BOUCLES D'AMPLIFICATION CLIMATIQUE

Pourquoi un plateau de CO_2 n'est pas une stabilité — Neige et glace, sols, végétation, permafrost, tourbières

Note de synthèse V1 — Programme Résilience V11 | Octobre 2026 | Complément à la note « CO_2 atmosphérique et températures » V5.1

▶️ Message central

Le CO_2 déjà présent dans l'atmosphère (~429 ppm) a enclenché une boucle d'amplification : la neige et la glace reculent, les sols s'assèchent et retiennent moins bien la pluie, la végétation absorbe moins, et les réservoirs lents — permafrost, tourbières — commencent à libérer leur carbone. Chaque étage aggrave le suivant, et le dernier renvoie au premier.

Cette boucle n'est pas une hypothèse : elle est mesurée. Le puits des forêts françaises est passé de ~63 à ~39 Mt CO_2/an en dix ans ; en 2023, le puits terrestre mondial est tombé à son plus bas niveau depuis 2003 ; en Europe, les canicules gagnent 1,5 à 3 °C par degré de réchauffement mondial.

Arrêter les émissions fossiles stabilise à peu près la température (AR6). Mais une stabilisation au niveau actuel laisse la boucle active : glaciers, permafrost et tourbières continuent de se dégrader pendant des décennies à des siècles. Un plateau de concentration n'est pas un plateau des dégâts.

La boucle touche aussi la séquestration elle-même : le retrait par biochar et CO_2 biogénique dépend de la végétation, que le réchauffement fragilise. Comme la sortie des fossiles prendra des décennies, plus on attend pour déployer le retrait, moins il restera de biomasse pour le faire.

Ces boucles agissent d'abord sur la température, puis sur le CO_2. Si elles sont plus fortes que la valeur de référence du GIEC — ce que plusieurs signaux récents laissent envisager —, le pic de réchauffement des trajectoires ambitieuses pourrait passer de ~2 °C à ~2,2–2,4 °C (section 9).

Conséquence : il ne suffit pas d'arrêter la montée du CO_2, il faut le faire redescendre, et le plus tôt possible. Le retrait durable n'est pas une option de fin de parcours : c'est ce qui coupe la boucle, et il doit être construit pendant la décarbonation, pas après.

⚠️ **Statut de cette note — à lire en premier**

Cette note n'introduit pas de nouveau modèle climatique. Elle rassemble des résultats publiés (GIEC AR6, revues à comité de lecture, IGN, Global Carbon Project) pour décrire un mécanisme que la note « CO_2 atmosphérique et températures » V5.1 traite sous forme de paramètre (permafrost) et de stress-test (« incendies aggravés »). La V5.1 indique elle-même que les interactions non linéaires entre rétroactions ne sont pas modélisées : c'est l'objet de cette note. La section 8 chiffre l'effet des boucles carbone avec le modèle paramétrique de la V5.1, en écarts par rapport aux trajectoires publiées ; la section 9 teste, sous forme de stress-tests, des boucles de température plus fortes que la valeur de référence du GIEC. La V5.1 reste la référence ; cette note en explore les marges. Elle complète la note « Pourquoi la nature seule ne suffira pas » V2.1, qui établit le caractère réversible et déclinant des puits naturels, et la Synthèse « Puits naturels de carbone — effondrement simultané » V3, qui détaille forêts, permafrost, océans et tourbières ; elle y ajoute la cryosphère, les sols secs, l'enchaînement des étages et leur chiffrage.

Elle reste cohérente avec l'AR6 : à émissions nettes nulles, la température mondiale se stabilise à peu près (engagement à émissions nulles proche de 0 °C, fourchette des modèles d'environ −0,3 à +0,3 °C). Les études disponibles ne décrivent pas d'emballement autonome à l'échelle de la planète dans les scénarios testés. Le danger de la boucle tient à autre chose : elle amplifie le réchauffement, rend une partie des pertes irréversible à l'échelle humaine, et réduit la capacité de la nature à retirer elle-même le CO_2.

1. Une boucle en quatre étages

Le point de départ est connu : depuis deux siècles, les émissions dépassent ce que les puits naturels peuvent absorber, et le CO_2 s'accumule. Ce qui est moins souvent montré, c'est l'enchaînement des conséquences, où chaque étage aggrave le suivant avant de renvoyer vers le premier.

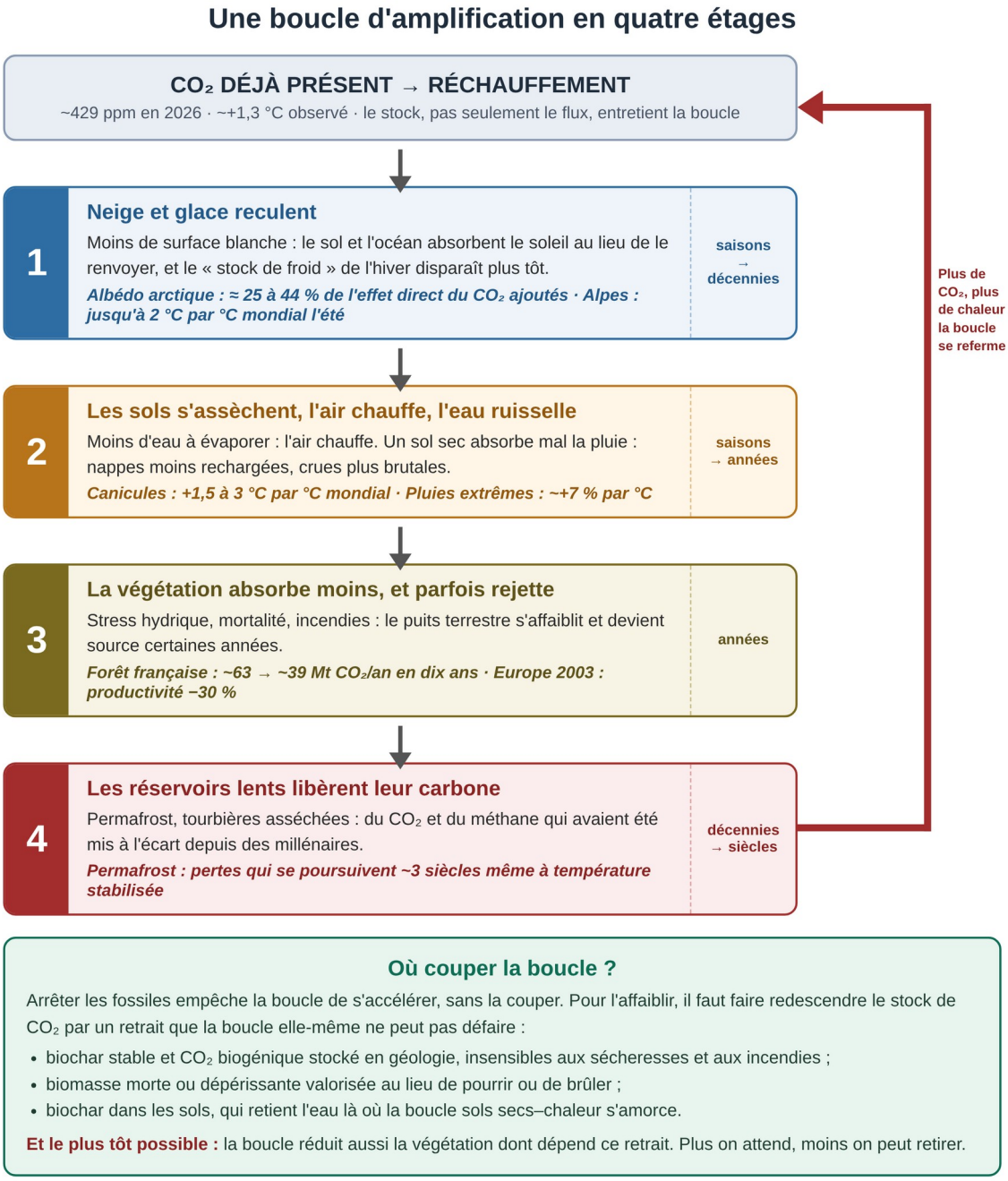


Schéma — La boucle d'amplification : du CO_2 déjà présent jusqu'aux réservoirs lents, et le retour vers l'atmosphère. Chiffres détaillés et sources dans les sections 2 à 5.

Les quatre étages n'agissent pas au même rythme : la neige et les sols réagissent d'une saison à l'autre, la végétation d'une année à l'autre, les glaciers, le permafrost et les tourbières sur des décennies à des siècles. C'est ce décalage qui rend la stabilisation trompeuse (section 6).

2. Étage 1 — Neige et glace : le miroir et le stock de froid

La neige et la glace refroidissent le climat de deux façons. Elles renvoient le rayonnement solaire : la neige fraîche en réfléchit 80 à 90 %, un océan libre moins de 10 %. Et elles stockent du froid : fondre une tonne de glace absorbe 334 MJ, autant qu'il en faut pour chauffer cette eau de 0 à 80 °C. Tant qu'il reste de la neige, l'énergie du printemps part dans la fusion plutôt que dans l'échauffement de l'air.

Ordre de grandeur	Valeur	Source
Fonte saisonnière de la banquise arctique (avril → septembre)	~16 400 km³ · ~5 × 10^{21} J/an	PIOMAS (Univ. Washington), moyenne 1979–2010
Neige saisonnière de l'hémisphère Nord (hors montagne)	~3 060 Gt au pic de mars · ~1 × 10^{21} J	Pulliainen et al., Nature 2020
Perte nette de glace (glaciers + calottes)	~690 Gt/an · ~2,3 × 10^{20} J/an	GlaMBIE, Nature 2025 ; IMBIE, ESSD 2023
Chaleur accumulée par la Terre (déséquilibre énergétique)	~0,76 W/m² · ~1,2 × 10^{22} J/an	GCOS (Hakuba et al. 2024)
Perte de réflectivité de l'Arctique (banquise)	≈ 25 % du forçage direct du CO_2, 1979–2011	Pistone et al., PNAS 2014
Perte de réflectivité de l'Arctique (banquise + neige)	≈ 44 % du forçage direct du CO_2, 1982–2015	Aulicino et al.

Tableau 1 — Énergie en jeu dans la cryosphère. 1 Gt de glace fondue = 3,34 × 10^{17} J (~93 TWh thermiques).

Lecture : le stock de froid saisonnier vaut environ la moitié de la chaleur que la Terre accumule chaque année, mais il est restitué l'hiver et pèse peu sur la moyenne mondiale ; la fonte nette ne représente qu'environ 2 % de la chaleur accumulée. C'est la perte de réflectivité qui domine : en Arctique, elle a ajouté l'équivalent d'un quart à près de la moitié de l'effet direct du CO_2 sur la période étudiée.

Localement, une boucle qui s'auto-entretient

Moins de neige, plus de chaleur locale, donc encore moins de neige. Dans les Alpes, une étude de 2026 trouve un réchauffement de 1,2 à 1,5 °C par degré de réchauffement mondial en altitude, et jusqu'à 2 °C l'été. Elle attribue l'effet de la limite des neiges pour deux tiers à la perte de réflectivité et pour un tiers à la disparition de la fonte, qui jouait le rôle de thermostat tant que la neige persistait. C'est précisément le « stock de froid » : faible à l'échelle de la planète, décisif localement.

Le résultat est observé : la Suisse est déjà à ~+2,9 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle, contre ~+1,3 °C pour la moyenne mondiale ; les glaciers alpins ont perdu ~65 % de leur volume depuis le milieu du XIXe siècle, et sous 800 m il neige deux fois moins souvent qu'en 1970.

3. Étage 2 — Des sols secs qui chauffent l'air et retiennent mal l'eau

Un sol humide évapore, et l'évaporation consomme une grande partie de l'énergie solaire. Quand la neige fond plus tôt et que les pluies d'été manquent, le sol sèche : l'énergie qui servait à évaporer chauffe directement l'air, et la chaleur assèche encore le sol.

- **Canicules européennes :** à circulation atmosphérique égale, +1,5 à 3 °C par degré de réchauffement mondial. L'amplification est la plus forte quand le sol bascule vers un régime limité par l'eau, et en août en Europe centrale (étés 2018–2022).
- **Part de la rétroaction des sols :** plus de 70 % de l'amplification des jours les plus chauds en Europe centrale (Vogel et al., GRL 2017).
- **Cas de 2019 :** l'assèchement causé par la canicule de juin a ajouté ~2 °C aux anomalies de fin juillet, lorsque la Belgique et les Pays-Bas ont dépassé 40 °C pour la première fois.

C'est l'étage qui touche le plus directement la France : sécheresse, incendies (record de l'été 2026), débit et température des fleuves qui refroidissent les centrales, dont ceux alimentés par la fonte alpine.

La boucle de l'eau : moins d'infiltration, des nappes moins rechargées, des crues plus brutales

Un sol desséché ne se contente pas de chauffer l'air : il absorbe moins bien la pluie suivante. Une partie de l'eau ruisselle au lieu de s'infiltrer ; les nappes se rechargent moins ; la sécheresse suivante commence avec des réserves plus basses, et la végétation, privée d'eau, résiste moins. Dans le même temps, les fortes pluies s'intensifient avec le réchauffement : sur des sols secs ou compactés, elles glissent en surface et gonflent les crues. La même boucle produit donc à la fois davantage de sécheresses et davantage d'inondations.

- **Sols rendus hydrophobes par la sécheresse :** en forêt, une sécheresse transforme l'infiltration — écoulements préférentiels rapides, couches superficielles qui restent sèches, sols devenus hydrophobes ; l'historique des sécheresses compte davantage que l'humidité du moment (Gimbel et al., HESS 2016). Les modèles hydrologiques ne représentent généralement pas cet effet.
- **Pluies extrêmes :** les pluies journalières extrêmes s'intensifient d'environ 7 % par degré de réchauffement, et jusqu'à ~14 % par degré pour les averses les plus courtes dans certaines régions (Fowler et al., Nature Reviews Earth & Environment 2021).
- **France, projections Explore2 (2024) :** débits d'été en baisse d'environ 30 % d'ici la fin du siècle en scénario d'émissions élevées (−15 à −50 %, jusqu'à −50 % dans le Sud-Ouest et les Alpes) ; part des cours d'eau à sec entre juillet et octobre passant d'environ 15 à 25 % ; pluies d'été en baisse d'environ 25 %. La recharge annuelle des nappes resterait à peu près stable dans le Nord, se concentrant en hiver, mais les niveaux baisseraient en Bretagne, Poitou-Charentes, Tarn-et-Garonne et Alsace. L'étude antérieure Explore 2070 estimait une baisse de recharge de 10 à 25 %, jusqu'à 30–50 % dans le Sud-Ouest.

Ce qu'on observe en France : les nappes 2022–2026 (bulletins BRGM)

Date	Situation mesurée	Territoires en difficulté
Février 2023	Toutes les nappes sous la normale ; 80 % modérément basses à très basses, après 32 jours consécutifs sans pluie (21 janv.–21 févr.). Plus de points critiques en 2012 et 2017, mais jamais tout le pays à la fois.	Couloir rhodanien, Limousin, Causses, plaine du Roussillon
1er décembre 2024	Après deux hivers très pluvieux : 65 % au-dessus de la normale, 15 % en dessous.	Roussillon au plus bas après plus de trois ans de déficit de pluie
1er septembre 2025	Après le troisième été le plus chaud depuis 1900 : 38 % sous la normale ; les nappes lentes tiennent grâce aux excédents des hivers précédents.	Roussillon, Corbières, vallée de l'Aude (bas à très bas) ; Boulonnais, Lorraine, Massif central, Limagne
Février 2026	Recharge « très exceptionnelle » : 84 % des niveaux en hausse ; excédents sur les trois quarts du pays.	Quart nord-est, modérément bas
1er juillet 2026	Recharge de l'hiver plus faible que l'année précédente : 54 % sous la normale, 93 % en baisse.	Socle limousin, Jura, Cotentin, Bretagne, Massif central
15 octobre 2026	Vidange prolongée : 68 % sous la normale, 74 % encore en baisse.	Très bas : socle du Massif central, du Cotentin à la Mayenne, Jura karstique, grès vosgiens, Albien de l'est du Bassin parisien. Situation bonne de la frontière espagnole au Rhône.

Tableau — Situation des nappes d'eau souterraine en France, d'après les bulletins mensuels du BRGM aux dates indiquées.

▶️ **Ce que montrent les mesures**

La boucle de l'eau est constatée, pas seulement supposée. Au 15 octobre 2026, le BRGM relève que les pluies de fin septembre, souvent orageuses et tombées sur des sols secs, ont produit davantage de ruissellement que d'infiltration, et n'ont pas atteint les territoires en difficulté.

Une instabilité plutôt qu'une baisse uniforme. Années très basses et très hautes alternent rapidement, et les territoires en crise se déplacent : Roussillon de 2022 à 2025, Massif central, Grand Est et socle breton-normand en 2026.

Les nappes réactives sont les plus exposées. Les nappes de socle et de karst (Bretagne, Cotentin, Massif central, Jura), sans grande réserve, répondent directement à chaque été sec. Les grandes nappes lentes amortissent les chocs, mais suivent aussi des cycles naturels d'environ 7 et 17 ans (Baulon et al., HESS 2022) : une baisse de deux ou trois ans ne suffit pas, seule, à établir une tendance climatique.

À l'échelle mondiale, les nappes baissent dans 71 % des ~1 700 aquifères étudiés, la baisse s'est accélérée depuis 2000, et 90 % des aquifères en baisse accélérée se trouvent dans des régions devenues plus sèches (Jasechko et al., Nature 2024).

Le mécanisme physique — sols compactés, ruissellement, nappes qui peinent à se recharger — est détaillé dans la note Gestion de l'eau et cycle hydrique V10, avec ses leviers : sols vivants, haies, zones humides, recharge des nappes. La boucle ajoute que le réchauffement l'entretient de lui-même, indépendamment des pratiques agricoles. Le biochar, qui améliore la rétention d'eau des sols, agit précisément sur ce maillon.

4. Étage 3 — La végétation absorbe moins, et parfois rejette

- **Europe, canicule 2003 :** productivité végétale −30 % ; les écosystèmes sont devenus une source nette (~0,5 GtC), effaçant ~4 années de stockage. Dans ces conditions, plus aucun effet « engrais » du CO_2 n'est observé (Ciais et al., Nature 2005).
- **Forêt française :** puits ~63 Mt CO_2/an sur 2005–2013, ~39 Mt sur 2014–2022, sous l'effet conjugué d'une mortalité doublée (7,4 → 15,2 Mm³/an), d'une croissance en recul de 4 % et de prélèvements en hausse de 13 %. Certaines années, la forêt (hors sols) pourrait passer de puits à source (IGN ; IGN-FCBA, Forêt Carbone 2050).
- **Monde, 2023 :** puits terrestre net de 0,44 GtC/an, le plus faible depuis 2003 ; l'absorption au nord de 20° N a été divisée par deux depuis 2015 ; la hausse annuelle du CO_2 atmosphérique a bondi de 86 % par rapport à 2022 (Ke, Ciais et al.).
- **Tendance de fond :** sur 2015–2024, les puits terrestre et océanique sont 25 % et 7 % plus faibles qu'ils ne l'auraient été sans le changement climatique ; 8 % de la hausse du CO_2 depuis 1960 en découle (Global Carbon Budget 2025).

Le puits terrestre varie fortement d'une année à l'autre, notamment avec El Niño, et il s'est en partie rétabli en 2025. La question n'est donc pas une année isolée, mais la fréquence croissante de ces années de rupture, et la mortalité qui s'accumule entre elles.

5. Étage 4 — Les réservoirs lents se mettent en mouvement

Permafrost

Les sols gelés de l'Arctique stockent ~1 500 GtC (note V5.1). L'AR6 estime leur réponse à 3 à 41 GtC par degré de réchauffement d'ici 2100, sans compter le dégel abrupt, ce qui la sous-estime probablement. Le point décisif est ailleurs : la perte continue à température stabilisée. Dans les simulations de Cui et al. (Earth System Dynamics, 2025), le permafrost perd d'ici 2300 ~54 GtC si le réchauffement est stabilisé à 1,5 °C, et ~72 GtC à 2 °C, soit ~200 à ~260 Gt CO_2 : en moyenne de l'ordre de 0,7 à 1 Gt CO_2/an pendant près de trois siècles. Ces pertes sont décrites comme largement irréversibles : un dépassement suivi d'un retour à 1,5 °C conserve 73 à 82 % des pertes d'une stabilisation au niveau du pic.

Tourbières

Les tourbières couvrent 3 à 4 % des terres mais stockent près d'un tiers du carbone des sols. Environ 12 % sont déjà drainées et émettent ~4 % des gaz à effet de serre d'origine humaine ; en Europe, ~46 % sont dégradées, pour ~580 Mt CO_2eq/an (Global Peatlands Assessment, PNUE 2022). Le climat ajoute sa part : 24 % des tourbières européennes étudiées sont plus sèches qu'à aucun moment depuis 2 000 ans (Swindles et al., Nature Geoscience 2019). Une tourbe asséchée laisse entrer l'oxygène et se décompose ; en laboratoire, sécheresse et réchauffement accélèrent cette décomposition, surtout en profondeur (Lu et al. 2025).

Glaciers

Même si la température se stabilisait au niveau actuel (+1,2 °C), ~39 % de la masse des glaciers de 2020 serait perdue à terme ; limiter le réchauffement à 1,5 °C en préserverait au moins 54 %, plus du double d'une trajectoire à +2,7 °C (Zekollari et al., Science 2025). Les glaciers perdent vite pendant des décennies, puis continuent lentement pendant des siècles avant d'atteindre un nouvel équilibre, plus haut en altitude.

6. Pourquoi un plateau de CO_2 n'est pas une stabilité

Dans la note V5.1, l'électrification maximale conduit à un plateau vers ~420 ppm jusqu'en 2200, soit ~+1,75 °C à l'équilibre ; avec des puits dégradés, le CO_2 remonte lentement vers ~441 ppm. Ce plateau est souvent lu comme une stabilisation. Les sections précédentes montrent qu'il ne l'est que pour la concentration.

> ⚠️ **Un plateau de concentration n'est pas un plateau des dégâts**
>
> • Les glaciers continuent de fondre vers un nouvel équilibre : ~39 % de perte déjà engagée à +1,2 °C.
> • Le permafrost continue de libérer son carbone pendant des siècles à température stabilisée : de l'ordre de 0,7 à 1 Gt CO_2/an à 1,5–2 °C.
> • Les tourbières asséchées et les forêts dépérissantes restent des sources tant que les sols ne sont pas réhumidifiés.
> • Les canicules continuent de s'intensifier plus vite que la moyenne, avec leurs effets sur les sols, les forêts et les incendies.
>
> Ces flux supplémentaires doivent être compensés chaque année, sans quoi le plateau devient une lente remontée : c'est exactement la variante « puits dégradés » de la V5.1.

Le scénario d'électrification maximale ne traite donc que la moitié du problème : il arrête l'apport fossile, mais laisse le système au niveau de température qui entretient la dégradation. Seule une baisse de la concentration ramène les compartiments sensibles vers des conditions où leur dégradation ralentit puis s'arrête.

7. Une fenêtre qui se referme : la séquestration dépend elle aussi de la végétation

La boucle ne frappe pas seulement les puits naturels. Elle touche aussi la matière première de la branche séquestration de Programme Résilience. La chaîne biomasse → pyrogazéification → biochar + CO_2 biogénique concentré ne peut retirer que le carbone que les plantes ont d'abord capté par photosynthèse : résidus agricoles et forestiers, fraction solide des digestats, miscanthus. Si la végétation pousse moins, le gisement de séquestration recule avec elle.

Or la sortie complète des fossiles prendra des décennies. Dans la note V5.1, même une réduction de moitié d'ici 2050 laisse le CO_2 monter jusqu'en 2200 (~537 ppm). Pendant toute cette transition, la température continue de monter, la boucle se renforce, et la base végétale dont dépend le retrait s'érode.

- **Croissance forestière déjà en recul :** en France, l'accroissement biologique des forêts est passé de 91,5 à 87,9 Mm^3/an entre 2005–2013 et 2014–2022 (−4 %), pendant que la mortalité doublait (IGN, 2024).
- **Seuil de température de la photosynthèse :** à l'échelle mondiale, l'absorption de carbone par les plantes culmine vers 18 °C pour les plantes en C3 et 28 °C pour les plantes en C4 ; au-delà, la photosynthèse diminue alors que la respiration continue d'augmenter. Moins de 10 % de la biosphère terrestre dépasse aujourd'hui ce seuil ; au rythme actuel des émissions, jusqu'à la moitié pourrait le dépasser vers le milieu du siècle, et le puits terrestre pourrait être divisé par deux en deux décennies (Duffy et al., Science Advances, 2021).
- **Années de rupture :** lors de la canicule de 2003, la productivité végétale européenne a chuté de 30 % : ce sont aussi les années où récoltes, résidus et biomasse disponible s'effondrent.

> ⚠️ **Un effet en deux temps**
>
> **À court terme,** la boucle augmente la biomasse disponible : bois mort, forêts dépérissantes, biomasse post-incendie. C'est le gisement que la note Gestion de l'eau et cycle hydrique V10 (§6bis) identifie, et il faut le valoriser.
>
> **À long terme,** elle érode la base productive : moins de croissance, plus de mortalité, des sols plus secs. Un gisement de dépérissement se consomme une fois ; il ne se renouvelle pas.
>
> **Des marges existent, sans garantie :** le miscanthus est une plante en C4, dont l'optimum de température est plus élevé, et le biochar améliore la rétention d'eau des sols. Elles ralentissent l'érosion du gisement ; elles ne la suppriment pas.

⚠️ **Plus on attend, moins on peut retirer**

Le potentiel de retrait n'est pas un stock fixe qui attend d'être exploité : il dépend de la santé de la végétation, que la boucle dégrade. Attendre la fin des fossiles pour déployer la séquestration, c'est la déployer au moment où sa ressource aura diminué.

La séquestration doit donc être construite en parallèle de la décarbonation, et non après : c'est pendant les décennies de sortie des fossiles que la végétation peut encore fournir la biomasse nécessaire.

8. Impact chiffré des boucles sur les trajectoires de la V5.1

Les trajectoires de la V5.1 intègrent le permafrost et un stress-test « incendies aggravés » fixe, identique dans tous les scénarios. Elles n'intègrent pas l'affaiblissement des puits naturels à mesure que la température monte, ni l'érosion de la ressource végétale de la séquestration. Pour en mesurer l'effet, le modèle paramétrique de la V5.1 a été reconstruit selon la même méthode, puis complété par ces boucles.

⚠️ **Méthode et hypothèses**

Modèle : réponse impulsionnelle du cycle du carbone (Joos et al., 2013) calée sur les concentrations mesurées, ECS = 3 °C, décalage thermique de 20 ans, permafrost modulé par la température, séquestration naturelle durable ~0,4 Gt/an — comme dans la V5.1. La reconstruction retrouve les valeurs publiées de la V5.1 à ±10 ppm près ; les résultats sont donc exprimés en écarts, appliqués aux valeurs publiées.

Pas de double comptage : les boucles « température » (réflectivité de la neige et de la glace, vapeur d'eau) sont déjà incluses dans la sensibilité climatique de 3 °C, et leurs effets régionaux (canicules, Alpes) ne se lisent pas dans une moyenne mondiale. Seules les boucles « carbone » sont ajoutées.

Boucles ajoutées, au-delà du réchauffement de 2025 (~1,3 °C) déjà présent dans le calage : puits terrestre −20 % par °C (fourchette 10–30 %), puits océanique −5,5 % par °C (3–8 %), ressource végétale de la séquestration Résilience −10 % par °C (5–20 %). Ordres de grandeur tirés du Global Carbon Budget 2025 (−25 % et −7 % déjà mesurés) et de l'IGN ; le dernier coefficient est le moins étayé.

Prudence : si la température redescend, aucun rétablissement des puits n'est compté. Les tourbières et le dégel abrupt du permafrost ne sont pas inclus, faute de valeur robuste par degré : l'effet réel est plutôt sous-estimé. Au-delà de 2100, les valeurs sont des ordres de grandeur.

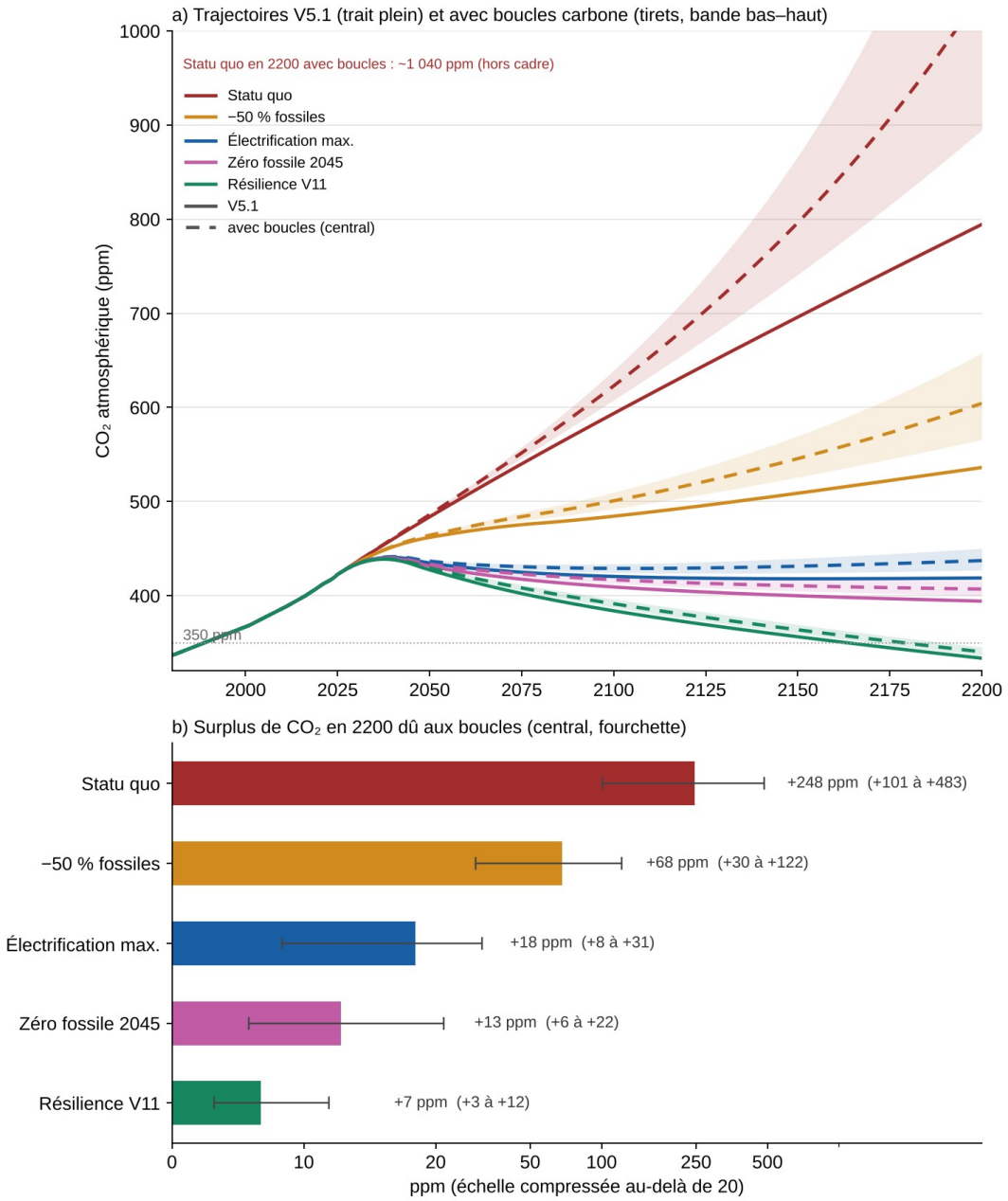


Figure — a) CO_2 atmosphérique 1980–2200 : trajectoires V5.1 (trait plein) et avec boucles carbone (tirets : hypothèse centrale ; bande : hypothèses basse à haute). b) Surplus de CO_2 en 2200 dû aux boucles, par scénario.

Scénario	CO_2 2100 : V5.1 → avec boucles	CO_2 2200 : V5.1 → avec boucles (fourchette)	Écart de température en 2200
Statu quo	604 → ~633 ppm	788 → ~1 040 ppm (890–1 270)	+0,9 °C (+0,4 à +1,5)
−50 % fossiles	485 → ~501 ppm	537 → ~605 ppm (567–659)	+0,4 °C (+0,2 à +0,7)
Électrification maximale	420 → ~429 ppm	420 → ~438 ppm (428–451)	+0,17 °C (+0,08 à +0,27)
Zéro fossile dès 2045	405 → ~413 ppm	389 → ~402 ppm (395–411)	+0,13 °C (+0,06 à +0,21)
Résilience V11	380 → ~387 ppm	332 → ~339 ppm (335–344)	+0,09 °C (+0,04 à +0,15)

Tableau 2 — Effet des boucles carbone sur les trajectoires publiées de la V5.1 (valeur centrale ; fourchette des hypothèses basse à haute). Résilience V11 : passage sous 350 ppm vers ~2175 au lieu de ~2160 (2167–2186).

✅ **Lecture — ce que montrent les chiffres**

Les boucles pèsent d'autant plus que la température reste haute. En 2200, elles ajoutent ~+7 ppm à Résilience V11 et ~+250 ppm au statu quo : un facteur 35. Résilience est la trajectoire la moins sensible aux boucles, précisément parce qu'elle fait redescendre la température — c'est un argument de robustesse.

Le plateau de l'électrification devient une lente remontée : ~438 ppm en 2200 au lieu de ~420, et la température d'équilibre remonte au lieu de se stabiliser.

Le stress-test « incendies aggravés » de la V5.1 reste valable pour les scénarios ambitieux (~+21 ppm en 2200, du même ordre ou plus pessimiste que les boucles) ; il sous-estime en revanche fortement la dégradation dans le statu quo et le scénario −50 %.

Le temps compte (valeurs du modèle reconstruit) : avec une sortie lente des fossiles (−50 %) et le même effort de séquestration, le CO_2 ne redescend plus (~476 ppm en 2200 sans boucles, ~528 ppm avec) ; les boucles y coûtent ~7 fois plus que dans Résilience V11 (+51 ppm) et font perdre ~93 Gt de retrait, contre ~20 Gt. Un retrait déployé 12 ans plus tard repousse le passage sous 350 ppm d'une dizaine d'années supplémentaires, et au-delà de 2200 dans l'hypothèse haute.

9. Volet température : et si les boucles rapides étaient plus fortes que prévu ?

La note V5.1 s'appuie sur la sensibilité climatique retenue par le GIEC (3 °C par doublement du CO_2, fourchette probable 2,5–4 °C) : elle reste la référence. Les boucles rapides — réflectivité de la neige, de la glace et des nuages, vapeur d'eau, assèchement des sols — sont contenues dans ce chiffre, mais comme une constante. Or ces boucles agissent d'abord sur la température, en quelques années, et seulement ensuite sur le CO_2, par les puits, le permafrost et la végétation. Si elles sont plus fortes que ce que suppose la valeur de 3 °C, la température monte plus vite, puis entraîne le CO_2.

Des signaux qui justifient d'examiner cette hypothèse

- **Arctique :** la perte de réflectivité mesurée est nettement plus forte que ce que prévoyaient les modèles (Pistone et al., PNAS 2014) ; un Arctique libre de glace en été ajouterait ~0,71 W/m² par rapport à 1979 (Pistone et al., GRL 2019). Un premier jour sans banquise pourrait survenir dès les années 2030 (Heuzé & Jahn, Nature Communications 2024).
- **Nuages bas :** en 2023, la réflectivité de la planète a été la plus basse jamais enregistrée, surtout par recul des nuages bas, ce qui explique ~0,2 °C de réchauffement jusque-là inexpliqué (Goessling et al., Science 2024). La cause — variabilité, baisse des aérosols du transport maritime ou rétroaction — n'est pas tranchée.
- **Énergie accumulée :** le déséquilibre énergétique de la Terre a environ doublé entre 2005 et 2019 (NASA/NOAA).
- **Aérosols :** l'arrêt des fossiles supprime aussi l'effet refroidissant des aérosols soufrés, d'où un réchauffement transitoire de 10 à 40 ans (note « Pourquoi la nature seule ne suffira pas » V2.1). Cet effet n'est pas modélisé ici ; il s'ajouterait au volet température.
- **Répartition du réchauffement :** les régions qui amplifient le réchauffement (océan Austral, Pacifique est) se sont jusqu'ici peu réchauffées ; leur rattrapage attendu rendrait la sensibilité future plus élevée que celle déduite du passé (Armour et al., PNAS 2024).

⚠️ **Méthode — trois hypothèses de sensibilité**

H0 — référence GIEC (V5.1) : sensibilité constante de 3 °C.
H1 — boucles rapides renforcées : au-delà du réchauffement actuel (~1,3 °C), la sensibilité effective augmente de 0,5 °C par degré supplémentaire, jusqu'à 3,5 °C.
H2 — boucles rapides fortes : même principe, +1 °C par degré, jusqu'à 4 °C, la borne haute de la fourchette probable du GIEC.

Le réchauffement observé aujourd'hui (~1,3 °C) est conservé dans les trois cas : seule la suite diffère. Au pic de la trajectoire Résilience, H1 et H2 équivalent à un forçage supplémentaire d'environ 0,3 et 0,6 W/m² — pour H2, l'ordre de grandeur d'un Arctique libre de glace en été. Les boucles carbone de la section 8 (hypothèse centrale) sont incluses : une température plus haute affaiblit davantage les puits, accélère le permafrost et réduit la biomasse de la séquestration. Ce sont des tests de résistance, pas des prévisions.

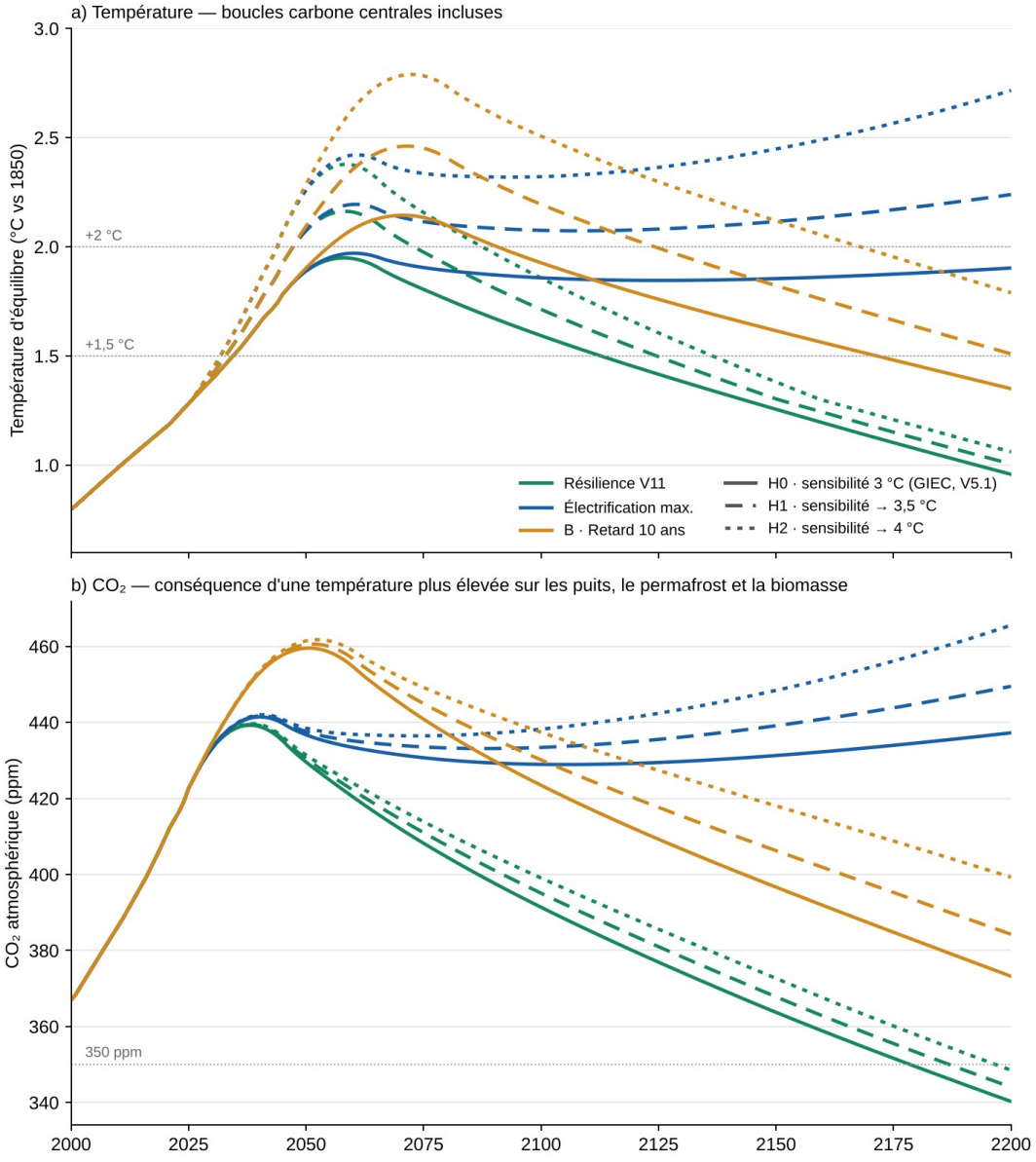


Figure — Effet de boucles rapides renforcées sur la température d'équilibre (a) puis sur le CO_2 (b), pour Résilience V11, l'électrification maximale et le scénario « 10 ans de retard » (80 % des fossiles en 2036, zéro fossile en 2060, retrait dès 2038). Trait plein : H0 (GIEC) ; tirets : H1 ; pointillés : H2.

Scénario	Indicateur	H0 · 3 °C	H1 · → 3,5 °C	H2 · → 4 °C
Résilience V11	Pic de température	~1,95 °C	~2,15 °C	~2,4 °C
	CO_2 en 2200	~340 ppm	~344 ppm (352)	~349 ppm (362)
	Passage sous 350 ppm	vers ~2180	vers ~2185	vers ~2195
	Permafrost d'ici 2100	~82 Gt CO_2	~98 Gt	~115 Gt
	Retrait perdu (biomasse)	~20 Gt	~27 Gt	~37 Gt (92)
Électrification max.	Température en 2200	~1,9 °C	~2,25 °C, en hausse	~2,7 °C, en hausse
	CO_2 en 2200	~437 ppm	~449 ppm (473)	~466 ppm (507)
Zéro fossile 2045	Pic de température	~1,95 °C	~2,2 °C	~2,4 °C
	CO_2 en 2200	~407 ppm	~415 ppm (430)	~426 ppm (452)
10 ans de retard	Pic de température	~2,15 °C	~2,45 °C	~2,8 °C
	CO_2 en 2200	~373 ppm	~384 ppm (411)	~399 ppm (452)
	Retrait perdu (biomasse)	~39 Gt	~60 Gt	~85 Gt (233)

Tableau 3 — Valeurs du modèle reconstruit, boucles carbone centrales incluses ; entre parenthèses, boucles carbone hautes. Températures d'équilibre (décalage de 20 ans). Dans l'hypothèse H1 ou H2 combinée aux boucles hautes, Résilience V11 ne repasse pas sous 350 ppm avant 2200.

✅ **Lecture — ce que change le volet température**

Le premier effet est sur la température, et il est fort. Dans toutes les trajectoires ambitieuses, le pic passe de ~2 °C (H0) à ~2,2–2,4 °C (H1–H2) ; avec 10 ans de retard, il approche ~2,8 °C. Pour la France, où les canicules gagnent 1,5 à 3 °C par degré mondial, +0,4 °C au pic représente de l'ordre de +0,6 à +1,2 °C sur les épisodes de chaleur extrême.

Le second effet arrive par le CO_2, plus tard : permafrost jusqu'à +40 % d'ici 2100, puits plus affaiblis, biomasse de séquestration réduite. Les écarts de CO_2 restent modestes vers 2100 et se creusent au XXII^{e} siècle — c'est exactement la séquence « température d'abord, CO_2 ensuite ».

Les trajectoires sans retrait ne se stabilisent plus. Avec H1 ou H2, l'électrification maximale et le zéro fossile voient leur température remonter après 2100, avec le CO_2 : le plateau disparaît.

Résilience V11 reste la seule trajectoire qui redescend dans tous les cas, mais elle perd sa marge : le passage sous 350 ppm glisse vers la fin du siècle prochain, ou au-delà de 2200 si boucles rapides et boucles carbone sont toutes deux fortes. Le dimensionnement de ~6 Gt/an n'a donc pas de réserve face à ces boucles : il faudrait soit plus de capacité, soit un démarrage plus précoce.

Le statu quo sort du domaine de validité du modèle : avec H2, ~+4,2 °C dès 2100 et plus de 1 300 ppm en 2200 ; ces valeurs ne sont qu'une indication de tendance.

10. Conséquence : retirer le CO_2, et plus tôt

La note V5.1 souligne que le temps n'est pas neutre. La boucle en donne deux raisons physiques. D'abord, chaque décennie passée au niveau actuel engage des pertes que l'on ne récupère pas à l'échelle humaine : glace des glaciers, carbone du permafrost et des tourbières. Ensuite, chaque décennie de retard réduit la végétation dont dépend le retrait lui-même. Une tonne retirée tôt évite donc non seulement son propre effet, mais aussi une partie des pertes qu'elle aurait entretenues, et elle est retirée pendant que la ressource existe encore.

✅ **Ce que Programme Résilience apporte face à la boucle**

Un retrait que la boucle ne peut pas défaire. Le biochar stable (H/C < 0,4) et le CO_2 biogénique concentré stocké en géologie ne repartent pas vers l'atmosphère avec une sécheresse ou un incendie, contrairement au carbone des forêts et des sols.

Une matière première que la boucle produit elle-même. Bois mort, forêts dépérissantes et biomasse post-incendie, qui sinon pourrissent ou brûlent, deviennent bio-CH_4 et biochar par pyrogazéification ; on réduit au passage le combustible des incendies (note Gestion de l'eau et cycle hydrique V10, §6bis).

Un maillon cassé directement. Le biochar améliore la rétention d'eau des sols (+10 à +30 %), là où la boucle sols secs–chaleur s'amorce.

Un complément de la nature, pas un substitut. La nature reste le levier le plus puissant pour faire redescendre le CO_2, mais elle est fragilisée par la boucle. Le retrait durable sert aussi à lui redonner les conditions de se rétablir.

▶️ Synthèse pour décideurs

Cinq conclusions :

— 1 · La boucle est engagée et mesurée. Neige et glace reculent, les sols s'assèchent, la végétation absorbe moins, permafrost et tourbières commencent à libérer leur carbone : chaque étage aggrave le suivant.

— 2 · Stabiliser ne suffit pas. Arrêter les fossiles stabilise à peu près la température, mais au niveau actuel les réservoirs lents continuent de se dégrader pendant des siècles. Le plateau de l'électrification seule est un plateau de concentration, pas un plateau des dégâts. Chiffrées avec le modèle de la V5.1, les boucles ajoutent en 2200 ~+7 ppm à Résilience, ~+18 ppm à l'électrification seule et ~+250 ppm au statu quo.

— 3 · La température peut aller plus vite que le CO_2. Si les boucles rapides (glace, nuages, sols) sont plus fortes que la valeur de référence du GIEC, le pic de réchauffement des trajectoires ambitieuses passe de ~2 °C à ~2,2–2,4 °C, puis le CO_2 suit par les puits, le permafrost et la biomasse. Résilience reste la seule trajectoire qui redescend, mais sans marge : le retrait doit être dimensionné avec une réserve.

— 4 · La fenêtre se referme. La sortie des fossiles prendra des décennies, pendant lesquelles la boucle réduit aussi la végétation dont dépend la séquestration. Plus on attend, moins on peut retirer.

— 5 · Il faut faire redescendre le CO_2, et tôt. Le retrait durable, insensible aux sécheresses et aux incendies, est ce qui coupe la boucle. Il doit être construit en parallèle de la décarbonation, et non après : chaque décennie gagnée réduit des pertes irréversibles et préserve la ressource.

Site complet : https://resilience2045.fr

Sources : GIEC AR6 WG1 (2021) · Global Carbon Budget 2025 (Friedlingstein et al.) · Ke, Ciais et al., puits terrestre 2023 · Ciais et al., Nature 437 (2005) · IGN, inventaire forestier 2024 ; IGN-FCBA, Forêt Carbone 2050 · PIOMAS (Univ. Washington) · Pulliainen et al., Nature 581 (2020) · GlaMBIE, Nature (2025) · IMBIE, Otosaka et al., ESSD 15 (2023) · Hakuba et al., Surv. Geophys. (2024) · Pistone et al., PNAS 111 (2014) · Aulicino et al. (albédo arctique 1982–2015) · Castellanos et al., Earth Syst. Dynam. 17 (2026) · MeteoSuisse / NCCS · Vogel et al., GRL 44 (2017) · KIT, étés européens 2018–2022 · Trigo et al., EGU 2020 · Cui et al., Earth Syst. Dynam. 16 (2025) · Woodwell Climate, revue AR6 permafrost · PNUE, Global Peatlands Assessment (2022) · Swindles et al., Nature Geoscience (2019) · Lu et al., Plants (2025) · Zekollari et al., Science (2025) · Palazzo Corner et al., Frontiers in Science (2023) · Duffy et al., Science Advances (2021) · Gimbel et al., HESS (2016) · Fowler et al., Nat. Rev. Earth Environ. (2021) · Explore2, ministère de la Transition écologique (2024) · Explore 2070, BRGM · BRGM, bulletins de situation des nappes (2023–2026) · Baulon et al., HESS (2022) · Jasechko et al., Nature (2024) · Pistone et al., GRL (2019) · Heuzé & Jahn, Nature Communications (2024) · Goessling et al., Science (2024) · Armour et al., PNAS (2024) · NASA/NOAA, déséquilibre énergétique (2021).