

SEQUESTRATION DU CO2 ATMOSPHERIQUE

Forêt naturelle laissée libre vs Biochar / Pyrolyse

Synthèse comparative et estimations quantitatives - Programme Resilience V11

1. Le cycle naturel du carbone forestier

1.1 Observation du monde réel

Tout propriétaire de jardin peut constater qu'un tronc de plusieurs centaines de kilogrammes laisse au sol finit par ne représenter que quelques kilogrammes de résidus après quelques années. De même, les branches broyées disparaissent progressivement sans accumulation significative de matière. Cette observation illustre le fait que l'essentiel du carbone contenu dans la biomasse retourne naturellement vers l'atmosphère lors de la décomposition. La question n'est donc pas de savoir si cette restitution existe, mais quelle fraction peut être interceptée et stabilisée durablement.

1.2 Bilan carbone de la décomposition

La matière ligneuse se décompose selon la répartition suivante :

- ~50 % du carbone : remis directement en CO₂ par respiration bactérienne et fongique
- ~45 % du carbone : remis en CO₂ et eau via métabolisme des décomposeurs
- ~1 à 5 % seulement : incorporé en humus stable (humines, acides humiques, charbon naturel)

Le bilan net d'une forêt en équilibre dynamique est proche de zéro sur le long terme. Les forêts mondiales stockent environ 861 Gt de carbone dans la biomasse vivante et absorbent net environ 2,6 Gt C/an (~9,5 Gt CO₂/an), soit environ 25 % des émissions humaines annuelles. Ce stock est cependant fragile et réversible.

1.3 Le rôle peu connu du méthane

Lorsque des résidus végétaux se décomposent en milieu peu oxygéné (fosses, tas de déchets humides, marais artificiels, décharges), une fraction du carbone n'est pas remise sous forme de CO₂ mais sous forme de méthane (CH₄). Or le méthane est un gaz à effet de serre dont le pouvoir réchauffant est 28 fois supérieur à celui du CO₂ sur 100 ans. En transformant ces résidus en biochar plutôt qu'en les laissant fermenter, on évite également ces émissions de méthane, ce qui renforce considérablement le bilan climatique positif du système.

1.4 La vulnérabilité croissante des forêts

La thèse écologiste du 'laisser faire' suppose une stabilité qui n'existe plus :

- Brésil (Amazonie) : 10 000 à 15 000 km² défrichés par an malgré les annonces politiques - pression structurelle soja/élevage/orpaillage
- Canada : les incendies de 2023 ont consommé 18 millions d'hectares, transformant le pays en émetteur net de CO₂ pour toute l'année. Un stock centenaire restitué en quelques semaines.

- Indonésie, Congo, Sibérie : même dynamique à des rythmes différents

Avec 10 milliards d'habitants sous pression alimentaire et énergétique croissante, la surface dédiée à des forêts anciennes non gérées ne peut qu'être limitée et constamment menacée. L'Europe occidentale n'a quasiment plus de forêt primaire - elle l'a perdue avant l'ère industrielle.

2. La thèse écologiste : "laisser pousser et pourrir"

2.1 Arguments recevables

- Les vieilles forêts non gérées accumulent plus de carbone total (biomasse vivante + bois mort + sol) que les forêts gérées
- La perturbation humaine interrompt des cycles d'accumulation multi-séculaires
- Les sols forestiers anciens contiennent des stocks d'humus profond issus de millénaires de décomposition lente (Luyssaert et al., Nature 2008)
- À l'échelle séculaire, dans un monde stable et sans pression démographique, cette thèse est partiellement défendable

2.2 Limites fondamentales

- Cycle neutre, pas négatif : la forêt en équilibre ne **REDUIT** pas le CO₂ atmosphérique, elle le stabilise localement
 - Séquestration réversible : incendies, scolytes, sécheresses peuvent liquider en semaines le stock d'un siècle entier
 - Échelle de temps incompatible avec l'urgence : reconstituer une vieille forêt prend 200 à 500 ans
 - Pression foncière mondiale rend illusoire le scénario 'laisser pousser partout'
 - Posture de pays riches ayant déjà déboisé leurs terres depuis des siècles
 - Stockage difficile à auditer, certifier et garantir sur les marchés carbone
-

3. Le scénario Biochar : interception avant décomposition

3.1 Principe et mécanisme

La pyrolyse du bois en atmosphère pauvre en oxygène transforme environ 30 % du carbone en carbone aromatique stable (biochar). Ce carbone est quasi indecomposable par les micro-organismes : son temps de résidence dans le sol est estimé entre 500 et plusieurs milliers d'années. C'est la seule transformation connue qui court-circuite efficacement le cycle naturel du carbone.

Le concept clé est celui du carbone circulaire : le biochar ne crée pas un nouveau prélèvement sur les ressources naturelles. Il transforme une partie d'un flux de carbone biogénique déjà existant en stockage durable. Il s'agit d'un passage d'un cycle court (quelques années) à un cycle long (plusieurs siècles ou millénaires). Cette formulation répond directement aux objections sur l'exploitation de la biomasse.

3.2 Avantages systemiques

- Sequestration permanente et verifiable : le biochar se pese, s'analyse, se certifie (standard EBC, protocole Puro.earth)
- Aucune competition fonciere : utilise les residus de biomasse deja disponibles (branches, dechets agricoles, taillis, haies)
- Production energetique simultanee : syngas et chaleur recuperables
- Scalable des maintenant, sans attendre des siecles
- Evite les emissions de methane des residus en decomposition anaerobie

3.3 Resilience agricole : le double benefice

Le biochar n'est pas seulement un outil de stockage carbone. Incorpore au sol agricole, il ameliore simultanement :

- La retention d'eau du sol (+15 a 30 % selon les etudes) : resilience accrue aux secheresses
- La disponibilite des nutriments et l'activite biologique microbienne
- Le rendement agricole sur sols degrades ou sableux
- La reduction des besoins en engrais chimiques

Peu de technologies de sequestration peuvent revendiquer simultanement un benefice climatique permanent et un benefice agronomique immediat. C'est l'un des arguments les plus solides du Programme Resilience aupres des agriculteurs comme des financeurs.

Les modalites de deployment concret de ces filieres a l'echelle nationale — choix technologiques, dimensionnement des unites, financement, gouvernance et calendrier — sont detailles dans le Programme Resilience V11 : helion31412.github.io/resilience2045

4. Comparaison avec les autres technologies de captage

Lorsque les decideurs evoquent la sequestration de CO₂, ils entendent generalement parler de quatre grandes approches. Le tableau ci-dessous positionne le biochar dans ce paysage :

Technologie	Cout estime (EUR/t CO ₂)	Disponibilite	Co-benefices	Permanence
DAC (captage direct de l'air)	300 - 1000	Limitee, energie-intensive	Aucun	Elevee si stockage geologique
BECCS (biomasse + CCS)	100 - 250	Partielle, complexe	Faibles	Elevee si injection geologique
Biochar	30 - 150	ImmEDIATE et scalable	Agronomie, eau, sol	Tres elevee (siecles)
Reforestation simple	5 - 50	ImmEDIATE mais lente	Biodiversite	Faible (reversible)

Le message n'est pas que le biochar remplace tout - chaque approche a son domaine de pertinence. Mais parmi les solutions de sequestration durable actuellement disponibles et deployables, le biochar est l'une des plus accessibles, des moins couteuses et la seule qui ameliore simultanement la fertilite des sols.

5. Estimations quantitatives comparees

5.1 Sequestration par hectare et par an

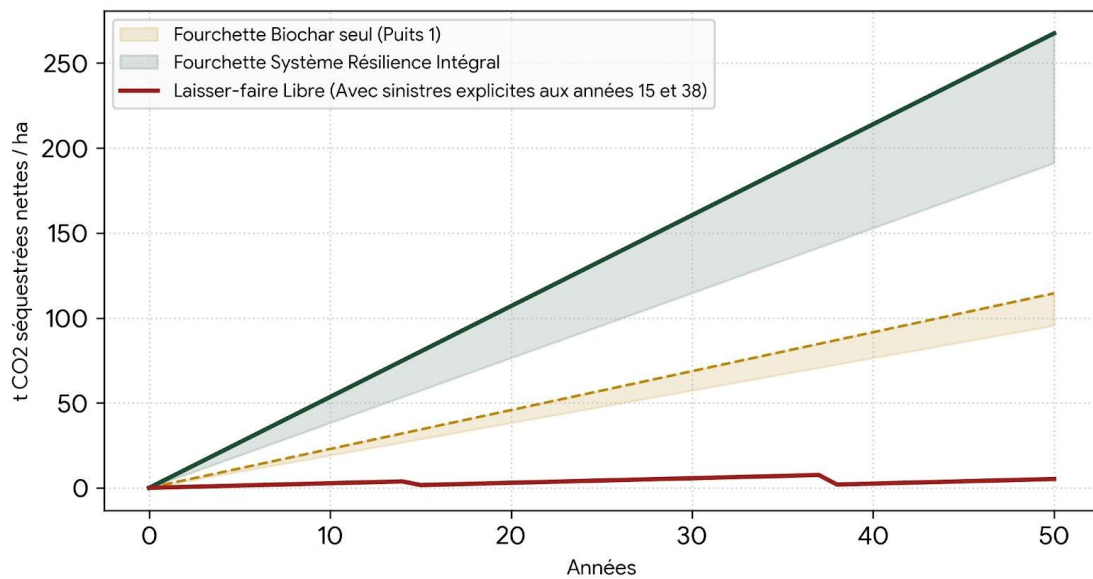
Estimations de sequestration nette par hectare et par an, ordres de grandeur :

Scenarior	Seq. nette CO2/ha/an	Permanence	Risque reversibilite	Horizon
Foret ancienne libre (ideal)	0 a +2 t CO2	Faible	Eleve	Siecles
Foret ancienne libre (realiste 2020-2030)	0 a -5 t CO2	Tres faible	Tres eleve	Incertain
Foret geree + bois construction	1 a 3 t CO2	Moyenne	Modere	Decennies
Biochar issu de biomasse residuelle	2 a 5 t CO2	Tres elevee	Quasi nul	Immediat
Biochar + foret geree (combinaison optimale)	3 a 7 t CO2	Elevee	Faible	Immediat

Note : la valeur negative du scenarior foret libre realiste reflète les episodes d'incendies majeurs (Canada 2023) qui ont transforme un puits en source massive de CO2 sur une seule annee.

Figure 1 — Simulation comparative sur 50 ans (Programme Résilience V11)

Séquestration nette cumulée sur 50 ans : Analyse d'incertitude (t CO₂/ha)



Hypothèses de la simulation : Biomasse résiduelle de référence : 5 t MS/ha/an. Rendement pyrolyse : 30 % massique (fourchette ± 20 %). Puits 2 (CO₂ biogénique capturé) : 40 % additionnel (fourchette ± 20 %). Sinistres simulés : perte de 80 % du stock accumulé aux années 15 et 38 (reproduisant la vulnérabilité observée Canada 2023, Amazonie). Courbe rouge : scénario Laisser-faire libre avec sinistres explicites. Bande dorée : fourchette Biochar seul (Puits 1). Bande verte : Système Résilience intégral (Puits 1 + Puits 2).

Source : modèle de simulation Programme Résilience V11 — helion31412.github.io/resilience2045

5.2 Potentiel global du biochar

Selon les estimations de l'IPCC (AR6, 2022), le biochar présente un potentiel de séquestration global de 0,5 à 2 Gt CO₂/an à l'horizon 2050, selon les politiques de mobilisation de la biomasse résiduelle. Ce chiffre représente 1 à 5 % des émissions humaines annuelles - une contribution significative et surtout permanente.

5.3 Calcul concret à l'échelle de la France

Les ordres de grandeur mondiaux restent abstraits. À l'échelle nationale, le raisonnement devient opérationnel :

Si la France parvenait à produire 10 Mt de biochar par an (contenant environ 80 % de carbone stable), cela représenterait environ 29 Mt de CO₂ durablement retirés du cycle atmosphérique chaque année. Pour référence, les émissions totales de la France sont d'environ 400 Mt CO₂eq/an. Le biochar à l'échelle nationale pourrait donc contribuer à hauteur de 7 à 8 % de la neutralité carbone visée, sans mobiliser une seule surface agricole supplémentaire.

6. Le carbone biogénique concentré : ressource stratégique

6.1 L'avantage décisif sur le DAC

La plupart des scenarios de neutralite carbone supposent un recours massif au captage direct de l'air (DAC). Le probleme fondamental du DAC est la dilution extreme du CO2 atmospherique :

L'atmosphere contient environ 430 ppm de CO2, soit 0,043 %. Pour recuperer 1 tonne de CO2, il faut traiter des millions de metres cubes d'air. C'est la raison pour laquelle les systemes DAC sont energivores, couteux et industriellement complexes.

Le Programme Resilience suit une logique radicalement differente. La biomasse a deja realise gratuitement le travail le plus difficile : capter le CO2 de l'air par photosynthese et concentrer le carbone dans la matiere vegetale. Lors de la methanisation, de la gazification ou de certaines etapes de valorisation energetique, on obtient un flux de CO2 biogenique relativement concentre - plusieurs dizaines de pourcents, voire du CO2 quasi pur apres epuration.

L'ecart energetique entre ces deux approches est colossal. La biomasse offre un CO2 deja capture et concentre. Le DAC doit l'extraire d'un melange gazeux a 0,043 %.

6.2 Le CO2 biogenique concentre comme matiere premiere

Dans une economie post-fossile, les sources industrielles habituelles de CO2 concentre vont disparaitre : gaz naturel, raffineries, cimenteries, usines d'engrais. Or de nombreux secteurs auront toujours besoin de CO2 concentre :

- Serres agricoles (stimulation de la croissance)
- Industries alimentaires et boissons
- Methanation de type Sabatier (production d'hydrogene et carburants de synthese)
- Chimie du carbone et materiaux
- Fabrication de carburants synthetiques (e-fuels)

Le carbone biogenique concentre produit par le Programme Resilience devient alors une matiere premiere renouvelable et strategique, qui peut etre valorisee industriellement ou oriente vers une sequestration permanente.

6.3 Deux puits carbone distincts

Le Programme Resilience genere potentiellement deux flux de sequestration complementaires :

Puits	Forme du carbone	Mode de stockage	Permanence
Puits 1 : Biochar	Carbone solide aromatique	Incorporation au sol agricole	500 a 5000 ans
Puits 2 : CO2 biogenique concentre	Gaz concentre (>50% CO2)	Mineralisation, injection geologique, utilisation industrielle	Millenaires (si stockage geo)

Exemple de mineralisation : $CO_2 + CaO \rightarrow CaCO_3$ (carbonate de calcium), un stockage potentiellement geologique et irreversible. Cette reaction simple transforme le CO2 gazeux en mineral solide stable.

C'est un renversement complet de la logique habituelle : le DAC cherche à récupérer du CO₂ très dilué dans l'atmosphère. La biomasse l'a déjà capté et concentré gratuitement grâce à la photosynthèse. Le Programme Résilience exploite cet avantage thermodynamique fondamental.

7. Conclusion : complémentarité et non concurrence

La forêt capte naturellement le carbone atmosphérique. Le biochar permet de rendre durable une partie de cette captation en empêchant son retour rapide dans l'atmosphère. Les deux approches sont complémentaires et non concurrentes.

La forêt ancienne non gérée conserve toute sa valeur pour la biodiversité et le cycle de l'eau - il ne s'agit pas d'y toucher. Mais la biomasse résiduelle (branches, taillis, déchets agricoles, bois de haies) qui se décompose aujourd'hui sans bénéfice net peut être interceptée et transformée en carbone stable. C'est de la séquestration additionnelle, non concurrente.

Le Programme Résilience répond précisément à cette logique : utiliser les flux de biomasse existants pour produire simultanément de l'énergie renouvelable, du biochar séquestrant, des bénéfices agronomiques et du CO₂ biogénique concentré valorisable - sans déboisement, sans compétition foncière, avec une permanence du stockage que la décomposition naturelle ne peut jamais garantir.

Dans un monde à 10 milliards d'habitants où les combustibles fossiles auront disparu, disposer de flux importants de CO₂ biogénique concentré devient un avantage industriel et climatique majeur. C'est l'un des aspects du Programme Résilience les plus novateurs et les plus insuffisamment reconnus dans les débats publics actuels.

Pour aller plus loin — architecture technique, filières, financement et calendrier de déploiement :

Programme Résilience V11 — helion31412.github.io/resilience2045

La conception technique des filières de valorisation du CO₂ biogénique concentré — méthanation, minéralisation, injection géologique — ainsi que leur intégration dans l'architecture énergétique nationale sont traitées en détail dans le Programme Résilience V11 : helion31412.github.io/resilience2045

*Document élaboré dans le cadre du Programme Résilience V11
helion31412.github.io/resilience2045 | Juin 2026*