour un cheptel bovin *stable*, le forçage radiatif du méthane entérique n'augmente pas — il est en équilibre cyclique. Le GWP₁₀₀ conventionnel surestime l'impact d'un troupeau stable en le traitant comme une injection cumulative. Ainsi, pour un cheptel stable ou en légère baisse, l'effet à long terme sur le stock de carbone actif est très inférieur à ce que suggèrent les inventaires classiques — même si un forçage radiatif transitoire réel (10 à 12 ans) doit être reconnu.

4. La biomasse — ni neutre par nature, ni toujours active de la même façon

La biomasse végétale est souvent présentée comme « neutre en carbone » par définition. Cette neutralité est réelle pour le stock atmosphérique à l'échelle du cycle biologique — mais elle masque deux distinctions importantes.

La décomposition naturelle n'est pas toujours aérobie ni lente. Lorsque des résidus organiques s'accumulent en tas épais, en fosses d'élevage ou en décharges, la décomposition devient anaérobie dès que l'oxygène ne pénètre plus au-delà de 20 à 30 cm. Elle produit alors du méthane biogénique à fort pouvoir réchauffant à court terme. Ce méthane diffus est structurellement sous-comptabilisé dans les inventaires officiels, qui mesurent des émissions ponctuelles — pas des andains agricoles ou des fosses à lisier.

La décomposition est un processus de recyclage, pas de séquestration. Sur un tronc d'arbre laissé au sol, environ 50 % du carbone est réémis directement en CO₂ par respiration bactérienne et fongique, 45 % via le métabolisme des décomposeurs, et seulement 1 à 5 % s'incorpore durablement à l'humus stable. Les champignons décomposeurs assurent la circulation du carbone dans le système actif — ils ne le séquestrent pas.

Ce mécanisme de recyclage est ancien. Au Carbonifère, avant l'apparition des champignons capables de dégrader la lignine, la biomasse végétale s'accumulait sans être recyclée et s'enfouissait sous les sédiments, donnant naissance aux gisements de charbon. Lorsque ces champignons ligninolytiques sont apparus, le cycle s'est refermé. La révolution industrielle rouvre précisément ce carbone fossilisé.

La gestion active de la biomasse modifie ce destin. En interceptant une partie des flux de biomasse avant leur décomposition naturelle, on change le devenir du carbone : au lieu de retourner dans l'atmosphère en quelques années, une fraction peut être convertie en énergie renouvelable ou immobilisée durablement sous forme de biochar.

5. Les puits de carbone — hiérarchie par durée

Le terme « puits de carbone » recouvre des réalités physiques radicalement différentes. La durée de séquestration est le critère décisif — non la quantité annuelle captée, ni l'intention déclarée.

Les réservoirs labiles (forêts en croissance, prairies, sols agricoles) stockent du carbone pendant 2 à 100 ans selon les conditions. Leur réversibilité est totale. Une forêt jeune est un puits net positif. Une forêt mature est en équilibre : son bilan annuel est proche de zéro. Une forêt brûlée, coupée ou stressée par la

sécheresse devient source nette. La valeur de ces écosystèmes est réelle — biodiversité, cycle de l'eau, sol vivant — mais elle est distincte de leur valeur comme puits climatique structurel.

Les puits structurels résistent à la perturbation sur des durées de siècles à millénaires. Le biochar de haute température (pyrogazéification à plus de 700°C, ratio H/C $\leq$ 0,4) est le seul puits anthropique certifiable à grande échelle aujourd'hui (standard EBC, reconnaissance CRCF UE depuis le 3 février 2026). Sa structure aromatique condensée est chimiquement résistante aux enzymes microbiennes. Le carbone fixé ne retourne pas dans l'atmosphère en cas d'abandon, de sécheresse ou d'incendie de surface.

Le signal de 2023 mérite d'être lu comme un avertissement structurel, non comme une anomalie isolée : les puits terrestres, dont la capacité était déjà en tendance déclinante depuis 2015, ont absorbé en 2023 moins de 2 Gt CO₂ contre 9,5 Gt l'année précédente. Même si 2023 était amplifiée par El Niño, elle révèle la vulnérabilité des puits naturels face aux épisodes climatiques qui vont s'intensifier. Les scénarios de neutralité carbone fondés sur des puits forestiers stables méritent d'être reconsidérés.

6. Ce que Résilience fait physiquement

Le Programme Résilience intercepte une partie des flux de biomasse résiduelle avant leur décomposition naturelle et leur ouvre trois destins alternatifs.

Substitution. Le bio-CH₄ produit par pyrogazéification et méthanation Sabatier déplace du gaz naturel fossile — du carbone actif qui substitue du carbone fossile, réduisant directement le flux d'injection hors système.

Séquestration structurelle. Le biochar immobilise 30 à 40 % du carbone de la biomasse dans une structure aromatique condensée résistant à la biodégradation pendant 500 à plusieurs milliers d'années. Il recrée, de façon contrôlée et à l'échelle humaine, un mécanisme de séquestration analogue à celui qui a produit les gisements de charbon au Carbonifère.

Ressource stratégique. La pyrogazéification produit un flux de CO₂ biogénique déjà concentré — plusieurs dizaines de pourcents, voire quasi pur après épuration. Avantage thermodynamique décisif : le DAC (Direct Air Capture) doit traiter de l'air à 0,043 % de CO₂ pour en extraire une tonne, là où ce CO₂ est directement disponible comme co-produit du processus énergétique. Il peut être orienté vers la carbonatation minérale, le stockage géologique, la méthanation Sabatier ou l'alimentation de serres agricoles.

Le bilan physique : sur base réaliste, un déploiement mondial stabilise le CO₂ atmosphérique à environ 430–442 ppm au lieu d'une montée vers 560 ppm — gain de 130 ppm. Sur base idéale avec fossiles résiduels limités, un retour vers 280 ppm préindustriel est physiquement cohérent à l'horizon 2145–2170. Ces projections sont des ordres de grandeur paramétriques cohérents avec le GIEC AR6 — elles doivent être lues comme des illustrations des mécanismes physiques, non comme des prévisions.

7. Implications politiques — hiérarchie des leviers

Levier de premier rang — arrêter les injections fossiles. C'est la condition nécessaire et non substituable. Tant que le carbone fossile est injecté dans le système actif, aucun puits ne peut inverser la hausse du stock atmosphérique — au mieux, il peut en ralentir la croissance.

Levier de second rang — séquestration structurelle active. Même un arrêt total des émissions fossiles ne ramènerait pas le CO₂ au niveau préindustriel avant plusieurs siècles, en raison du stock déjà accumulé. La séquestration structurelle active est le seul mécanisme capable d'accélérer ce retour à l'échelle du siècle. L'électrification seule est nécessaire mais insuffisante — elle réduit les entrées sans augmenter les sorties nettes.

Levier de troisième rang — gestion du système actif. La protection et la restauration des forêts, des zones humides, des prairies permanentes ont une valeur réelle : biodiversité, cycle de l'eau, sol vivant, stockage

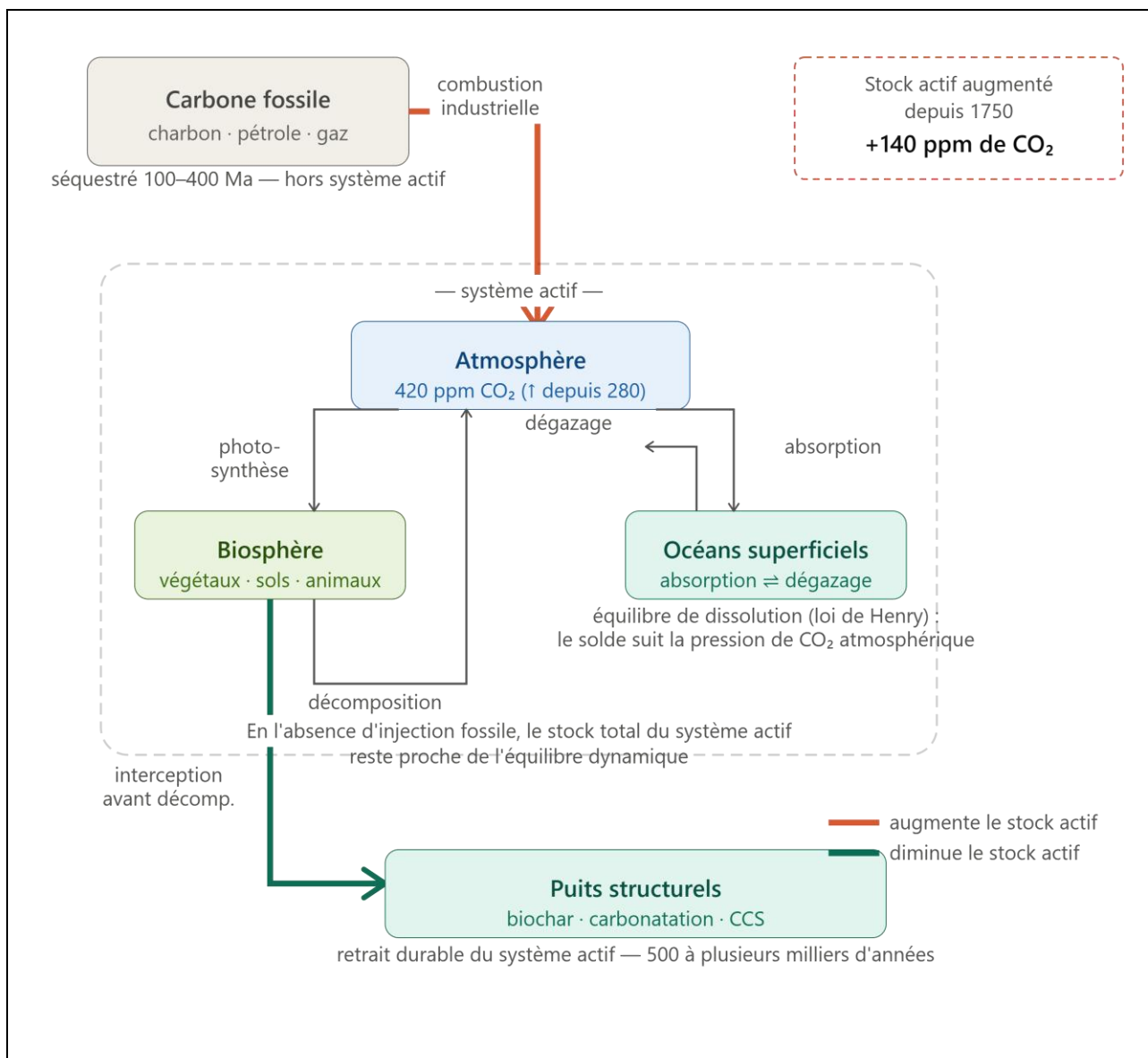
labile maintenu. Mais leur effet climatique structurel reste conditionnel et réversible. Les politiques qui les présentent comme équivalents à l'arrêt des fossiles ou à la séquestration structurelle surestiment leur portée climatique à long terme.

Sur la réduction du cheptel bovin pastoral : pour un troupeau stable ou en légère baisse, l'effet sur le stock de carbone actif à l'horizon de 100 ans est très faible — le méthane entérique est en cycle fermé, son forçage n'est pas cumulatif. L'effet de court terme (réduction du forçage radiatif pendant 10 à 12 ans) est réel mais sans commune mesure avec l'effet d'une tonne de gaz fossile évitée ou d'une tonne de carbone séquestrée en biochar. La politique la plus efficace sur ce sujet est la réduction des fuites de gaz naturel fossile, pas la réduction du cheptel pastoral.

Sur l'article R.446-105 : cette disposition du code de l'énergie exclut la pyrogazéification de l'éligibilité aux certificats de production de biogaz en France, bloquant l'équation économique de la seule filière capable de produire simultanément de l'énergie renouvelable et un puits de carbone structurel certifiable. Sa révision permettrait d'aligner le droit national sur le droit européen, qui reconnaît le biochar comme puits de carbone certifiable depuis le 3 février 2026 (règlement CRCF UE).

Tableau de synthèse — Les six confusions les plus fréquentes

Confusion fréquente	Réalité physique	Conséquence politique
CH ₄ des vaches = CH ₄ des gisements gaziers	Le CH ₄ entérique est du carbone actif en cycle fermé (10–12 ans, forçage non cumulatif). Le CH ₄ fossile injecte du carbone hors système de façon irréversible.	Pour un cheptel stable, l'effet sur le stock de carbone actif à 100 ans est très faible. Réduire les fuites de gaz fossile a un effet permanent et cumulatif.
"Une forêt est un puits de carbone"	Une forêt jeune est un puits net. Une forêt mature est en équilibre (bilan proche de zéro). Une forêt brûlée devient source nette. Le stockage est réversible.	Les crédits carbone forestiers ne compensent pas structurellement des émissions fossiles — ils représentent un stockage temporaire et conditionnel.
La biomasse est neutre en carbone par définition	Elle est neutre sur le stock si elle suit le cycle naturel aérobie. En conditions anaérobies, elle émet du CH ₄ — encore insuffisamment caractérisé dans les inventaires diffus.	Les émissions diffuses de biomasse non gérée constituent un levier climatique encore insuffisamment caractérisé et probablement sous-exploité.
Neutralité carbone 2050 = retour à l'équilibre préindustriel	La neutralité carbone arrête l'aggravation du stock. Elle ne réduit pas les 420 ppm vers 280 ppm. Seule une extraction nette structurelle peut y contribuer.	Les plans neutralité carbone ne résolvent pas le stock atmosphérique accumulé depuis 1750. Une séquestration durable active est nécessaire en complément.
Planter des arbres = séquestrer durablement	Un arbre stocke son carbone 50 à 150 ans puis le restitue. Le biochar EBC fixe le carbone 500 à 5 000 ans. Ce n'est pas une différence de degré — c'est de nature.	La reforestation a une valeur réelle (biodiversité, eau), mais ne constitue pas un puits climatique structurel substituable à la séquestration durable.
Les puits naturels absorberont les fossiles résiduels	Les puits naturels absorbent une fraction du flux annuel, pas le stock accumulé. Leur capacité décline depuis 2015 et a chuté en 2023 — signal d'alerte structurel.	Les scénarios de neutralité fondés sur des puits naturels stables méritent d'être recalibrés à la lumière des données récentes.



Cette note a été élaborée dans le cadre du Programme Résilience 2045 à partir du corpus de notes techniques V11 (mai–juillet 2026). Elle synthétise des distinctions physiques établies par le GIEC AR6, le Global Carbon Budget (Friedlingstein et al. 2025), Philippe Ciais (LSCE/CNRS, National Science Review 2026), Lynch et al. (Nature Climate Change 2020) et les standards EBC/CRCF UE. Les projections quantitatives (ppm, années) sont des ordres de grandeur paramétriques cohérents avec AR6 — elles doivent être lues comme des illustrations des mécanismes physiques, non comme des prévisions.