

PROGRAMME RÉSILIENCE 2045

Synthèse technique

LE BIOCHAR DANS LES SOLS

Action, qualité, recommandations et exemples reconnus

Version 1.0 — Juin 2026

Synthèse croisée Claude (Anthropic) · Mistral AI · Littérature scientifique

1. Qu'est-ce que le biochar ? — Rappel des définitions clés

Le **biochar** est un charbon végétal obtenu par **pyrolyse** (chauffage de la biomasse en atmosphère appauvrie en oxygène, à des températures généralement supérieures à 400 °C). Il se distingue fondamentalement de la **biotorr** (produit de torréfaction, 200–300 °C) dont le carbone est instable et ne constitue **pas** un puits de carbone.

| Procédé | Température | Produit | Carbone stable | Usage principal |
|------------------------|-------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Torréfaction | 200–300 °C | Biotorr | Non — dégradable | Combustible |
| Pyrolyse basse T | 300–450 °C | Biochar intermédiaire | Partiel | Amendement court terme |
| Pyrolyse haute T ✓ | 450–700 °C | Biochar agronomique | Oui — siècles | Amendement + séquestration |
| Pyrogazéification ✓ | 700–900 °C | Biochar haute stabilité | Oui — millénaires | Séquestration + sol |

Tableau 1 — Classification des procédés thermochimiques et stabilité du carbone produit.

Critère clé de qualité : le ratio H/C organique. Un ratio **H/Corg < 0,4** garantit une structure aromatique condensée, résistante à la dégradation microbienne pendant **des siècles à des millénaires**. La norme EBC (European Biochar Certificate) exige H/Corg < 0,7 pour l'agronomie et < 0,4 pour la certification Carbon Sink.

2. Mécanismes d'action du biochar dans les sols

2.1 Propriétés physiques

- Structure microporeuse : surface spécifique de 100 à 500 m²/g permettant une rétention d'eau de 1,5 à 2,5 fois le poids du biochar.
- Amélioration de la porosité globale du sol → meilleure aération des racines.
- Réduction de la compaction, notamment en sols argileux.
- Stabilisation des agrégats du sol (réduction de l'érosion par ruissellement).

2.2 Propriétés chimiques

- Augmentation de la Capacité d'Échange Cationique (CEC) : rétention accrue des cations nutritifs Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺.
- Correction du pH des sols acides (effet tampon — pH biochar généralement 7–9).
- Réduction de la lixiviation des nitrates et phosphates vers les nappes.
- Adsorption des métaux lourds (Cd, Pb, As) — réduction de leur biodisponibilité.
- Réduction des émissions de N₂O (gaz à effet de serre) jusqu'à 50 % selon les études.

2.3 Propriétés biologiques

- Création d'un habitat protecteur pour les micro-organismes du sol (champignons, bactéries).
- Stimulation des mycorhizes — amélioration de l'absorption des nutriments par les racines.
- Production d'exopolysaccharides microbiens → meilleure structure et rétention d'eau.
- Favorise les bactéries méthanotrophes (consommatrices de CH₄ atmosphérique).

■ **Note** : Ces propriétés sont d'autant plus marquées que le biochar est produit à haute température (≥ 500 °C) et associé à un amendement organique riche en nutriments (digestat, compost). Le biochar seul, sans source de nutriments, peut temporairement immobiliser l'azote en sol fertile.

3. Qualité du biochar selon le procédé : synthèse comparée

La température de pyrolyse détermine l'ensemble des propriétés agronomiques et la durée de séquestration. Le tableau suivant synthétise les données disponibles.

| Critère | Basse T 300–450 °C | Optimale 450–600 °C | Haute T 600– 800 °C | Pyrogazéif. > 700 °C | Terra Preta réf. historique |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| H/Corg (ratio) | > 0,6 labile | 0,4–0,6 | < 0,4 stable | < 0,2 très stable | < 0,2 |
| Durée séquestration (a) | Décennies | Siècles | Siècles à millénaires (b) | Plusieurs millénaires (b) | > 2 000 ans observé |
| Porosité / CEC | Faible | Moyenne | Élevée | Très élevée | Très élevée |
| Nutriments disponibles | Élevés (court terme) | Moyens | Faibles | Très faibles | Initialement faibles |
| Correction pH | Faible | Modérée | Forte | Forte | Forte |
| Certifiable EBC Carbon Sink | Non | Limite | Oui | Oui | N/A |
| Usage recommandé | Sol pauvre court terme | Usage général | Séquestration + CEC | Résilience long terme | Référence |

Tableau 2 — Propriétés comparées du biochar selon la température de production (sources : EBC 2025, Biochar Carbon Code 2025, Lehmann 2007).

(a) *Durées de séquestration* : les estimations reposent sur des modèles de dégradation et des données de terrain partielles. On considère qu'une fraction majoritaire du carbone (70–80 %) est stable sur plusieurs siècles à plusieurs millénaires selon le type de biochar, les conditions pédoclimatiques et la profondeur d'enfouissement. Ces valeurs sont des ordres de grandeur scientifiquement fondés, non des certitudes absolues (IPCC 2019 ; Kuzyakov et al. 2014).

(b) *Hypothèse Programme Résilience* : la contribution de ~29 Mt CO₂ /an de séquestration est un résultat de scénario calculé à partir des flux de biomasse mobilisables en France à horizon 2045. Il s'agit d'une projection du modèle Résilience, distincte des connaissances scientifiques établies sur le biochar en général.

Conclusion clé : le biochar issu de pyrogazéification (filiale Programme Résilience — Novéa, Charwood, LERMAB/Elvéa Energy) présente le **meilleur profil pour la séquestration séculaire**, mais doit impérativement être **activé avant épandage** (pré-chargement en nutriments par immersion dans le digestat ou co-compostage) pour éviter l'effet transitoire d'immobilisation de l'azote en sols fertiles tempérés.

4. Action du biochar selon le type de sol

4.1 Sols tropicaux acides et lessivés (oxisols)

Contexte

Sols très acides (pH 4–5,5), pauvres en matière organique et en nutriments, forte lixiviation des cations. C'est le contexte historique de la Terra Preta — des sols parmi les plus dégradés de la planète, représentatifs d'une situation extrême.

Effets observés

- Correction de l'acidité (remontée du pH de 1 à 2 unités).
- Augmentation de la CEC de 30 à 100 %.
- Gains de rendement de +20 à +100 % — à contextualiser : ces résultats s'observent sur des sols initialement très dégradés ou quasi-improductifs, non sur des sols en agriculture normale.
- Amélioration durable de la fertilité sur des décennies (rémanence élevée).

Exemple reconnu — Terra Preta d'Amazonie

Référence historique absolue. Des parcelles de sols noirs (terra preta) présentent encore aujourd'hui, 2 000 ans après leur constitution, une fertilité exceptionnelle comparée aux oxisols environnants. Le biochar, mélangé à des déchets organiques (os, cendres, résidus de cuisine), a créé un sol à CEC très élevée, teneur en matière organique stable triple de celle des sols témoins. Les rendements en maïs, manioc et légumineuses y sont significativement supérieurs à ceux des oxisols témoins — les facteurs 2 à 3 fréquemment cités dans la littérature s'entendent par rapport à des sols tropicaux dégradés, non par rapport à des sols agricoles gérés. Source : Lehmann et al., *Nature* 2006 ; Glaser & Birk, *Geochimica* 2012.

Exemple moderne — Projet Bio4Africa (Sénégal)

Biochar produit à partir de coques d'arachide et cabosses de cacao (pyrolyse 400–550 °C), épandu à 10 t/ha avec 5 t/ha de lombricompost sur sols sableux et latéritiques. Résultats sur 3 saisons : +20 à +50 % sur mil et arachide, résistance à la sécheresse prolongée de 2 semaines supplémentaires sans pluie. Source : CIRAD 2023.

Préconisations spécifiques

- Dose : 10 à 20 t/ha en application initiale ; 2–5 t/ha en entretien tous les 3–5 ans.
- Toujours associer à une source de nutriments (compost, digestat, fumier).
- Biochar à température modérée (400–600 °C) pour conserver un maximum de nutriments.
- Incorporer à 15–20 cm de profondeur (zone racinaire principale).

4.2 Sols sableux (faible rétention en eau et en nutriments)

Contexte

Texture grossière, drainage rapide, faible CEC, forte sensibilité à la sécheresse estivale. Présents en Europe (Pays-Bas, Espagne, sud de la France), Australie, Afrique sahélienne.

Effets observés

- Augmentation de la capacité de rétention d'eau de +30 à +50 %.
- Réduction des besoins en irrigation de 20 à 50 %.
- Réduction de la lixiviation des nitrates et phosphates.
- Gains de rendement de +10 à +25 % en conditions normales ; +30 % en année sèche.

Exemple reconnu — Essais Pays-Bas / Australie (tomate, salade)

Application de 15 t/ha de biochar (bois, 500–600 °C) incorporé à 15 cm, combiné à une irrigation goutte-à-goutte. Réduction de 40–50 % des besoins en eau, maintien des rendements en tomate

équivalent à une irrigation pleine. Observation : la moitié des biochars migre en profondeur sur 4 ans (Haefele, IRRI) — intérêt de l'incorporation profonde initiale.

Préconisations spécifiques

- Dose : 15 à 20 t/ha en application initiale, incorporé à 15 cm.
- Biochar à haute porosité (pyrolyse 500–700 °C, température optimale CEC).
- Association impérative avec compost ou digestat (le biochar seul est peu nutritif).
- Éviter l'épandage en surface par vent fort (particules légères et fines).
- Envisager des granulés biochar + digestat pour faciliter l'application mécanisée.

4.3 Sols argileux (compacts, mal drainés)

Contexte

Texture fine, tendance à la compaction et à l'asphyxie racinaire en conditions humides, fort risque de battance. Fréquents dans les bassins céréaliers français (Beauce, Brie, Champagne).

Effets observés

- Amélioration du drainage et de l'aération du sol.
- Réduction de la compaction mesurée (résistance à la pénétration réduite de 15–30 %).
- Meilleure réponse aux apports d'azote et de phosphore.
- Gains de rendement de +10 à +15 % sur céréales (blé, orge).

Exemple reconnu — Expérimentation Agrosolutions / Openfield (France, Allemagne)

5 t/ha de biochar (paille, 500–650 °C) + 3 t/ha de fumier composté, incorporés à 10 cm avant semis de blé. Résultats : +12 % de rendement en année sèche, réduction de 30 % des pertes d'azote par lessivage, amélioration visible de la structure à la bêche dès la 2e année. Source : Openfield Project, rapports 2022–2023.

Préconisations spécifiques

- Dose : 5 à 10 t/ha en application initiale, incorporation légère (10 cm).
- Biochar à température modérée (450–550 °C) pour préserver des groupes fonctionnels.
- Éviter les doses excessives (> 15 t/ha) qui peuvent perturber la structure argileuse.
- Ne pas épandre sur sols saturés en eau ou gelés.

4.4 Sols dégradés et pollués (métaux lourds, xénobiotiques)

Contexte

Sols de zones industrielles reconverties, sols maraîchers à longue histoire d'intrants, zones minières, sols contaminés au cadmium (Cd) ou plomb (Pb) en Chine, en Inde et dans certaines régions d'Europe.

Effets observés

- Adsorption et immobilisation des métaux lourds (Cd, Pb, As, Cu, Zn).
- Réduction de la biodisponibilité pour les plantes de 40 à 80 % selon le métal et le sol.
- Reprise possible de cultures sur sols précédemment improductifs.
- Gains de rendement de +15 à +40 % sur riz et légumes en sols contaminés.

Exemple reconnu — Dépollution sols rizicoles (Chine, 2015–2020)

Application de biochar de paille de riz (600–800 °C) à 20 t/ha sur sols contaminés au Cd dans la province du Hunan. Réduction de 55 % de la teneur en Cd dans le grain de riz, reprise de la production commercialisable. Source : Xu et al.,

Environmental Science & Technology, 2016.

Préconisations spécifiques

- Biochar à haute température (600–800 °C) : meilleure surface spécifique pour l'adsorption.
- Analyser les métaux lourds du sol AVANT application (cibler le bon adsorbat).
- Surveiller la migration du biochar vers les nappes (Cornelia Rumpel, INRAE).
- Ne pas confondre immobilisation et élimination : le métal reste dans le sol, lié au biochar.

4.5 Sols tempérés fertiles (limoneux à argilo-limoneux, Europe centrale)

Contexte

Sols à bonne teneur en matière organique, pH proche de la neutralité, bonne CEC naturelle. C'est le contexte le plus courant en France, Allemagne, Canada pour les grandes cultures. L'effet du biochar y est plus mesuré et nécessite une approche ajustée.

Effets observés

- Gains de rendement modérés en conditions normales : +5 à +15 %.
- Effet « assurance sécheresse » très marqué en année sèche : maintien des rendements.
- Réduction des doses d'engrais azotés de 10 à 20 % (amélioration de l'efficacité).
- Risque d'effet négatif à court terme si biochar non activé (immobilisation transitoire de N).

Exemples reconnus

Essais allemands (Openfield, 2019–2023) : 5–10 t/ha de biochar (résidus forestiers, 450–600 °C) associé à 10 m³/ha de digestat sur blé et maïs. Gain moyen : +8 % en année normale, +18 % en année sèche. Réduction de 15 % des apports en engrais minéraux sans perte de rendement. Source : projet Openfield, publications 2022.

Projet Fenix (Europe, CIRAD) : 30 types de biochar testés à partir de 4 flux de déchets verts, associés au digestat de méthanisation. Résultats : amélioration systématique de la résilience face à la sécheresse, réduction des émissions d'ammoniac de 30–50 % lors de l'épandage du digestat. Source : CIRAD 2023.

Préconisations spécifiques

- Dose conservatrice : 5 à 10 t/ha — pas de bénéfice démontré au-delà sur sols fertiles.
- Activation obligatoire : immerger le biochar dans le digestat 24–48 h avant épandage.
- Association biochar + digestat = formule optimale pour ces sols (voir Section 6).
- Analyser le pH avant application : éviter si sol déjà alcalin (pH > 7,5).

5. Biochar et gestion de la sécheresse

La résistance à la sécheresse est l'un des bénéfices les plus régulièrement documentés de l'application de biochar, quel que soit le type de sol, avec une efficacité croissante pour les sols sableux et les contextes méditerranéens.

| Contexte | Culture | Effet mesuré | Protocole | Source |
|----------------------|---------|---|----------------------------------|-------------------------|
| Sénégal, sol sableux | Mil | +30 % rendement en année sèche, +2 sem. tolérance | 10 t/ha biochar + 5 t/ha compost | CIRAD / Bio4Africa 2023 |

| Contexte | Culture | Effet mesuré | Protocole | Source |
|----------------------|-------------------|---|---|--------------------------------------|
| Allemagne, limoneux | Blé | -30 % pertes de rendement en sécheresse | 5 t/ha + digestat 10 m ³ /ha | Openfield 2022 |
| Australie, sableux | Tomate | -50 % besoins irrigation, rendement maintenu | 15 t/ha, incorporation 15 cm | Études locales publiées |
| France, Languedoc | Vigne | Résistance sécheresse estivale, qualité maintenue | 5-8 t/ha localisé | Essais INRAE partenaires |
| Espagne / Californie | Olivier, amandier | -25 % apports eau, production maintenue | 5-10 t/ha en fosse plantation | Publications agronomie méditerranée. |
| Amazonie | Manioc, maïs | +25-30 %, résistance prouvée sur siècles | 10-15 t/ha + déchets organiques | Lehmann et al. 2006 ; Glaser 2012 |

Tableau 3 — Effets du biochar sur la résistance à la sécheresse. Exemples documentés.

Mécanisme central : le biochar agit comme un « **réservoir tampon** » : il absorbe l'eau lors des épisodes pluvieux ou d'irrigation et la restitue progressivement aux racines lors des périodes sèches. L'effet est maximal pour un biochar pyrolysé à **400-600 °C** (pores de taille optimale pour la rétention capillaire). Un biochar trop haute température (> 800 °C) développe des micropores trop fins et perd en efficacité hydrologique.

6. Association Biochar + Digestat : la synergie Programme Résilience

L'association biochar (issu de pyrogazéification) + digestat (issu de la méthanisation agricole) constitue le cœur de la boucle carbone du Programme Résilience. Elle combine les avantages complémentaires des deux produits.

| Biochar (pyrogazéification) | Digestat (méthanisation) | Synergie obtenue |
|--|--|---|
| Carbone stable, séquestration long terme | Nutriments NPK immédiatement disponibles | Fertilité immédiate + permanente |
| Structure microporeuse, CEC élevée | Liquide riche en NH ₄ ⁺ , eau, matière organique fraîche | Le biochar retient les nutriments, réduit le lessivage |
| Effet à très long terme (siècles) | Effet rapide (saison) | Court terme + long terme couverts |
| Neutre en nutriments (risque N-lock) | Richesse en azote organique | Supprime le risque d'immobilisation de N |
| Réduit les émissions GES du sol | Peut émettre NH ₃ et CH ₄ si épandu brut | Le biochar fixe NH ₃ , réduit odeurs et émissions de 30-50 % |

Tableau 4 — Complémentarité biochar / digestat dans la boucle agronomique Résilience.

6.1 Protocole d'application recommandé

- Ratio d'activation : 1 t de biochar pour 2 à 5 m³ de digestat liquide (ou 1:1 en volume pour digestat composté).

- Temps d'imprégnation : 24 à 48 heures minimum avant épandage (« activation » du biochar).
- Méthode : mélange en cuve ou malaxeur, puis épandage à l'épandeur à fumier ou pendillards.
- Incorporation : dans les 24 h, à 10–20 cm de profondeur (limite la volatilisation de NH_3).
- Période : automne (avant cultures d'hiver) ou fin d'hiver / printemps pour cultures de printemps.

6.2 Doses selon le type de sol

| Type de sol | Biochar (t/ha) | Digestat (m ³ /ha liq. ou t/ha composté) | Ratio B/D | Fréquence |
|---------------------|----------------|---|-----------|------------------|
| Pauvres / sableux | 10–15 | 10–20 m ³ liq. ou 5–10 t compost. | 1:1 à 1:2 | Tous les 2–3 ans |
| Modérément fertiles | 5–10 | 5–15 m ³ liq. ou 3–5 t compost. | 1:1 à 1:3 | Tous les 3–5 ans |
| Riches en MO | 2–5 | 5–10 m ³ liq. ou 2–3 t compost. | 1:2 à 1:4 | Tous les 5 ans |

Tableau 5 — Doses recommandées selon le type de sol (Association biochar + digestat).

6.3 Exemples de résultats

-
-
-

7. Recommandations générales et précautions d'emploi

7.1 Règles universelles

- Ne jamais épandre un biochar non activé (brut) sur sols fertiles tempérés sans source de nutriments associée.
- Ne jamais dépasser 20 t/ha en une seule application (risque de déséquilibre N et pH).
- Toujours réaliser une analyse de sol préalable (pH, CEC, teneur en MO, texture).
- Tester sur parcelle pilote (0,5 à 2 ha) avant généralisation à l'exploitation.
- Ne pas épandre sur sols gelés, saturés en eau ou immédiatement avant de fortes pluies.
- Incorporer le digestat dans les 24 h suivant l'épandage pour limiter la volatilisation de NH_3 .

7.2 Précautions liées à la qualité du biochar

- Exiger le certificat EBC (European Biochar Certificate) ou équivalent — garantit la qualité et la sécurité agronomique.
- Vérifier le ratio H/Corg : < 0,7 pour l'agronomie, < 0,4 pour la certification séquestration.
- Éviter les biochars de piètre qualité (torréfaction < 300 °C) vendus sans certification.
- Contrôler la teneur en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) : réglementation EBC < 12 mg/kg.
- Biochar issu de bois non traité : privilégier pour usage maraîcher et cultures alimentaires.

7.3 Précautions environnementales

- Surveiller la migration vers les nappes (INRAE — Cornelia Rumpel) sur sols très perméables.

- Biochar produit sans post-combustion des gaz (fours Kon-Tiki) : émissions de CH₄ et furannes possibles — exiger une post-combustion contrôlée.
- Ne pas exporter les pailles et résidus de récolte vers la pyrolyse si cela prive les sols de leur humus naturel — gérer la disponibilité nette des flux de biomasse.
- Limiter l'application à 1 t/ha/an en Suisse (réglementation en vigueur 2025).

7.4 Points de vigilance réglementaires (France)

- Norme NF U44-051 applicable aux composts et digestats — à vérifier pour les mélanges biochar/digestat.
- Plan d'épandage obligatoire au-delà de 150 kg N/ha/an.
- Règlement UE 2019/1009 sur les engrais organiques — le biochar activé peut y entrer.
- Reconnaissance CRCF (Carbon Removal Certification Framework) — acte délégué du 3 février 2026 : premier cadre réglementaire européen reconnaissant formellement le biochar comme puits de carbone.

8. Synthèse des recommandations par situation

| Situation | Type de biochar | Dose initiale | Association | Effets attendus | Exemple |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Sol tropical acide | Pyrolyse 400–600 °C | 10–20 t/ha | Compost + fumier | +30–100 % rendement, pH corrigé | Terra Preta, Bio4Africa |
| Sol sableux sec | Pyrolyse 500–700 °C | 15–20 t/ha | Compost + digestat | –40 % irrigation, +15–25 % | Pays-Bas, Australie |
| Sol argileux compact | Pyrolyse 450–550 °C | 5–10 t/ha | Fumier composté | +10–15 %, drainage amélioré | Openfield France, Allemagne |
| Sol pollué (métaux) | Pyrolyse 600–800 °C | 15–20 t/ha | Seul ou + compost | –50 % toxicité, reprise cultures | Chine, Hunan (riz) |
| Sol tempéré fertile | Pyrogazéification activé | 5–10 t/ha | Digestat (obligatoire) | +5–15 % (assurance sécheresse) | Openfield, Projet Fenix |
| Zone méditerranéenne | Pyrolyse 500–650 °C | 5–10 t/ha | Compost + irrigation localisée | –25 % eau, qualité maintenue | Languedoc (vigne), Espagne |

Tableau 6 — Recommandations synthétiques par situation pédoclimatique.

9. Valeur économique du biochar dans la chaîne Résilience

L'analyse économique du biochar ne peut pas être conduite en isolant le produit de sa filière de production. C'est l'erreur structurelle des études de marché classiques qui concluent à un coût de production de **300 à 600 €/t** de biochar, rendant la filière difficilement compétitive. Dans le **système intégré Résilience**, le biochar est un co-produit d'une chaîne qui génère simultanément biométhane, chaleur, digestat et crédits carbone — la même logique économique que les raffineries pétrolières, où kérosène, gazole et bitumes se partagent les mêmes investissements.

9.1 Rappel de la chaîne de valeur Résilience

Une tonne de biomasse sèche lignocellulosique (paille, bois résiduel, résidus de cultures) traitée dans la séquence Résilience génère les co-produits suivants :

| Co-produit | Quantité / t biomasse | Prix de marché 2025 | Valeur brute / t biomasse | Filière de valorisation |
|---|-----------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Biométhane | ~0,25 MWh PCS | ~110–130 €/MWh | 27–33 € | Injection réseau / bio-GNV |
| Chaleur fatale | ~0,30 MWh | ~40–60 €/MWh | 12–18 € | Réseau chaleur local / séchage |
| Digestat (fraction) | ~0,15 t MS | ~25–50 €/t | 4–8 € | Épandage agricole / compostage |
| Biochar | ~0,10–0,15 t | voir §9.2 | variable | Sol + crédits carbone |
| Crédit carbone biochar | ~0,30–0,40 tCO ₂ | ~60–150 €/tCO ₂ | 18–60 € | Marché volontaire / CRCF UE |
| CO ₂ biogénique capté | ~0,40 tCO ₂ | ~40–80 €/tCO ₂ (DACCS equiv.) | 16–32 € | Valorisation potentielle future |
| TOTAL VALEUR BRUTE / t de biomasse | | | 77–151 € / t biomasse sèche | |

Tableau 7 — Valorisation des co-produits d'une tonne de biomasse sèche dans la chaîne Résilience (estimations 2025, hors subventions).

9.2 Coût de production du biochar : analyse par allocation

La question n'est pas « combien coûte produire une tonne de biochar ? » mais « **quelle part des coûts communs doit supporter le biochar une fois les autres co-produits rentabilisés ?** » C'est la méthode d'allocation des coûts, standard dans l'industrie chimique et pétrolière.

| Poste de coût | Coût total estimé | Part portée par biochar | Coût alloué biochar |
|--|---------------------------|-----------------------------|---------------------|
| CAPEX unité méthanisation (200 Nm ³ /h) | ~3,5 M€ amorti sur 20 ans | 0 % (produit biométhane) | 0 €/t biochar |
| CAPEX unité pyrogazéification | ~1,5–2,5 M€ amorti 15 ans | 30–50 % (énergie + biochar) | ~45–90 €/t biochar |
| Collecte et préparation biomasse | ~30–50 €/t biomasse | Partagé entre produits | ~10–20 €/t biochar |
| Opération, maintenance, personnel | ~15–25 €/t biomasse | Partagé prorata valeur | ~8–15 €/t biochar |
| Certification EBC + suivi carbone | ~5–10 €/t biochar | 100 % biochar | ~5–10 €/t biochar |
| Transport et épandage | ~15–25 €/t biochar | 100 % biochar | ~15–25 €/t biochar |
| COÛT DE REVIENT TOTAL DU BIOCHAR (système intégré Résilience) | | | ~83–160 €/t |

Tableau 8 — Allocation des coûts de production du biochar dans un système intégré Résilience. À comparer aux 300–600 €/t d'une unité de pyrolyse isolée.

Conclusion : le coût de revient du biochar en système intégré Résilience est estimé à **83–160 €/t**, soit 2 à 4 fois inférieur au prix d'une production isolée de biochar (300–600 €/t). C'est l'avantage structurel décisif de l'approche co-produits.

9.3 Valeur de vente du biochar : trois flux de revenus

| Source de revenu | Valeur unitaire | Base de calcul / t biochar | Remarque |
|--|----------------------------|--|--|
| Vente agronomique (amendement sol) | 100–300 €/t | Marché actuel biochar certifié EBC | Prix observé en France et Europe (2024–2025) |
| Économie d'engrais pour l'agriculteur | ~30–80 €/ha/an | Réduction 15–20 % d'azote minéral | Bénéfice indirect agriculteur, pas revenu direct |
| Économie d'irrigation | ~50–120 €/ha/an | -20 à -40 % eau selon sol | Valeur augmentant avec tarification eau |
| Crédit carbone EBC Carbon Sink | ~60–150 €/tCO ₂ | ~3 tCO ₂ séquestrées / t biochar (74 % sur 100 ans) | Marché volontaire + futur CRCF UE |
| Valeur carbone totale / t biochar | 180–450 €/t biochar | 3 tCO ₂ × 60–150 € | Flux croissant avec prix carbone |
| VALEUR TOTALE POTENTIELLE / t biochar (agronomique + carbone) | | 280–750 €/t biochar | |

Tableau 9 — Sources de revenus du biochar Résilience. La combinaison valeur agronomique + crédit carbone constitue l'argument économique central.

9.4 Marge nette du biochar dans le système Résilience

En rapprochant coûts alloués et revenus potentiels, la marge nette du biochar peut être estimée :

| Scénario | Coût alloué (€/t) | Revenu (€/t) | Marge nette (€/t) |
|--|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Bas : vente agronomique seule, prix carbone bas (60 €/tCO ₂) | 160 | 100 + 180 = 280 | + 120 €/t |
| Central : vente agronomique + crédit carbone 100 €/tCO ₂ | 120 | 200 + 300 = 500 | + 380 €/t |
| Haut : marché carbone mature (150 €/tCO ₂), demande forte | 83 | 300 + 450 = 750 | + 667 €/t |
| Sans crédit carbone (risque réglementaire) | 160 | 150 (agronomie seule) | - 10 €/t (seuil) |

Tableau 10 — Sensibilité de la marge nette du biochar Résilience selon scénario de prix carbone et valorisation agronomique (estimations de modèle Résilience — hypothèses à affiner par France Stratégie / ADEME / CRE).

Note : Lecture importante : dans le scénario sans crédit carbone, la marge du biochar devient marginalement négative si le prix de vente agronomique reste bas. C'est précisément pourquoi la reconnaissance réglementaire du biochar dans le CRCF européen (acte délégué du 3 février 2026) est un verrou clé du modèle économique Résilience.

9.5 Valeur marginale du biochar dans la chaîne Résilience

La question posée par ChatGPT — « *quelle est la valeur économique marginale du biochar dans un système intégré, après allocation des coûts entre tous les co-produits ?* » — trouve ici une réponse structurée.

Dans le scénario central Résilience, le biochar contribue à hauteur d'environ **15–25 % de la valeur totale générée par tonne de biomasse**, aux côtés du biométhane (~45 %), de la chaleur (~15 %), du digestat (~5 %) et des crédits carbone CO₂ biogénique (~10–15 %). Ce n'est pas le produit dominant, mais c'est le **seul co-produit à valeur croissante dans le temps** : plus le marché carbone monte, plus le biochar prend de valeur — à coût alloué constant.

Analogie industrielle : dans une raffinerie de pétrole, le bitume et les huiles lourdes sont longtemps restés des sous-produits à faible valeur avant de devenir des marchés à part entière. Le biochar suit une trajectoire analogue : co-produit aujourd'hui, actif stratégique demain si le CRCF UE monte en puissance.

9.6 Ce qu'il reste à modéliser (recommandation pour France Stratégie / ADEME / CRE)

Les chiffres ci-dessus constituent des ordres de grandeur fondés sur des données disponibles. Une modélisation indépendante devrait préciser :

- L'allocation précise des CAPEX et OPEX entre co-produits selon la méthodologie de comptabilité analytique retenue (valeur marchande, contenu en énergie, masse ou allocation physique).
- La courbe de montée en puissance de la filière (2025–2035–2045) et son impact sur le coût marginal.
- La sensibilité au prix du carbone : à partir de quel prix le biochar devient-il le co-produit le plus rentable de la chaîne ?
- L'impact de l'article R.446-105 (exclusion de la pyrogazéification du CPB biogaz) sur l'équilibre économique global, et le gain net de sa révision.
- La valeur agronomique capitalisée sur 20 ans (économies d'engrais + eau + rendements) pour 1 tonne de biochar épandue sur les sols tempérés français.

10. Conclusion — Place du biochar dans Programme Résilience

Le biochar issu de la filière pyrogazéification du Programme Résilience (Novéa Énergie, Charwood Innovation, LERMAB/Elvéa Énergie) présente le **profil optimal pour la séquestration carbone à long terme** (H/Corg < 0,2, fraction majoritaire du carbone estimée stable sur plusieurs siècles à plusieurs millénaires selon les conditions pédoclimatiques). Son intégration dans la **boucle territoriale carbone** — méthanisation → pyrogazéification → biochar activé → sols → cultures → biomasse — constitue une **réponse systémique** aux enjeux de fertilité, de résilience hydrique et de séquestration, combinant efficacité agronomique immédiate (via le digestat) et permanence climatique (via le biochar).

La contribution de **~29 Mt CO₂ /an de séquestration nette** est une projection du **scénario Programme Résilience 2045**, calculée à partir des flux de biomasse mobilisables en France. Elle s'appuie sur des données scientifiques établies (stabilité du carbone aromatique, rendement en biochar par tonne de biomasse, surfaces agricoles disponibles) mais constitue une hypothèse de modèle, distincte de mesures terrain. C'est la distinction entre biochar de pyrogazéification et produits de torréfaction ou de basse pyrolyse — absente de la plupart des communications généralistes — qui fonde la robustesse de cette hypothèse face aux examinateurs scientifiques et institutionnels.

■ **Note** : *La reconnaissance réglementaire du biochar comme puits de carbone dans le CRCF européen (acte délégué du 3 février 2026) ouvre la voie à sa valorisation dans les marchés volontaires du carbone et les dispositifs contractuels européens — un levier de financement complémentaire pour les agriculteurs adoptant la filière Résilience.*

Principales références scientifiques et réglementaires

- Lehmann J. et al. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*.
- Glaser B. & Birk J.J. (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- European Biochar Certificate (EBC), version 10.5, août 2025 — www.european-biochar.org
- EBC Carbon Sink Certification, version 2.1 — european-biochar.org
- Biochar Carbon Code (BCC), janvier 2025 — capchar.com
- Xu Y. et al. (2016). Immobilization of heavy metals in contaminated soils by biochar. *Environmental Science & Technology*.
- CIRAD (2023). Projet Fenix — Association biochar/digestat, résultats agronomiques.
- CIRAD / Bio4Africa (2023). Utilisation du biochar en Afrique subsaharienne.
- Openfield Project (2022–2023). Biochar application in temperate European soils.
- Règlement UE 2019/1009 relatif aux produits fertilisants de l'Union européenne.
- Acte délégué CRCF (Carbon Removal Certification Framework), 3 février 2026 — première reconnaissance réglementaire européenne du biochar comme puits de carbone.
- Rumpel C. (INRAE) — Travaux sur la migration du biochar dans les sols et vers les nappes.