

Enjeux et potentiels du développement de la filière biochar en France

Rédigée par le « Groupe de Travail BIOCHAR » du Club Pyrogazéification de l'ATEE, cette note vise à apporter des éléments d'informations et présente les attentes des acteurs de la filière concernant le soutien à la production et l'usage de biochar obtenu par les technologies de conversion thermique (pyrolyse notamment) appliquées à des biomasses d'origine agricole, agro-alimentaire et/ou connexes de l'utilisation ou de la transformation de la biomasse forestière.

Résumé exécutif

Dans le contexte des accords de Paris (COP21), la production de biochars¹ présente un potentiel de séquestration du carbone atmosphérique durable, permanent et utile pour plusieurs secteurs économiques. En complément des objectifs de réduction des gaz à effet de serre (GES), le développement industriel de solutions de séquestration efficaces et massives est une contribution incontournable à l'atténuation au changement climatique. Le GIEC² estime ainsi que le biochar offre un potentiel d'atténuation à l'échelle mondiale compris entre 0,3 à 6,6 gigatonnes de CO₂ eq. par an.

Les biochars dont il est question dans cette note représentent la fraction solide produite par les procédés de pyrolyse majoritairement et dans certains cas par gazéification (température >400°C en absence ou défaut d'oxygène). Ces biochars peuvent être obtenus à partir de biomasses non-alimentaires d'origine agricole, agro-alimentaire et/ou connexes de l'utilisation ou de la transformation de la biomasse forestière.

Dans le cadre du projet Européen Biochar Certificate (EBC)³, l'Ithaka Institute a formalisé une liste des biomasses pouvant être utilisées pour la fabrication de biochars certifiables.

Selon leurs propriétés, ces biochars sont utilisés dans de nombreux secteurs tels que l'alimentation animale, l'agriculture, les sols urbains, les matériaux de construction, l'épuration d'effluents, l'optimisation de procédés biologiques complexes (compostage, digestion), ...

La filière de production de biochars pour la séquestration du carbone atmosphérique est considérée mature sur le plan industriel. L'European Biochar Industry Consortium (EBI)⁴ recense 171 unités en fonctionnement en Europe, principalement en Scandinavie, Allemagne, Autriche et Suisse. Les projets en cours porteront à 220 unités le parc d'unités fin 2024 pour une capacité installée de 115kt/an de biochar.

Les biochars répondent également à des standards de certification déjà existants ainsi qu'au nouveau **Cadre de certification européenne de l'élimination du CO₂** qui cite la production du biochar parmi les trois technologies à émission négative aux côtés du Direct Air Capture and Storage (DACs)⁵ et du Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)⁶.

Les acteurs français de la filière de production de biochar estiment urgent et nécessaire de partager leur vision afin d'explicitier les enjeux attachés au développement de cette filière en France. En synthèse, il est apparu primordial de :

- Préciser la contribution attendue en France de la filière biochar dans l'atteinte de la capacité de séquestration de 80mt CO₂/an en 2050 ;
- Clarifier le positionnement de la filière vis-à-vis de la nouvelle hiérarchie des usages de la biomasse ligneuse proposée dans le cadre des travaux de la SNBC3, notamment en vue de la valorisation des biomasses issues des nouvelles pratiques agroécologiques et forestières ;
- Sensibiliser les territoires et les collectivités sur les contributions reconnues des biochars dans les politiques de renaturation urbaine, de re-fonctionnalisation des sols, de dés-imperméabilisation et de lutte contre les îlots de chaleur ;
- Soutenir et faciliter le financement des premiers investissements d'unités de production sur le territoire.

¹ H.SANEI et al (2024) - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516223002276>

² [IPCC AR6 WGIII FullReport \(page 115 et 790\)](#)

³ <https://www.european-biochar.org/en>

⁴ <https://www.biochar-industry.com/>

⁵ Capture directe dans l'air du CO₂ et stockage géologique

⁶ Capture et stockage géologique du CO₂ dans les émissions d'unités de production de bio-énergie

TABLE DES MATIERES

Résumé exécutif	1
I. Enjeux de la lutte contre le changement climatique	3
Baisse des émissions et élimination du dioxyde de carbone atmosphérique (EDC).....	3
Les biochars pour contribuer à l'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique	3
Rôle des biocarbone dans la réduction des émissions fossiles industrielles.....	4
II. Destination et Terminologie des biochars	5
Projet de Classification des biochars.....	6
Quelles applications des biochars pour quel(s) bénéfice(s) sociétal et climatique ?.....	6
État de la recherche scientifique sur les biochars à l'échelle mondiale.....	7
III. Aspects technologiques et environnementaux liés à la production des biochars	10
Bilans masse et énergie.....	10
Nature des matières premières utilisées	10
Bilan environnemental de la production et de l'utilisation des biochars (analyse du cycle de vie)	11
IV. Le potentiel de développement du Biochar en France et en Europe, opportunités et contraintes ¹³	
Evaluation du potentiel de développement de la filière BIOCHAR (EDC).....	13
Focus sur l'analyse du développement de la filière en Europe (étude EBI).....	14
Maturité et dynamique de la filière en Europe :.....	16
Contraintes et opportunités concernant le développement de la filière :.....	16
V. Conclusion	18

I. Enjeux de la lutte contre le changement climatique

Baisse des émissions et élimination du dioxyde de carbone atmosphérique (EDC)

Pour atteindre l'objectif fixé en 2015 par l'Accord de Paris (COP 21) de limiter le réchauffement à 1,5 °C et parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050, il faudra réduire de moitié les émissions mondiales de gaz à effet de serre avant la fin de cette décennie par rapport à 1990 et équilibrer les émissions restantes par des absorptions naturelles et des technologies d'Élimination du Dioxyde de Carbone (EDC)⁷ atmosphérique.

Les solutions EDC joueront un rôle essentiel dans la neutralisation des émissions résiduelles ; par conséquent, la plupart des scénarios alignés sur l'Accord de Paris prévoient des capacités EDC substantielles. Les biochars ont un rôle important à jouer dans la lutte contre le changement climatique en contribuant à éliminer les émissions résiduelles, en complémentarité des « biocarbone » qui visent à réduire les émissions issues des sources de carbone fossile (notamment pour le secteur sidérurgique).

Les biochars pour contribuer à l'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique

Les approches principales explorées en termes d'élimination de CO₂ atmosphérique sont le captage et le stockage du carbone à partir de sources biogéniques (BECCS) ou de l'air ambiant (Direct Air Carbon Capture and Storage - DACCS), sous forme gazeuse ou liquide, ainsi que l'élimination du carbone atmosphérique par le biochar (Biochar Carbon Removal - BCR) sous forme solide.

Selon le dernier rapport McKinsey⁸ sur les éliminations du dioxyde de carbone atmosphérique, certaines estimations nécessitent une capacité de séquestration additionnelle de **0,8 à 2,9 gigatonnes de CO₂ par an d'ici 2030**, soit 3 jusqu'à 10 fois plus que les capacités estimées opérationnelles à date. Les boucles de rétroaction biotiques pourraient également accélérer encore davantage les effets les plus graves du changement climatique, augmentant ainsi la vitesse à laquelle l'EDC devrait être mise à l'échelle.

Dans la nature, le CO₂ atmosphérique est séquestré par des processus géologiques, englobant à la fois la voie du carbone **inorganique** et la voie du carbone **organique** :

- Les **BECCS** et les **DACCS** reposent tous deux sur la voie du carbone **inorganique**, qui conduit à une séquestration à long terme en convertissant le CO₂ en carbone minéral (carbonates) à l'intérieur des roches sédimentaires. Les carbonates sont considérés comme le point final du cycle du carbone inorganique en matière de stabilité.
- L'élimination du carbone atmosphérique par le **biochar** (BCR) repose sur la voie du carbone **organique**, qui convertit la biomasse en différentes structures carbonées stables, dont l'inertinite. L'inertinite est la forme la plus avancée et la plus stable de carbone organique. L'élimination du carbone par le biochar peut être considérée comme un raccourci de la filière du carbone organique, dans laquelle la conversion thermo-chimique du carbone de la biomasse d'origine en matériaux inertes se produit dans le réacteur en quelques minutes ou quelques heures.

Les deux voies, inorganique et organique, conduisent en fin de compte à des formes permanentes de stockage de carbone.

La séquestration du carbone sous une forme solide et géologiquement stable est l'un des moyens les plus durables de réduire activement la quantité de carbone dans l'atmosphère, et l'élimination du carbone

⁷ EDC signifie Élimination du Dioxyde de Carbone (EDC en anglais) que nous utiliserons dans cette note pour signifier l'action de séquestrer du carbone de façon permanente

⁸ Carbon removals: How to scale a new gigaton industry (2023) McKinsey

atmosphérique par le biochar apparaît, depuis quelques années seulement, comme l'une des technologies les plus prometteuses et compétitives à date, ainsi qu'à l'horizon des prochaines décennies (voir en annexe Figures A et B).

L'ascension rapide de cette technologie et sa conquête du marché européen démontrent son potentiel et sa capacité à être déployée à grande échelle : en 2023, elle représentait 93 % des livraisons totales d'élimination durable du carbone, avec plus de 115 000 tonnes de CO₂⁹.

Ramené à l'échelle de la France, et considérant un scénario de référence selon l'étude CARBON GAP/E-Cube (2024), le volume de biomasse disponible pour le biochar est estimé à 0,8 Mt/an, ce qui permet d'absorber environ 0,5 Mt CO₂ /an en 2050. Ce volume de biomasse correspond à la moitié du gisement théorique maximal estimé à 1,6 Mt/an¹⁰.

Rôle des biocarbone dans la réduction des émissions fossiles industrielles

La réduction des émissions de gaz à effet de serre nécessitera de combiner baisse de la consommation, efficacité énergétique et transition énergétique. Mais elle nécessitera aussi de remplacer le carbone fossile par du carbone biogénique dans tous les secteurs de l'économie et de l'industrie.

L'industrie lourde fabrique des produits essentiels mais est également responsable de près de 40 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂)¹¹. L'acier, le ciment et les produits chimiques sont les trois industries les plus émettrices et parmi les plus difficiles à décarboner.

À titre d'exemple, la métallurgie utilise le charbon fossile à la fois comme source de chaleur et d'agent réducteur au sein du processus chimique de conversion du minerai en métal élémentaire. Pour certains de ces usages, seul le biocarbone peut se substituer au charbon fossile, comme par exemple pour l'industrie du silicium utilisé dans les panneaux photovoltaïques et les batteries. Pour d'autres usages, comme pour l'acier, le biocarbone est nécessaire en complémentarité avec l'hydrogène décarboné pour avoir un acier complètement vert. Les acteurs du secteur intègrent dans leur stratégie de décarbonation le recours partiel voire total à du biocarbone contribuant à substituer l'utilisation de carbone fossile pour opérer la réaction carbothermique de leurs procédés. Indispensable pour cette industrie, cette réaction chimique consiste en une réduction, par le carbone, des oxydes métalliques. Ces réactions se déroulent le plus souvent à des températures très élevées (plus de 2000°C pour le silicium). Elles permettent d'obtenir des formes pures de nombreux éléments chimiques.

Cette application est en forte croissance à l'échelle internationale et l'ensemble des acteurs du secteur développent une stratégie pour sourcer les biocarbone adaptés à leurs besoins en termes de coût et de fonctionnalité.

9

¹⁰ [Etude Potentiel de déploiement des méthodes d'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique en France. Carbon GAP/E-cube, Mars 2024](#)

¹¹ AIE report, World Energy Balances (2023)




II. Destination et Terminologie des biochars

Par souci de clarté et de simplification, la présente note distingue d'une part, les matières carbonées au sens large, représentant le produit principal issu de la conversion par pyrolyse d'une biomasse, et d'autre part, les matières carbonées répondant à des critères techniques spécifiques visant la stabilité du carbone à des fins de séquestration permanente.

En effet, en fonction des biomasses-précurseurs utilisées, de sa composition, des propriétés physico-chimiques associées, et de sa destination, plusieurs termes et emplois sont actuellement utilisés par les acteurs de la filière. Cette note propose une définition partagée au sein du club pyrogazéification de l'ATEE permettant d'associer le matériau et son usage à sa contribution à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions carbone de la COP21.

Ainsi, nous distinguerons ici les **Biochars**, dont la fonction principale sera la conservation à long terme du carbone, des **Biocharbons** à usages énergétiques et des **Biocarbone** à usages de remplacement d'un réactif chimique. En pratique, comme ces produits répondent à des usages différents, ils doivent répondre à des spécifications différentes en fonction des usages (carbone fixe, porosité, granulométries, ...). Par exemple les biocharbons (biocoal ou black pellets en anglais), à usage énergétiques sont généralement obtenus dans des conditions de pyrolyse à basse température (souvent appelée torréfaction) : ils ont de ce fait une teneur en carbone inférieure à 70% et une stabilité du carbone ne répondant pas aux critères minima des biochars de l'EBC.

Partageant ce même souhait de clarification, cette approche est également débattue au sein des instances de normalisation ISO TC238 travaillant sur un projet de norme internationale.

TERME PROPOSÉ	BIOCHARBON BICOAL 	BIOCARBONE BIOCARBON 	BIOCHAR 
Fonction principale du matériau	Remplacement de combustibles fossiles	Remplacement d'un réactif chimique (ex. agent de réduction) d'origine fossile	Conservation à long-terme du carbone & apporter des bénéfices fonctionnels et/ou environnementaux
Impact climat au sens de la Net Zero Initiative	Réduction d'émission GES	Réduction d'émission GES	Puit de carbone + Evitement démission GES
Mode de comptabilité carbone (1)	<ul style="list-style-type: none"> Emission évitée : selon l'application Puit de carbone : 0 	<ul style="list-style-type: none"> Emission évitée : 2,5 à 3,0 Puit de carbone : 0 	<ul style="list-style-type: none"> Emission évitée : selon l'application Puit de carbone : 2,0 à 3,0
Secteurs d'application (non exhaustif)	Energétique Industries énergivores	Sidérurgie Raffinage de métaux Chimie Fabrication d'éléments de batterie	Agriculture Services à l'environnement Matériaux, Génie civil Paysagisme, Urbanisme

(1) tCO₂ par t de Biochar - Source EBI – European Biochar – Market report 2022/2023

Projet de Classification des biochars

Afin de classer la très grande variété des biochars, il est envisagé de normaliser leurs spécifications sur la base d'un nombre limité de critères associés à des classes. Ceci permettra d'objectiver les échanges entre producteurs et acheteurs présents sur les différents marchés utilisateurs.

Ce projet de norme internationale est actuellement discuté à plusieurs niveaux par les acteurs de la filière dont le Club pyrogazéification de l'ATEE et le comité miroir AFNOR en charge de ce comité (CN X34B) au niveau national et le comité ISO TC238 piloté par le Canada et impliquant 14 pays au niveau international. Lorsqu'elle sera publiée, l'intérêt de cette grille de classification sera à terme de pouvoir étiqueter les biochars commercialisés d'une manière claire et éviter la confusion actuelle des acteurs du marché.

Quelles applications des biochars pour quel(s) bénéfice(s) sociétal et climatique ?

Soutenu par une dynamique de recherche et d'innovation intense à l'échelle mondiale, une multitude de champs d'études et d'expérimentations à différents niveaux de maturité, ainsi que des développements commerciaux, sont d'ores et déjà effectifs.

L'institut ITHAKA¹² avait publié que plus d'une cinquantaine d'applications commerciales pouvaient être envisagées selon les propriétés des biochars.

En réalité, les secteurs potentiellement ou déjà utilisateurs de biochar sont illustrés dans la figure ci-contre et sont pour certains déjà opérationnels.



Le tableau ci-dessous récapitule la proposition de valeur attendue par les marchés visés et sa contribution climatique globale.

SECTEUR	Proposition de valeur (exemple)	Maturité	Eligibilité CDR	Bénéfice GES additionnel
Biogaz	Stabiliser l'exploitation des digesteurs Prétraiter les biogaz	+++	✓	Augmentation de la quantité de biométhane disponible
Agriculture	Améliorer la biodiversité et la résilience des sols, réduire intrants non durables	+++	✓	Amélioration de la productivité à ajout d'eau et de fertilisant équivalent
Elevage	Réduire l'émission de méthane (ruminants) Réduire les impacts antinutritionnels (toxines) Améliorer la qualité des litières animales	+	✓	Réduction d'émission de méthane entérique et des émissions liées aux lisiers
Alimentaire	Coloration d'aliments, adsorbants	+	✓	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés
Construction	Réduire intrants non durables (béton)	++	✓	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés
High Tech	Réduire intrants non durables ou fossiles (graphite, coke, charbon fossile...)	+	(✓) si matériau en fin de vie non incinéré	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés
Médical	Améliorer le bien-être	+	✓	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés
Cosmétique	Coloration, agent de blanchiment, ...	++	✓	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés
Assainissement/ Environnement	Épuration de gaz et liquides Stabilisation de polluants dans les sols contaminés	++	(✓) si matériau en fin de vie non incinéré	Emissions évitées des matériaux fossiles remplacés, amélioration performance des procédés, fixer les polluants

¹² Hans-Peter Schmidt et al (2013). The 55 uses of biochar.

Il est usuel de se référer aux 17 objectifs de développement durable¹³ pour mesurer et qualifier l'impact sociétal et environnemental des solutions mises en place.

La production et l'utilisation des biochars dans les différents secteurs listés ci-dessus répondent pleinement à au moins 8 des objectifs référencés, et à 3 supplémentaires (1-2-3) si l'utilisation des biochars est réalisée dans des territoires peu développés ou rencontrant des déficiences agricoles sévères.

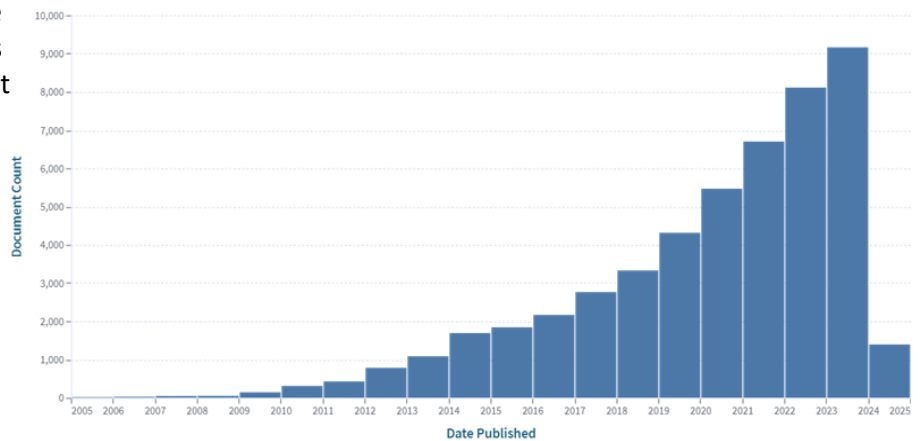


État de la recherche scientifique sur les biochars à l'échelle mondiale

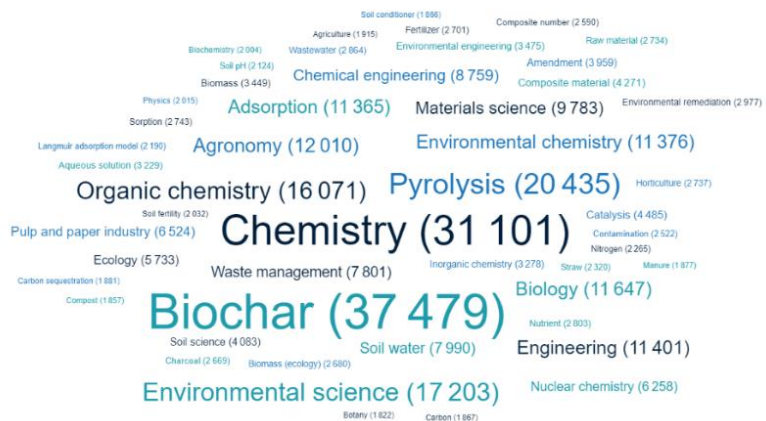
La production des biochars, leur caractérisation et leur utilisation dans les multiples voies identifiées à date font l'objet d'une intense et croissante attention de la communauté scientifique internationale depuis 2010.

L'évolution exponentielle du nombre de publications scientifiques traitant de cette thématique (biochar ou biocarbone) est représentée dans la figure ci-dessous : le corpus scientifique produit en 2023 est évalué à environ 9000 publications.

Nombre de publications scientifiques par année depuis 2005 (jusqu'à février 2024) en lien avec la thématique biochar ou biocarbone (source : <https://www.lens.org>)



Poids relatifs des domaines étudiés depuis 2005 en lien avec les termes biochar ou biocarbone (source : <https://www.lens.org>)



L'observation de l'origine des équipes de recherche travaillant sur le sujet depuis 2005 (nombre de publications en cumul), montre la prédominance de la Chine, des Etats Unis et de l'Inde dans la production

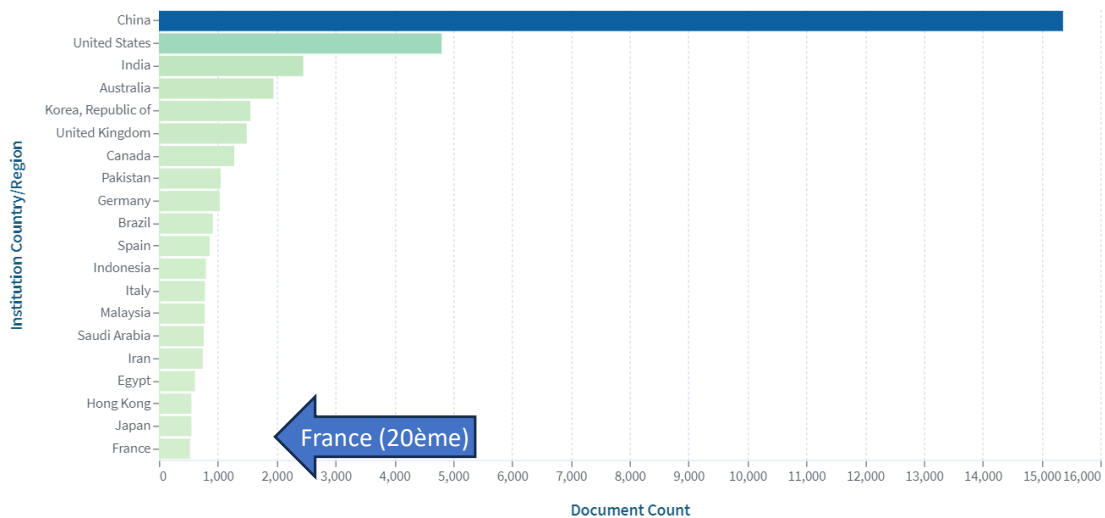
¹³ https://www.unicef.fr/sites/default/files/fiche_thematique_odd.pdf

scientifique. Ces territoires sont également les zones les plus actives en termes de développement industriel et commercial de la filière.

A titre d'exemple, les Etats Unis soutiennent activement le développement de la filière au moyen de 2 modalités incitatives :

- un programme dédié (Biochar Research Network Act of 2023) doté de 50 millions de dollars pour chaque exercice fiscal de 2023 à 2028 afin de promouvoir la recherche et l'expérimentation sur le biochar ;
- le NRCS Code 336¹⁴, une norme de pratique de conservation pour l'amendement du carbone du sol qui rémunère les agriculteurs qui veulent utiliser du biochar jusqu'à 800\$ par acre¹⁵.

Il est en revanche surprenant de voir le décrochement évident de la France en 20^e position derrière des pays ayant une capacité de recherche bien inférieure. Cette impasse du monde académique sur la thématique est le reflet ou l'origine du manque de prise en compte et de considération de la filière en France. En conséquence, l'essentiel de l'effort R&D actuellement conduit en France est mené et financé par les entreprises.



Classement des pays par nombre de publications scientifiques (en cumul depuis 2005) en lien avec les termes biochar ou biocarbone (source : <https://www.lens.org>).

¹⁴ [Soil Carbon Amendment 336](#)

¹⁵ [EQIP payment schedule](#)

Dans ce contexte, il convient de mettre en valeur deux initiatives récentes qui semblent montrer une implication opportune des équipes de recherche françaises en appui de cette filière industrielle d'avenir.



Financé par l'Europe et l'ADEME, un nouveau projet labellisé en mars 2024 mérite d'être souligné : le projet NWE CASCADE. Ce projet vise à introduire des propositions de gestion durable de la biomasse dans 7 régions du Nord-Ouest de l'Europe en mettant en œuvre des chaînes de conversion en biochar à partir de la biomasse et en créant des scénarios applicables et soutenables pour d'autres régions.

En Bretagne par exemple, le projet se concentre sur la mise en place d'actions spécifiques pour une meilleure gestion des eaux pluviales en milieu urbain en intégrant le **biochar** dans les solutions. Ces actions visent à favoriser l'infiltration des eaux de pluie, améliorer la perméabilité du sol et encourager la recharge des nappes phréatiques conformément au concept d'une "ville éponge".

À travers ce projet, Unilasalle et plus particulièrement l'unité de Recherche Cyclann (Rennes) s'engage dans une collaboration étroite avec des acteurs clés de la gestion des eaux pluviales en Bretagne, notamment les collectivités locales et les services de l'eau.

<https://recherche.unilasalle.fr/actualites/projet-interreg-nwe-cascade-pour-une-meilleure-valorisation-de-la-biomasse#:~:text=Le%20projet%20NWE%20CASCADE%20vise,soutenables%20pour%20d'autres%20r%C3%A9gions>



Financé par l'Europe, le projet fournira une solution technique pour convertir les résidus organiques du secteur des fruits et légumes en de nouveaux engrais biosourcés de haute qualité qui répondent aux besoins de l'agriculture (biologique) moderne. L'ambition du projet va au-delà de la simple récupération des nutriments, et inclut également le développement d'alternatives économiquement viables et écologiquement durables aux engrais minéraux avec une valeur agronomique identique ou améliorée.

La solution technique consiste en 5 procédés de conversion (plateforme d'acide carboxylique, production de biomasse microbienne, électrodialyse, élevage d'insectes et **production de biochar**) qui peuvent être combinés en fonction des flux de déchets disponibles et intégrés à des technologies de pointe telles que le compostage. Les synergies entre les processus de conversion individuels seront recherchées et optimisées pour maximiser les avantages économiques et environnementaux, et les processus seront démontrés au TRL7. Les ingrédients obtenus (biomasse microbienne, concentrés de nutriments minéraux, biomasse d'insectes, excréments d'insectes, chitine d'insectes, **biochar**) seront combinés pour obtenir des produits fertilisants sur mesure adaptés aux besoins spécifiques des cultures.

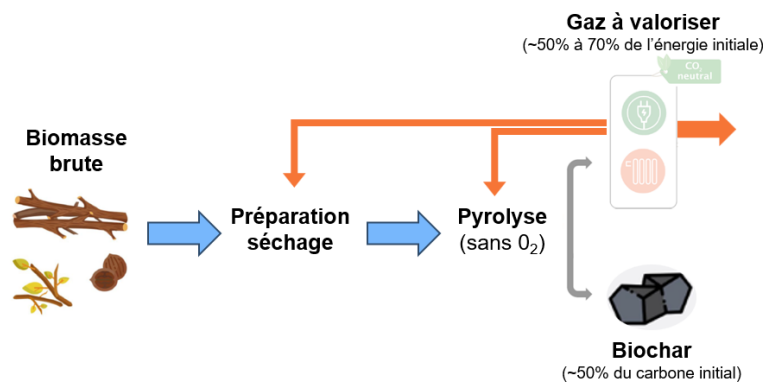
<https://rusticaproject.eu/fr/home-francais/>

III. Aspects technologiques et environnementaux liés à la production des biochars

La production de biochars peut présenter une infinité de possibilités selon le choix des matières premières utilisées, le design et les conditions d'exploitation de la technologie, et la destination des produits générés dont le biochar. L'objectif de cette note n'est pas de décrire le panel des possibles mais au contraire d'en simplifier la présentation et la compréhension. Ainsi, seule la conversion de la biomasse par chauffage en (quasi) absence d'oxygène (technologies de Pyrolyse¹⁶) sera décrite ci-après. Dans certains cas une fraction moins importante de biochar peut également être produite par la gazéification de biomasse.

Bilans masse et énergie

De façon schématique et simpliste, il est établi le bilan masse et énergie suivant :



pour lequel peuvent être retenues quelques données générales :

- Conversion matière : 30% \pm 5% de biochar versus la biomasse entrante (matière sèche) selon le degré de carbonisation/stabilité souhaité (principalement lié à la température de pyrolyse) ;
- Disponibilité d'énergie verte dans la fraction gaz : 60% \pm 10% selon l'humidité de la biomasse, la taille et l'efficacité du procédé utilisé ; l'énergie disponible est en priorité utilisée pour les besoins internes du procédé (séchage notamment) et l'excédent est utilisé selon les besoins de l'écosystème local (vapeur, électricité, eau chaude, gaz renouvelables, molécules d'intérêt).

Nature des matières premières utilisées

L'EBC a formalisé une liste¹⁷ des biomasses précurseurs pouvant être utilisées pour la fabrication de biochars certifiables. Cette liste est tenue régulièrement à jour et qualifie les biochars ainsi fabriqués pour différents usages couvrant l'alimentation animale, l'agriculture, y compris biologique, l'assainissement des sols, les produits de consommation ou encore les matériaux de base.

¹⁶ La pyrolyse est un processus thermo-chimique qui transforme des matières organiques en absence d'oxygène (ou quasi absence) en une partie solide (notamment la partie carbonée), une partie gazeuse (le syngaz) et une partie liquide (les huiles pyrolytiques). Une combustion consiste à l'opposé à transformer immédiatement tous ces produits en chaleur par oxydation (en général via un excès d'oxygène au-delà de la stoechiométrie pour avoir une combustion complète). Ainsi, la pyrolyse ne "brûle" pas, elle transforme les entrants en d'autres produits matière et/ou vecteurs énergétiques. La gazéification consiste à transformer en gaz les parties solide et liquide produites par une première phase de pyrolyse par un apport d'une faible quantité d'air, nettement inférieure à la stoechiométrie. En fonction du caractère plus ou moins complet de la gazéification, il peut rester une part plus ou moins conséquente de carbone solide, dont les caractéristiques peuvent s'apparenter à du biochar

¹⁷ https://www.european-biochar.org/media/doc/2/positivlist_en_2022_1_v10_1.pdf

Par ailleurs, l'EBC ainsi que d'autres sociétés telles que Puro.Earth ont conçu des méthodologies de certification du potentiel de puits de carbone du biochar. Ces certifications basées sur des standards exigeants offrent un gage de qualité requis par la plupart des entreprises souhaitant acquérir des crédits d'élimination du carbone (CORC) sur le marché volontaire. Le dernier exemple en date concerne Microsoft¹⁸ qui a signé en mars 2024 un accord pour l'achat de 95 000 tonnes de crédits d'élimination du carbone sur 6 ans, générés par une nouvelle installation de production de biochar au Mexique.

Dans l'objectif de produire des biochars ciblant une valeur commerciale et un pouvoir séquestrant élevés, les biomasses prioritairement ciblées par les opérateurs visent les matières les moins humides, les moins riches en cendres, les moins contaminées en micropolluants et les plus riches en lignine. La liste des gisements ciblés en France est rappelée en annexe (en annexe Table C).

A noter, la filière biochar peut également utiliser des résidus et co-produits issus des filières sylvicoles, flux également considérés par les unités de gazéification et potentiellement les chaufferies biomasses. En cas de conflit d'usage, l'arbitrage doit être évalué au niveau local afin de limiter les coûts logistiques de ces flux de biomasse et à la lumière de la hiérarchie d'usage en vigueur. Cependant, le biochar peut aussi être produit à partir de résidus agricoles et viticoles, dont la valorisation par les procédés cités plus haut est techniquement plus complexe et moins développée.

Bilan environnemental de la production et de l'utilisation des biochars (analyse du cycle de vie)

A titre d'illustration, l'étude du bilan environnemental de la filière selon les standards de la norme ACV (ISO 14040) impose de définir avec précision l'unité de référence et le scope de l'analyse. Comme souvent dans ce type d'approche, la construction et le démantèlement de l'unité de production seront considérées comme négligeables par rapport aux autres impacts GES de la filière.

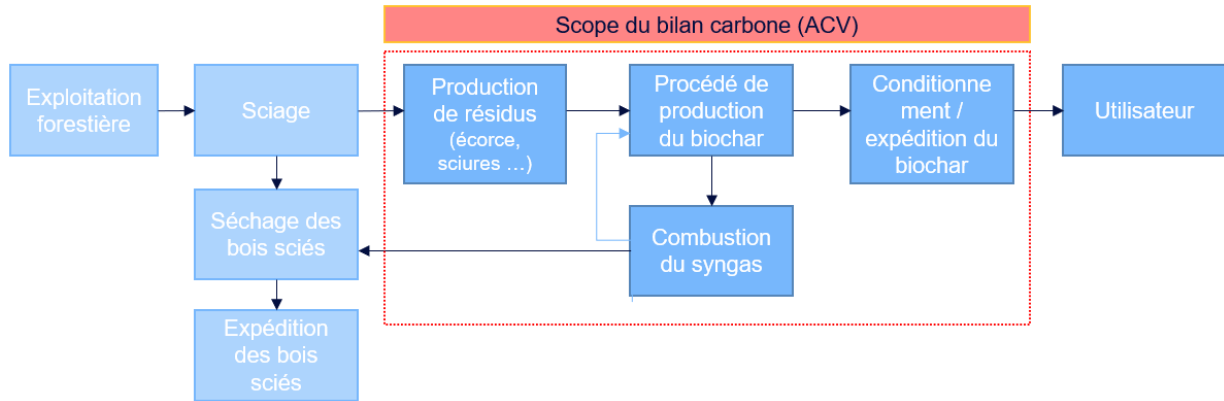
Pour ce cas d'étude élaboré par SUEZ, les hypothèses arbitraires suivantes sont utilisées :

- Matières premières utilisées : résidus de transformation de produits forestiers exploités sous certification FSC ou PEFC¹⁹, générés à une humidité de 45% ;
- Transport des résidus : 0 km considérant que l'unité de production du biochar est installée sur le site de sciage ;
- Mix Energétique utilisé pour la consommation électrique : mix français (50kg/MWh électrique) ;
- Utilisation de la chaleur issue de la combustion du syngas : auto-consommation et utilisation en remplacement de biomasses brûlées par le site de sciage ;
- L'unité de combustion du syngas utilise une flamme pilote (obligation réglementaire) alimentée en combustible conventionnel de type fossile (gaz naturel) ;
- Conditionnement du biochar : humidification à 20% et mise en big-bag de 2m³ ;
- Transport du biochar : moyenne de 150km en camion (remorque d'une capacité de 26 big-bags)
- Utilisation du biochar : utilisation directe en sol agricole ;
- Unité de référence : **production de 1 tonne de biochar sec avec une teneur massique de 85% de carbone (avec une stabilité équivalente à H/C_{org} <0,5 mol/mol).**

¹⁸ <https://www.esgtoday.com/microsoft-signs-95000-ton-biochar-carbon-removal-deal-with-climate-solutions-startup-the-next-150/>

¹⁹ FSC et PEFC sont des labels utilisés pour les bois issus d'une gestion forestière durable et qui ne participe pas à la déforestation.

NB : Les réductions d'émissions de GES et/ou les émissions évitées associées à la production et l'usage du biochar par rapport à un scénario de référence ne sont pas prises en compte dans ce type de calcul où seul le volume de séquestration net est calculé.



Dans le cadre des hypothèses mentionnées ci-dessus, le tableau suivant montre, pour un scénario de base, l'impact GES de chacune des briques opérationnelles permettant d'établir le bilan complet représentant un stockage permanent potentiel de :

3 003 kg de CO₂ eq. séquestré / tonne de biochar sec

Cette valeur ne représente pas encore le nombre de crédits carbone attaché au biochar puisque selon le standard choisi (Puro, VCS, CarbonFuture, CSI, ...) et les destinations effectives de chaque lot de biochar produit, il sera appliqué une décote de cette valeur.

Type d'émission GES (kg CO ₂ eq./t biochar sec)	Amont scope	Scope	Aval scope
CONSTRUCTION DE L'UNITE DE PRODUCTION			
EXTRACTION ET PRODUCTION DES MATIÈRES PREMIÈRES NECESSAIRES		2,3	
TRANSPORT DES MATIÈRES PREMIÈRES		0,0	
CONSOMMATION ÉQUIPEMENTS MOBILES		0,4	
EXPLOITATION DE L'UNITE DE PRODUCTION (scope)			
EXTRACTION, PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE CARBURANTS FOSSILES		12,2	
PRODUCTION DE LA BIOMASSE	nc		
ENTREPOSAGE DE LA BIOMASSE	nc		
TRANSPORT DE LA BIOMASSE À L'USINE		-	
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE ET ÉMISSIONS DU PROCÉDÉ		67,5	
CARBONE SÉQUESTRE DANS LE BIOCHAR		(3 116,7)	
EMBALLAGE DU BIOCHAR		11,3	
TRANSPORT DU BIOCHAR VERS LA CLIENTÈLE		13,1	
MISE EN ŒUVRE DU BIOCHAR PAR L'UTILISATEUR			
UTILISATION DU BIOCHAR (épandage sur le sol)		7,0	
DEMANTELEMENT DE L'UNITE DE PRODUCTION			
DÉMANTÈLEMENT DES ÉQUIPEMENTS		0,1	
TOTAL PAR SECTION DE CHAINE DE VALEUR	-	(3 002,6)	-

(nc) signifie inconsistant ou non pris en compte dans le calcul

Afin de mieux percevoir l'incidence de quelques paramètres clé, le tableau ci-après montre l'impact de l'évolution des hypothèses par rapport au scénario de base simulé :

Sensibilité de l'émission GES (kg CO2 eq./t biochar sec)	Impact	vs BIOCHAR de ref.	
Transport amont de la biomasse sur 50km	18	(2 984,6)	-0,6%
Mix EU27 (versus le mix France)	88	(2 914,6)	-2,9%
Transport du biochar sur 50km (usage local strict)	-8,7	(3 011,3)	0,3%
Transport du biochar sur 400km (en moyenne)	21,9	(2 980,7)	-0,7%
Production du biochar à 30% d'humidité	3,2	(2 999,4)	-0,1%

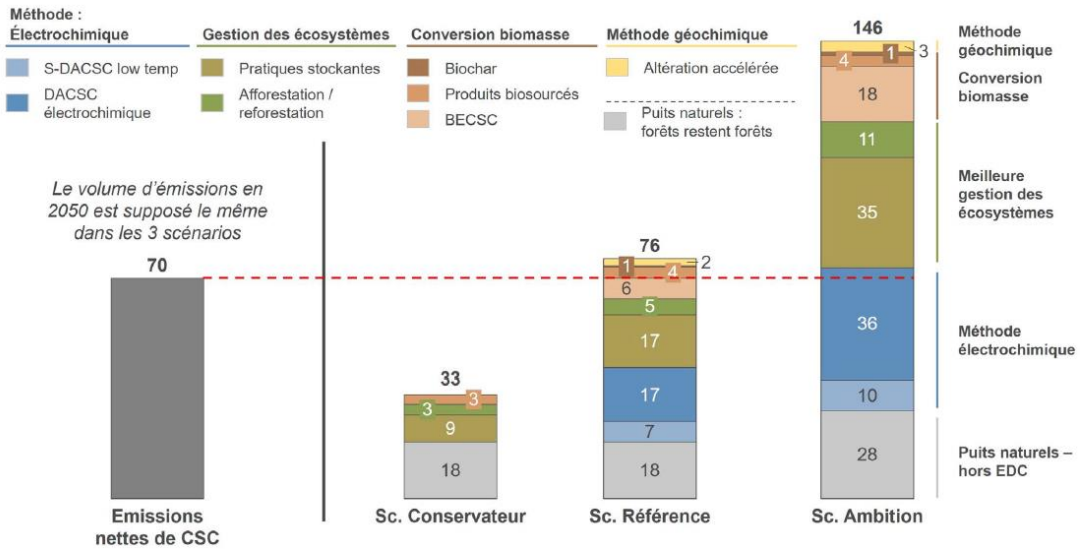
IV. Le potentiel de développement du Biochar en France et en Europe, opportunités et contraintes

Evaluation du potentiel de développement de la filière BIOCHAR (EDC) en France

Une étude récente¹⁰ a été menée par l'ONG CARBON GAP, E-CUBE et l'institut ARMI, afin d'évaluer la part des différentes solutions d'Élimination du dioxyde de carbone qui pouvaient être installées et opérées en France afin d'atteindre l'objectif de 80 MT de CO₂ éliminé/an d'ici 2050. L'étude prend en compte les contraintes d'accès aux ressources matières et énergie.

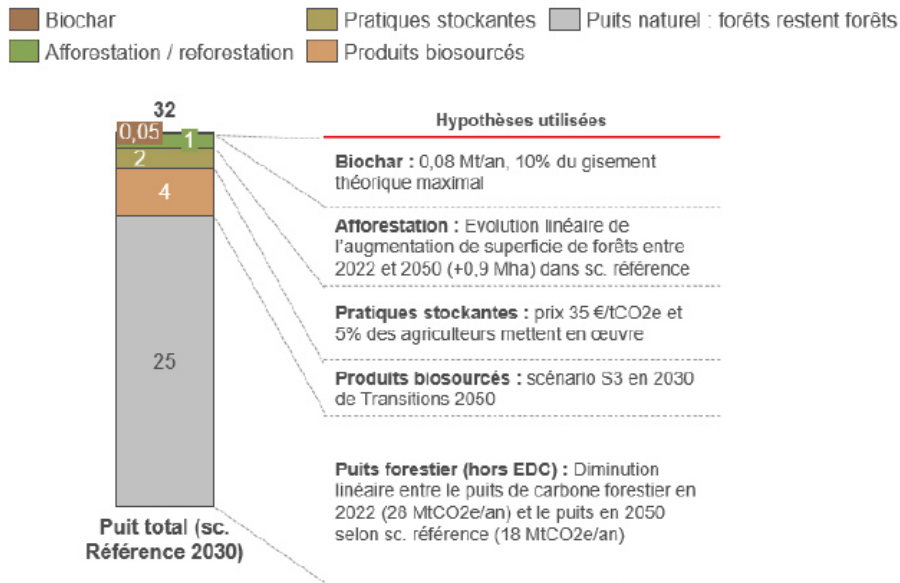
Plusieurs données intéressantes méritent d'être mises en évidence :

- Le scénario de référence vise à développer une capacité de 76MT CO₂ éliminé par an d'ici 2050 ;
- La totalité des filières EDC sont prises en compte quelle que soit leur degré de maturité sachant que certaines solutions sont matures (la production de Biochar par exemple) et d'autres sont au stade de développement avec des verrous significatifs à lever ;
- Le gisement de biomasses résiduelles potentiellement disponibles en 2050 pour l'EDC (BECCS, produits biosourcés et BIOCHAR) est estimé dans le scénario de référence à 60 MT/an pour la biomasse non forestière et à 37 Mm³/an pour la biomasse forestière ;
- La **part issue de la production nationale de biochar est estimée à 1 MT/an de CO₂ éliminé** avec un potentiel estimé à 1,6 MT/an de CO₂ éliminé.



Composition des puits de carbone total des différents scénarii en 2050, comparé au volume d'émissions résiduelles anticipé par la SNBC2 en MtCO₂ eq./an (source : CARBON GAP, 2024)

Dans un horizon plus proche (2030), l'étude estime le potentiel EDC et des puits de carbone à hauteur de 32 Mt/an soit à peine 40% de l'objectif fixé en 2050, dont 78% couverts par les puits forestiers qui tendent à décroître au fil des décennies prochaines compte tenu du changement climatique et de la santé des massifs. En 2030, le biochar représenterait 80kt/an soit 10% à peine du gisement potentiel estimé comme le montre la figure ci-dessous.

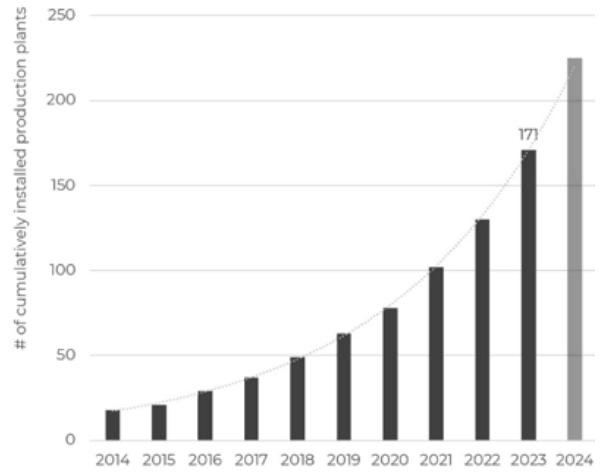


Focus sur l'analyse du développement de la filière en Europe (étude EBI)

Le développement de la filière biochar en Europe a connu une croissance significative au cours des dernières années, principalement en raison de la prise de conscience des enjeux de décarbonation et réduction des émissions de carbone. Nous pouvons identifier plusieurs facteurs qui ont contribué à l'émergence et au développement du marché du biochar en Europe. Tout d'abord, les collaborations entre les gouvernements, les institutions de recherche, les entreprises privées et les organisations non gouvernementales ont favorisé le développement du marché, la production et la commercialisation du produit. D'autre part, la demande croissante pour des pratiques agricoles durables et l'augmentation du

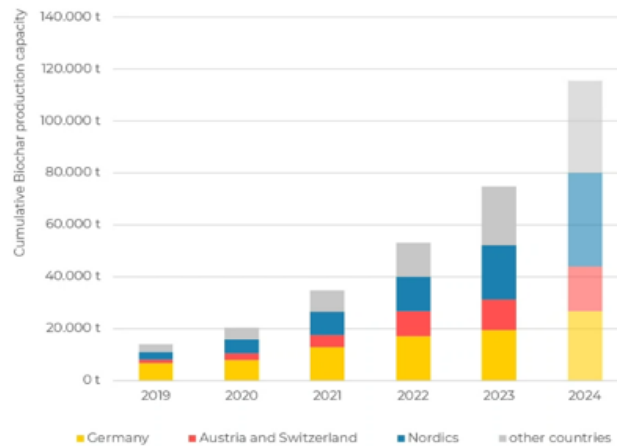
commerce international de produits bio-agricoles sont également considérés comme des facteurs moteurs de la croissance du marché du biochar.

À la fin de 2023, le **nombre total d'installations de production de biochar en Europe a augmenté pour atteindre 171 installations**, avec 41 nouvelles installations additionnelles mises en service en 2023. Fin 2024, l'étude de marché de l'EBI projette que le nombre d'installations atteindra les 220 (voir figure). De nombreux autres projets sont en cours de planification et d'obtention des autorisations en vue de leur mise en service en 2025. Actuellement, 40 sites de production de biochar sont en cours de développement en Europe (demandes d'autorisation ou construction) pour une capacité totale supérieure à 35kt/an.



Source : 2023-24 market report (EBI)

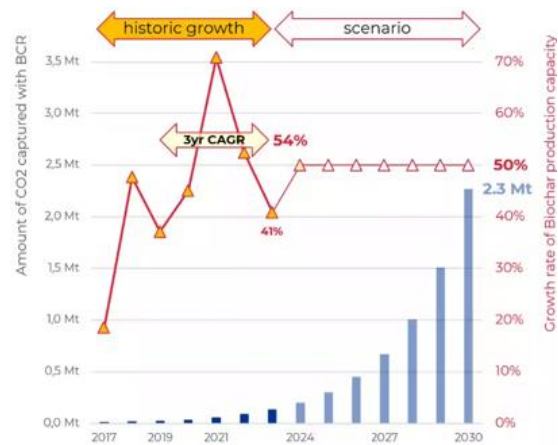
Concernant la capacité de production de biochar installée en Europe, elle est recensée à **75.000 tonnes en 2023**, et passera à environ 115.000 tonnes en 2024. La croissance demeure dynamique avec un **taux TCAC sur les 3 dernières années de 54% (2020-2023)**. Sur l'année écoulée (2023), la production effective de biochar était de 49.000 t soit plus de 130.000 t de CO₂ éliminé. A noter que la capacité des unités de production augmente : 78% des unités récentes produisent entre 200-5.000 t/an. Les pays les plus dynamiques en Europe demeurent l'Allemagne (26%), la Scandinavie (28%), l'Autriche et la Suisse représentant les 2/3 des unités opérées. Parmi les autres pays, l'Espagne, la France et UK débutent leur montée en puissance.



Source : 2023-24 market report (EBI)

La revue conduite par l'EBI propose une extrapolation de l'impact de l'industrie biochar en terme de capacité de séquestration avec un scénario de croissance maintenu à 50% de TCAC.

La quantité de CO₂ ainsi éliminée représenterait alors 2,3Mt/an en 2030, soit environ 50% de l'objectif de la Commission européenne.



Source : 2023-24 market report (EBI)

Maturité et dynamique de la filière en Europe :

La technologie de production de biochar est d'ores et déjà considérée mature. Actuellement, il existe au moins dix entreprises européennes qui exploitent des installations commerciales depuis plusieurs années, dont au moins quatre sont au niveau de maturité technologique TRL 9, les autres étant au moins au niveau TRL 8.

En plus des fabricants d'équipements établis, plusieurs nouveaux acteurs industriels entrent sur le marché, certains avec une expérience pertinente pour déployer ces installations en dehors de l'Europe. Différentes applications pour le biochar sont également présentes sur le marché européen, notamment :

- L'usage comme amendement du sol pour améliorer la structure, la fertilité et la rétention d'eau du sol. Il peut également réduire les pertes de nutriments et favoriser la croissance et la résilience des cultures ;
- Le traitement de l'eau par filtration pour éliminer les polluants et les contaminants, améliorant ainsi la qualité de l'eau potable et réduisant la pollution ;
- L'intégration de biochar dans les matériaux de construction comme le ciment/béton où le biochar permet de réduire les émissions en remplaçant partiellement le clinker et de générer des puits de carbone permanents.

Equipementiers	Biochar (produit principal)	Pays	Exemple de réalisations
VOW (ex. ETIA)	OUI	Norvège	10kt/an unité biocarbone pour Elkem
PYREG	OUI	Allemagne	50 unités en fonctionnement en Europe + développement récent aux USA
GROUPE SOLER	OUI	France	3 unités industrielles de production de biocarbone et de biochar, réparties sur 2 sites en France (capacité totale : 50 kt/an)
AIREX ENERGIE	OUI	Canada	1 unités de biocoal + 1 unité de biochar en construction (30kt/an) avec SUEZ
PYROCORE	OUI	Belge/UK	Unités pilote en UK
HAFFNER ENERGY	NON	France	Unité de démonstration industrielle à Strasbourg, unité en cours de construction à Marolles (Grand-Est) pour une capacité annuelle de 120 tonnes Hydrogène + 660 tonnes de biochar.
SYNCRAFT	NON	Allemagne	Plusieurs unités en Allemagne, Autriche, Suisse
AQUAGREEN	NON	Danemark	Unités de traitement de boues d'épuration
NGE	NON	Autriche	Unités de traitement de boues d'épuration
EQTEC	NON	UK	Plusieurs unités en opération en Espagne, Italie
GAZOTECH	NON	France	Licence technologie Ankur (India)

Liste (non exhaustive) de technologies génératrices de biochars commercialisées sur le territoire européen.

Contraintes et opportunités concernant le développement de la filière :

La demande et l'utilisation du biochar augmentent dans diverses applications, le matériau offrant une valeur ajoutée significative, mais cela reste un défi et nécessite un soutien politique et réglementaire pour développer les marchés de la demande en parallèle avec l'augmentation de la production.

Le coût élevé de production du biochar constitue également - et malgré ce développement - un facteur limitant pour la croissance du marché. Il existe une très grande hétérogénéité de biochars fabriqués en

Europe et dans le monde dont certains peuvent présenter des compositions non conformes aux règlements et certifications existantes : ce sont des freins évidents à la croissance des marchés utilisateurs. L'objectif de normaliser rapidement les termes et classes de ces matières ainsi que la mise en place d'un cadre de certification EDC comme celui proposé par l'Europe sont de nature à réduire cette hétérogénéité, à augmenter la transparence des relations commerciales entre producteurs et utilisateurs, et à favoriser une production scientifique qualifiée des effets avérés des biochars selon les filières utilisatrices.

En France, la filière bois d'œuvre présente un solde commercial déficitaire (-0,3bn€ en 2023) que le programme France 2030 tend à juguler en modernisant la filière de sciage et de transformation des exploitations forestières. Ce décrochage industriel de la filière bois d'œuvre représente un frein au développement de la filière biochar, alors que le potentiel forestier français est l'un des plus élevés en Europe et couvre 35% du territoire.

Les nouveaux défis de la filière (réduire le déclin forestier dû au changement climatique, préparer un patrimoine forestier plus résilient pour les prochaines décennies, favoriser le bois d'œuvre et les matériaux de construction, encourager la modernisation industrielle des outils de transformation du bois ...) vont naturellement vers une augmentation de la production de connexes et résidus que la filière biochar sera particulièrement apte à transformer en puits de carbone utiles pour les secteurs utilisateurs si la capacité industrielle développée de production de biochar est au rendez-vous.

Pour conclure, le développement du marché du biochar en Europe varie d'un pays à l'autre en fonction de facteurs tels que la disponibilité des matières premières, les politiques nationales en matière d'agriculture et d'environnement, ainsi que le niveau d'acceptabilité sociale et de connaissance du grand public avec cette technologie et ce potentiel puits de carbone. L'avenir du marché du biochar en Europe semble prometteur, avec un intérêt croissant pour les pratiques agricoles durables et une demande croissante pour des solutions respectueuses de l'environnement. Cependant, des défis subsistent qui nécessitent de développer des normes de qualité et des politiques réglementaires cohérentes pour assurer la durabilité et une utilisation efficace des biochars.

v. Conclusion

Promouvoir une filière française de production de biochar contribuera à l'atteinte des objectifs de neutralité fixés dans la Stratégie Nationale Bas Carbone fixant à 80 Mt/an la quantité de CO₂eq. à éliminer en 2050.

La filière française biochar a souffert d'un manque d'intérêt de la communauté scientifique française : ce fait est illustré par la très faible production scientifique en comparaison de l'activité internationale. Il convient alors de combler ce retard non seulement pour utiliser au plus tôt son potentiel de séquestration mais aussi afin de positionner la France sur ces technologies en plein développement et sources d'innovations dans de nombreux domaines d'utilisation.

Par ailleurs, la filière biochar connaît un développement actif en Amérique du Nord depuis une décennie (150 acteurs produisant plus de 150kt/an de biochar). Elle est aussi très présente dans les pays d'Europe du Nord (Allemagne, Pays-Bas, Scandinavie) et en Suisse où des porteurs de technologies matures mettent en service un nombre croissant d'unités (250 unités recensées en 2023 pour une capacité cumulée de 115kt/an de biochar) .

La volonté de l'Europe de préciser le cadre des solutions d'élimination du dioxyde de carbone (Carbon Removal and Carbon Farming - CRCF²⁰) et les réflexions menées sur la hiérarchie des usages des biomasses (REDIII) selon leur nature montrent la nécessité de reconsidérer le carbone fixé par voie de photosynthèse. Tout en conservant la priorité des usages alimentaires, le cycle du carbone voit son rôle de stockage utile et permanent de plus en plus valorisé, tant au niveau international qu'europpéen. C'est dans cette nouvelle perspective que s'inscrit pleinement la production de biochars qualifiés.

Pour la première fois, Carbon GAP et E-Cube ont développé une méthode pour évaluer le potentiel de toutes les solutions d'élimination du dioxyde de carbone en France : il en ressort que la production de biochar devrait représenter une contribution d'un million de tonnes ainsi éliminés en 2050, soit une capacité de production industrielle d'environ 400-450kt/an.

Enfin, il existe un lien intime entre le potentiel de croissance de la filière des biochars avec la remise au niveau industriel de la filière forestière et menuisère française qui souffre de sous-investissements et d'un manque de structuration. La « reconstruction » d'une filière forestière et industrielle compétitive et fortement contributive au Climat est nécessaire en France : cela devra être mené de pair avec l'effort d'adaptation de la forêt française (35% de la surface nationale) au changement climatique (replantation, adaptation des espèces, re-végétalisation de zones urbaines et péri-urbaines dégradées ...) auquel la production locale de biochars pourra contribuer directement.

²⁰ <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240219IPR17805/carbon-removals-deal-with-council-on-new-eu-certification-scheme>

ANNEXES

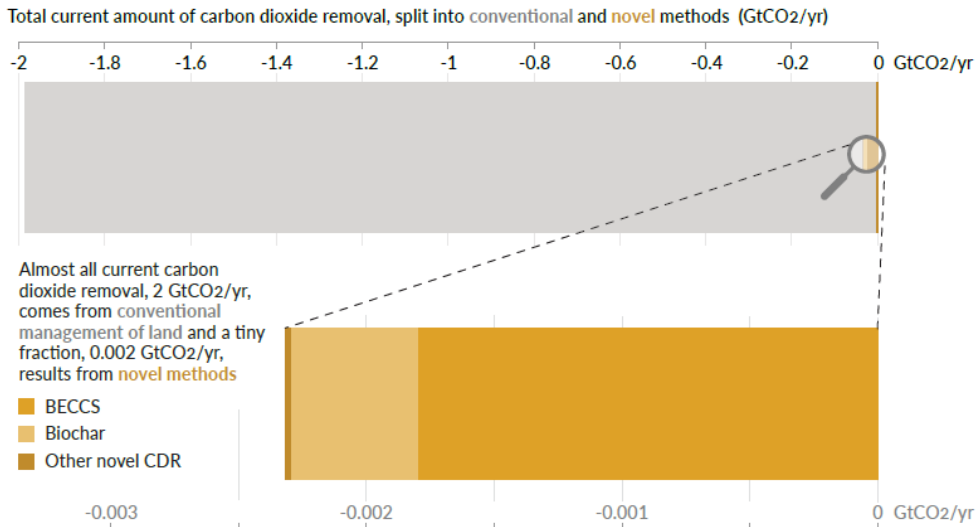


Figure A : Part estimée des solutions EDC par nature en 2030 (source : The state of Carbon Dioxide Removal, Stephen M Smith (University of Oxford), Oliver Geden (German Institute for International and Security Affairs, SWP), Jan C Minx (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, MCC) and Gregory F Nemet (University of Wisconsin-Madison), 1st Edition, 2023)

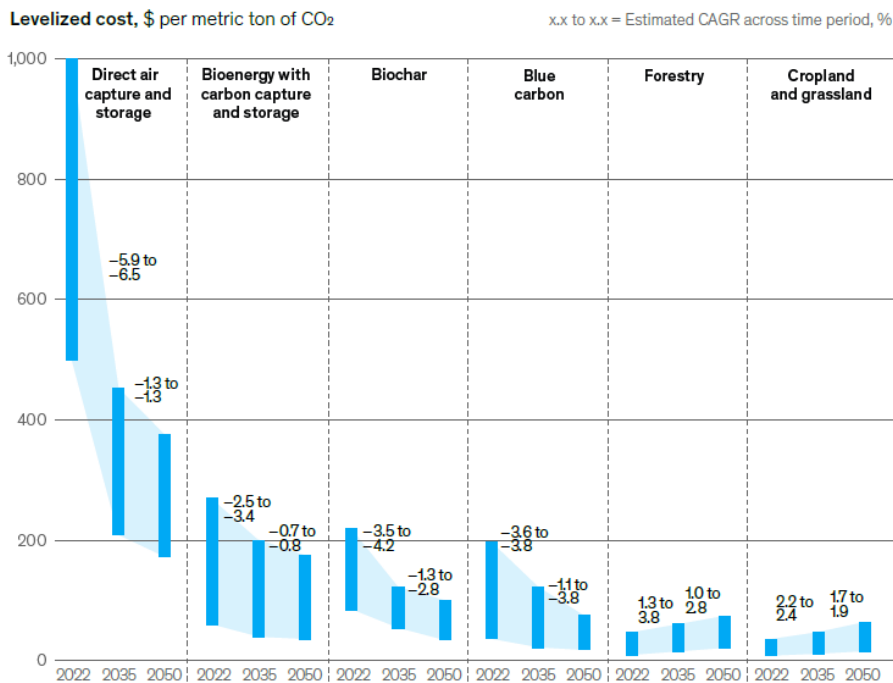


Figure B : Evolution estimée des coûts comparés des différentes solutions technologiques et naturelles permettant de contribuer à séquestrer le carbone de l’atmosphère (source : Carbon removal : how to scale a gigaton industry, McKinsey Sustainability, 2023)

Catégorie	Type de biomasse	Unité	Gisement pour l'EDC
Biomasse issue de l'agriculture non alimentaire	Cultures dédiées	MtMS/an	0,1
	Cultures intermédiaires	MtMS/an	4,4
	Déchets agricoles	MtMS/an	17,8
	Effluents d'élevage	MtMS/an	24,7
	Plantes à fibre	MtMS/an	0,3
Déchets urbains	Plantes à parfum	MtMS/an	0,03
	Déchets verts urbains	MtMB/an	5,14
	Huiles alimentaires usagées	MtMB/an	0,08
	Déchets papiers/cartons	MtMB/an	0,14
	Déchets issus du bois	MtMB/an	2,3
	Boues d'épuration	MtMS/an	0,2
	Déchets ménagers et assimilées	MtMS/an	4,9
Coproduits de l'industrie agro-alimentaire	Trituration oléagineux	MtMB/an	0,64
	Betterave sucrière	MtMB/an	0,15
	Fruits-légumes transformés	MtMB/an	0
	Vinification	MtMB/an	0,06
	Industries des viandes	MtMB/an	0,36
	Ovoproduits	MtMB/an	0
	Pêche et aquaculture	MtMB/an	0,04
	Distillation vinicole	MtMB/an	0,18
	Cidrie	MtMB/an	0,01
Pomme de terre	MtMB/an	0	
Biomasse forestière	Haies et agroforesterie	Mm3/an	3,4
	Prélèvements en forêts	Mm3/an	33

Table C : Récapitulatif des différentes catégories et types de biomasses disponibles pouvant contribuer à l'élimination du carbone en France via les solutions telles que BECCS, produits biosourcés et BIOCHAR (source : CARBON GAP, 2024)