



AVIS D'EXPERTS

Les Biochars

Février
2026

Principaux enseignements

- ✓ Le terme biochar est régulièrement utilisé de manière générique pour couvrir des produits très divers tels que le biocarbène, le biocoal, le charbon, etc. Il existe de ce fait différents types de « biochars » en fonction des matières premières utilisées (c.à.d. le type de biomasse), de la technologie employée et de l'usage final envisagé.
- ✓ La pyrolyse est une technologie mature. Toutefois, l'utilisation à grande échelle de biochars reste encore très limitée au niveau français contrairement aux développements constatés dans d'autres pays. C'est le cas du gouvernement danois qui s'est engagé à investir 1,4 milliards d'euros pour promouvoir spécifiquement la filière du biochar dans l'agriculture, l'un des usages traditionnels du biochar.
- ✓ Chaque application visée des biochars demande des propriétés structurales et physico-chimiques bien spécifiques. Des travaux notamment de R&D sont encore nécessaires pour mieux connaître les domaines d'utilisation potentiels des biochars et quantifier pour chaque application sa plus-value environnementale.
- ✓ A l'échelle européenne ces dernières années, ~ 70% de la production a été faite par les pays suivants : l'Allemagne, les pays nordiques, l'Autriche et la Suisse. Les pays nordiques, qui présentent une croissance marquée dans la filière biochar sont : la Suède, le Danemark et la Finlande. Les « autres pays » (~ 30%) qui augmentent leurs activités dans la filière biochar sont l'Espagne, la France et l'Angleterre.
- ✓ La filière biochar peut mobiliser des catégories de biomasse très variées (forestière, agricole, déchets urbains, etc.). Selon la biomasse mobilisée, il convient de connaître les potentiels conflits d'usage pour envisager un développement durable de filière et/ou projet. En particulier, la disponibilité et la durabilité de la biomasse mobilisée doivent être comparées à leur usage actuel, pour éviter ou limiter les risques d'émissions nettes de carbone (changements d'affectation), d'impacts sur la biodiversité, sur la sécurité alimentaire, et sur la ressource en eau.
- ✓ Des travaux ont déterminé qu'une tonne de biochar permet une séquestration de 2 à 3 tonnes nette de CO₂ éq sur un horizon de 100 ans.
- ✓ Le biochar intégré dans le sol permet d'augmenter le stock de carbone, avec une vitesse de dégradation lente, mais très variable en fonction du procédé mis en œuvre. Les bénéfices pour la séquestration de carbone et la fertilité des sols restent par ailleurs à préciser selon les types de « biochars », les types de sols et les systèmes de cultures ciblés, tout comme les gisements potentiels pour chaque biomasse envisagée.
- ✓ Les cadres normatifs en cours de développement doivent permettre de progresser sur la définition et l'identification des biochars adéquats au regard des attentes des marchés. Pour l'ADEME, il est nécessaire de poursuivre ce travail normatif au niveau national (AFNOR) et international (ISO) afin de clarifier les définitions des biochars et de donner un cadre commun pour les allégations concernant leurs propriétés et leurs bénéfices selon les applications visées.
- ✓ Il est indispensable de poursuivre les recherches et études pour mieux caractériser cette nouvelle filière biochar et objectiver les services rendus par rapport à des filières existantes.

Table des matières

Etat de l'art.....	3
1 Contexte et définitions	3
2 Procédés de production des biochars.....	4
2.1 Les différences entre la pyrolyse et la pyrogazéification.....	5
2.2 Les procédés hydrothermaux.....	7
3 Bilans énergétique et massique de la pyrolyse	7
4 Quelle biomasse pour la production de biochar ?.....	9
4.1 La caractérisation de la biomasse	9
4.2 Quel type de biomasse	20
4.3 Les verrous concernant le développement de la filière biochar	21
5 La plus-value environnementale d'une filière biochar	22
5.1 Le biochar, une solution de stockage de carbone ?.....	22
5.2 Focus sur l'impact du puits forestier.....	23
5.3 Technologies de CDR (Carbon Dioxide Removal : le captage et la séquestration du dioxyde de carbone (CO ₂)).	23
6 Les marchés du biochar.....	24
6.1 En Europe et au niveau mondial.....	24
6.2 Focus sur les producteurs de biochars en France***	28
7 Principaux usages en cours et en développement.....	29
7.1 Retour au sol et les usages agronomiques des biochars	29
7.2 Les autres applications des biochars	30
8. Un cadre réglementaire et normatif en construction	30
9. Un modèle économique pas encore stabilisé	31
10. Les points de vigilance	31
10.1 Choix technologique.....	31
10.2 La biomasse forestière, une ressource renouvelable mais limitée.....	32
10.3 Quelle est la réelle contribution des biochars à l'atténuation du changement climatique ?	32
10.4 Remarques générales	33

Etat de l'art

1 Contexte et définitions ¹

Il faut noter que le terme « biochar » (**Figure 1**) est souvent assimilé au charbon de bois, au biocoal, au biocarbone ou à d'autres produits similaires, notamment en raison de l'absence d'une terminologie et définition précise et normée.



Figure 1. Exemple de biochar

Une définition simplifiée de biochar² est la suivante :

*Solide carboné poreux** produit par la conversion thermochimique*** (pyrolyse) de matières organiques dans une atmosphère sans oxygène (inerte) à des températures en dessous de 700 °C.*

On constate que des études sont encore nécessaires pour mieux connaître cette filière. Les travaux normatifs en cours pour préciser ce terme et son classement traduisent une filière qui n'est pas encore mature et le besoin de poursuivre les travaux de recherche afin d'approfondir la caractérisation des propriétés physiques et chimiques « des biochars », leurs impacts et leurs applications potentielles qui s'annoncent très variées.

¹ J. Lehmann & S. Joseph, 2015, Biochar for environmental management science, technology and Implementation Second Edition Earthscan Publications Ltd.

² Le biochar n'est pas destiné à être brûlé pour produire de l'énergie. Guidelines of the European Biochar Certificate - Version 10.4 (updated on 20th December 2024). <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents>

**L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) définit le diamètre des pores dans le domaine de la catalyse comme suit : < 2 nm, micropore ; < 50 nm, mésopore ; et > 50 nm, macropore. Cette définition s'applique également à la porosité des biochars et est mesurable par la sorption de N₂ (BET) et de CO₂.

***Les processus thermochimiques peuvent être classés en fonction de la quantité d'O₂ présente : pyrolyse sans O₂ ; gazéification avec une quantité substoichiométrique d'O₂ et combustion avec un excès d'O₂.

2 Procédés de production des biochars

La conversion thermochimique de la biomasse en voie sèche³ peut faire appel à trois procédés distincts : 1) combustion, 2) gazéification et 3) pyrolyse. C'est ce dernier qui conduit à la production de biochar. (Figure 2). La distribution des produits de la pyrolyse dépend principalement de la puissance de chauffe et de la température de la phase gaz (Figures 2 et 3, Tableau 1).

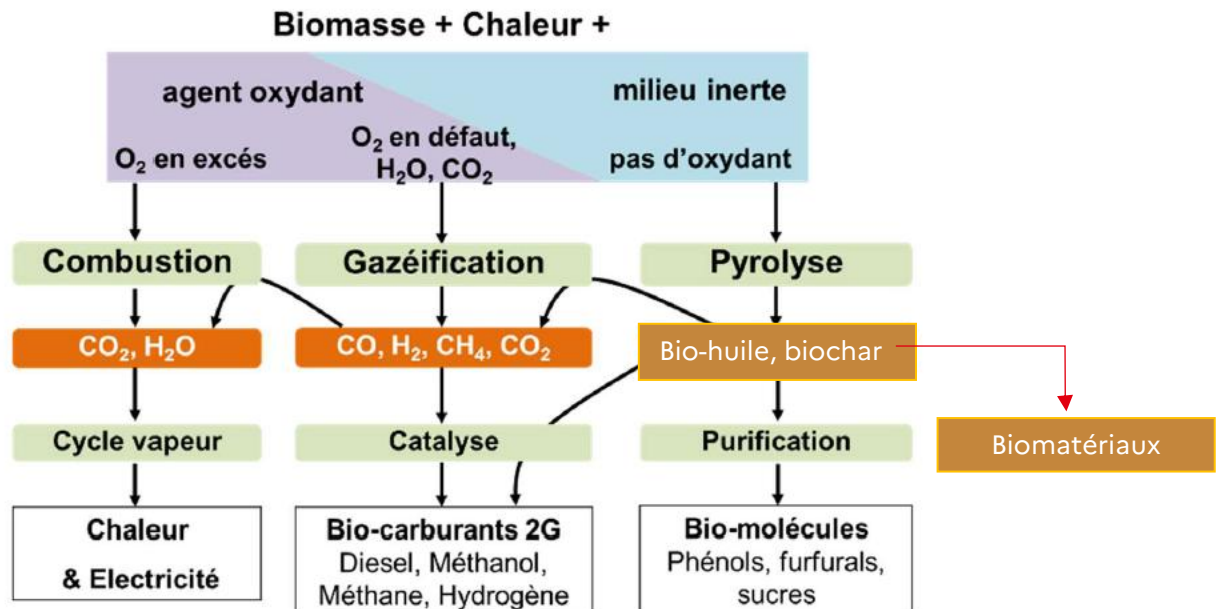


Figure 2. Conversion thermochimique de la biomasse : 1) Combustion, 2) Gazéification et 3) Pyrolyse (Adapté de Mauviel G.⁴)

La pyrolyse, sous l'effet de la chaleur et sous atmosphère inerte, convertit la biomasse (Figure 3) en gaz non condensables tels que CO, H₂, CO₂, H₂O, CH₄, acétylène (C₂H₄), etc., en composés condensables aromatiques, plus communément appelés goudrons et suies, et en charbon (résidu solide de la pyrolyse).

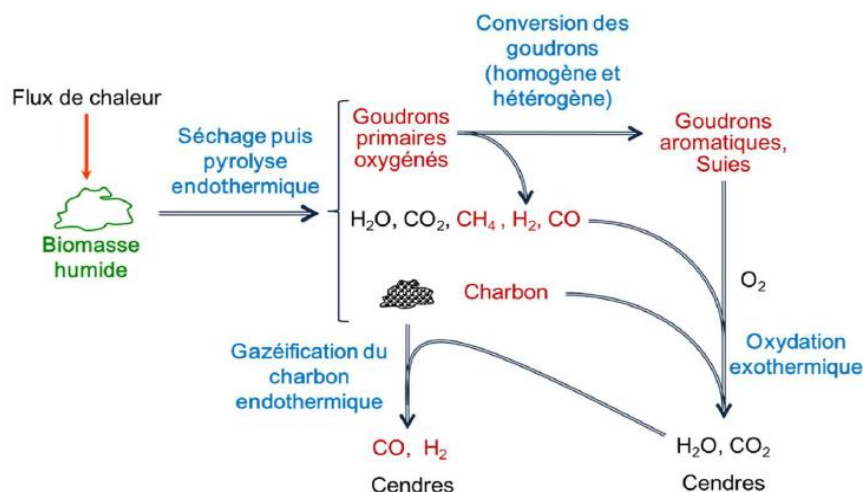


Figure 3. Réactions issues de la conversion thermochimique lors de la pyrolyse (Adapté de Mauviel G.⁴)

³ Les procédés par voie sèche sont ainsi nommés par opposition aux procédés par voie humide tels que les procédés hydrothermaux

⁴ Mauviel, Guillain. (2016). Modélisation de la conversion thermochimique de la biomasse. 10.13140/RG.2.2.23081.60006.

Le biochar et la cendre sont des produits différents (**Figure 3**). La cendre provient d'une combustion complète de la matière organique et ne contient que très peu de carbone. Elle est riche en minéraux (essentiellement calcium, magnésium, potassium).

Il existe différents types de pyrolyse, notamment, la pyrolyse lente avec un temps de séjour plus long qui vise principalement à produire du biochar ($\eta \sim 35\%$ pour cet exemple ci-dessous). La pyrolyse rapide est caractérisée par un chauffage rapide du bois et un temps de séjour faible (**Tableau 1**). Il faut noter que les rendements énergétiques vont varier en fonction des biomasses utilisées et des conditions opératoires du procédé.

Tableau 1. Exemple de caractéristiques et rendements des biochars en fonction des conditions opératoires de la pyrolyse⁵

Pyrolyse	Conditions	Liquide (%)	Biochar (%)	Gaz (%)
Rapide	T° ~ 500°C Temps de séjour ~1 s	75	12	13
Modérée	T° ~500°C Temps de séjour ~10 – 20 s	50	20	30
Lente	T°~500°C Temps de séjour : 5-30 min	30	35	35
Gazéification	T°>750°C Temps de séjour : 10-20 s	5	10	85

2.1 Les différences entre la pyrolyse et la pyrogazéification

La différence entre la pyrolyse et la pyrogazéification (ou gazéification) (**Figure 4**) réside dans les objectifs visés par le procédé industriel :

⁵ Biochar for Environmental Management : Science, Technology and Implementation. Edité par Johannes Lehmann & Stephen Joseph (2015)

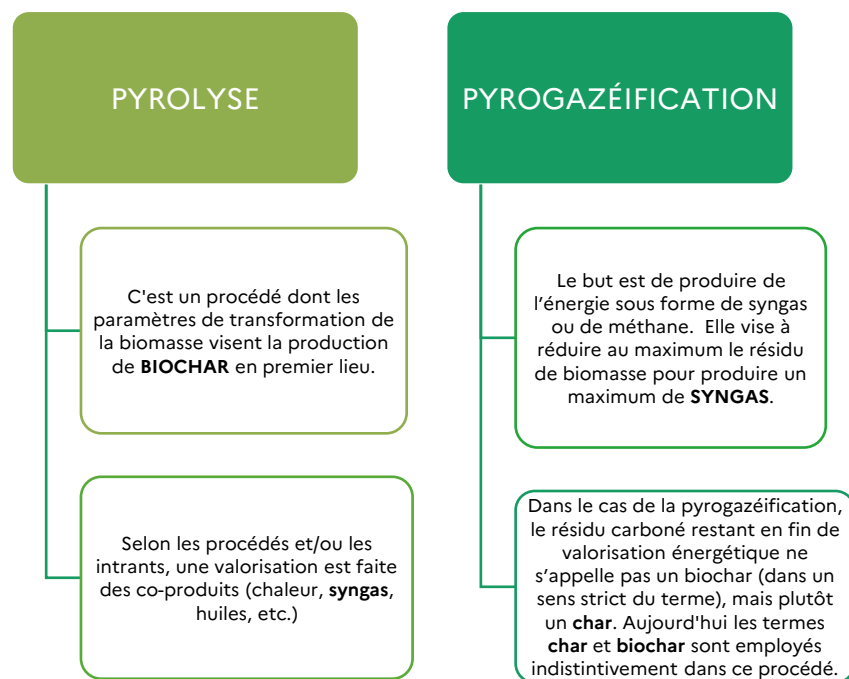


Figure 4. Les différences entre la pyrolyse et la pyrogazéification

Selon le procédé industriel de production et le type d'intrant employé, plusieurs types de biochars peuvent être obtenus avec des caractéristiques variables en fonction de l'usage final.

2.2 Les procédés hydrothermaux

Les procédés hydrothermaux sont basés sur la conversion de la biomasse en milieu aqueux et sans séchage préalable de la biomasse, et permettent d'aboutir à des produits en phases liquide, solide (**hydrochar**) et gazeuse⁶. **Ces procédés sont particulièrement adaptés** aux biomasses présentant un taux d'humidité élevé⁷.

Les procédés hydrothermaux exploitent les propriétés sous-critique ou supercritique de l'eau en tant que réactif, solvant et catalyseur pour convertir la biomasse en différents produits. Ainsi, la gazéification hydrothermale (GH) se réalise dans la zone supercritique de l'eau tandis que la liquéfaction hydrothermale et la carbonisation hydrothermale dans la zone sous-critique de l'eau.⁸

La pyrolyse a comme but principal la production de biochar tandis que la carbonisation hydrothermale va favoriser l'hydrochar comme produit principal.⁹ (**Figure 5**)

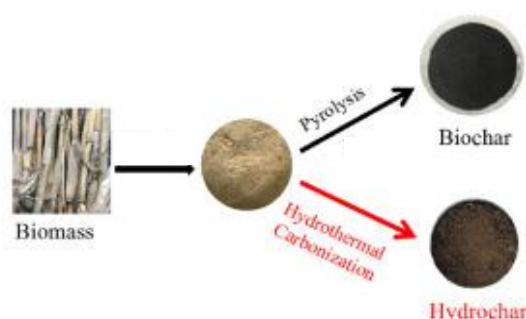


Figure 5. Procédés de production de biochar (pyrolyse) et d'hydrochar (carbonisation hydrothermale)
(Adapté de Liu Y.¹⁰)

3 Bilans énergétique et massique de la pyrolyse

L'énergie nécessaire à la production de biochars varie principalement en fonction du type de biomasse utilisé, de sa teneur en humidité initiale ainsi que des opérations intermédiaires à réaliser. La consommation énergétique et le rendement global peuvent par conséquent fortement varier.

Dans l'exemple ci-dessous (**Figure 6**), la biomasse transformée est du bois résineux présentant une teneur en humidité initiale de 50%. À la suite des différentes étapes intermédiaires, plusieurs produits sont obtenus ayant des contenus énergétiques différents : 25,56% de biochar et 32,9% de bio-huile. Il faut noter que cet exemple ne peut pas être généralisé, le besoin énergétique du procédé est majoritairement alimenté par la biomasse elle-même et le besoin énergétique supplémentaire est relativement modéré (12% environ).

⁶ Etat des lieux de la gazéification hydrothermale (2025). Note en cours (ADEME)

⁷ Huet, M. (2015). Valorisation hydrothermale de la liqueur noire à des fins énergétiques et de chimie verte (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).

⁸ Missaoui, A. (2018). Etude de la conversion de la biomasse en énergie par un procédé hydrothermal de carbonisation- Caractérisation des produits issus des grignons d'olive (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).

⁹ Masoumi, Shima, Venu Babu Borugadda, Sonil Nanda, and Ajay K. Dalai. (2021) "Hydrochar: A Review on Its Production Technologies and Applications" Catalysts 11, no. 8: 939. <https://doi.org/10.3390/catal11080939>

¹⁰ Liu, Y., Ma, S., & Chen, J. (2018). A novel pyro-hydrochar via sequential carbonization of biomass waste: Preparation, characterization and adsorption capacity. Journal of Cleaner Production, 176(Complete), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.090>

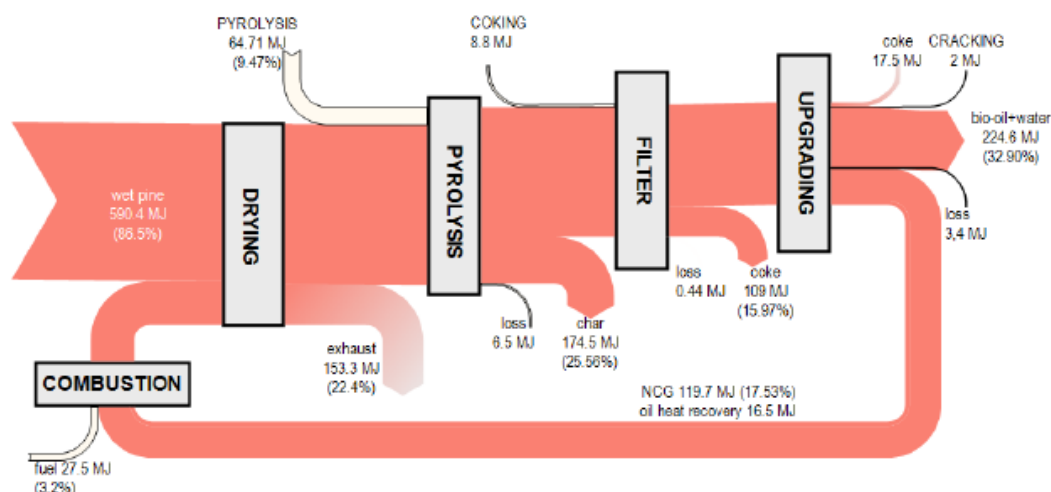


Figure 6. Diagramme de Sankey concernant les flux énergétiques pour la production de biochar¹¹

Dans un autre exemple, le bilan massique (**Figure 7**) de la biomasse à l'intérieur d'un réacteur de pyrolyse a été établi pour un flux initial de 500 kg/h : 64,27% de la biomasse est transformée en gaz (321,37 kg/h), 5,2% en huile (26,23 kg/h), 25,47% en biochar (127,33 kg/h) et 5% en cendres (25,07 kg/h).

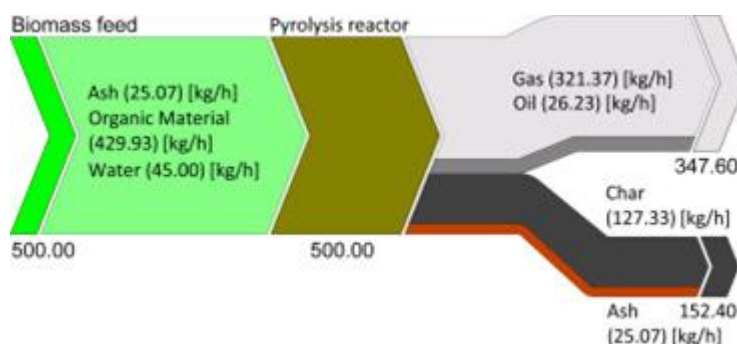


Figure 7. Bilan de masse réalisé pour la production de biochar par pyrolyse¹²

Comme dans l'exemple précédent, il s'agit d'un cas spécifique qui ne peut être généralisé.

¹¹ Nugrahany, Febryana. (2018). Modelling of biomass pyrolysis with ex-situ catalytic upgrading for biocrude production." Master theses. KTH Royal Institute of Technology, Sweden.

¹² A mass- and energy balance-based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon storage, Biomass and Bioenergy, Volume 120, 2019, Pages 281-290, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.019>.

4 Quelle biomasse pour la production de biochar ?

4.1 La caractérisation de la biomasse

La composition chimique, la structure et implicitement les propriétés finales du biochar dépendent du type et des caractéristiques de la biomasse utilisée pour les produire^{13,14,15,16} (sa composition, taille de particules, etc.) et des conditions de pyrolyse^{17,18,19,20,21,22} (le temps de séjour, la température, la vitesse de chauffe, le type de réacteur, et de son mode de fonctionnement : intermittent, semi continu, continu).

La biomasse (bois, plantes herbacées, algues, déchets organiques, etc.) est une structure hétérogène complexe composée de cellulose, de lignine et d'autres composants organiques (principalement C, H, N, S et O) et inorganiques qui peuvent représenter plus de 40 % du poids sec.

La variation de la matière première de pyrolyse, même si elle provient nominale d'une source unique, est probablement l'une des principales causes de variabilité du rendement et des propriétés du biochar.

La compréhension des mécanismes de production du biochar est essentielle pour adapter leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques et structurales à une application ciblée²³. Les propriétés mécaniques et de résistance au feu des biochars sont améliorées par des températures de pyrolyse élevées (> 500 °C), grâce à l'absence de matières volatiles et au développement de fortes liaisons covalentes C - C. Les propriétés mécaniques et de texture du biochar peuvent être contrôlées en faisant varier la taille des particules, la porosité et la température de pyrolyse (ex. pour la fabrication du charbon (bio)actif).

Les biochars (section 2.1) et les hydrochars (section 2.2) ont des propriétés chimiques et physiques différentes ; les hydrochars se caractérisent par des rapports H/C et O/C plus élevés que les biochars. En raison d'une structure moins aromatique et d'un pourcentage plus élevé de carbones labiles (facilement biodégradable), les hydrochars peuvent être plus facilement décomposés que les biochars, et par conséquent sont un peu moins adaptés pour un stockage de carbone de longue durée (stabilité du biochar sur 100 ans).

Le biochar est actuellement utilisé dans de nombreuses applications (voir la section 7.2), notamment l'amendement des sols, le traitement de l'eau, la production d'énergie, etc. Les applications les plus récentes concernent la production de piles à combustible et de supercondensateurs, l'élimination du goudron, l'absorption des polluants (ex. filtration de l'eau). **Chaque application demande des propriétés structurales et physico-chimiques spécifiques, intimement liées aux biochars considérés.**

¹³ Shackley, S & Sohi, S 2010, An Assessment of the Benefits and Issues Associated with the Application of Biochar to Soil: A report commissioned by the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs and Department of Energy and Climate Change

¹⁴ S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, C. G. Vassileva, Fuel, 2010, 89, 913

¹⁵ G. Song, L. Shen, J. Xiao, Data. Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50, 9758

¹⁶ M.W.I. Schmidt, J.O. Skjemstad, C.I. Czimczik, B. Glaser, K.M. Prentice, Y. Gelinas, T.A.J. Kuhlbusch, Global Biogeochemical Cycles 2001, 15 (1), 163

¹⁷ J. Lehmann & S. Joseph, 2009, Biochar for environmental management science and technology Earthscan Publications Ltd.

¹⁸ A. Selvarajoo, D.Oochit, Mater. Sci. Energy Technol, 2020, 3, 575

¹⁹ L. Wang, R. A. Khalil, J. Bakken, Ø. Skreiberg, Fuel, 2024, 370, 131667

²⁰ S. Vigneshwaran, R. Sundarakannan, K.M. John, R.D. Joel Johnson, K.A. Prasath, S. Ajith, V. Arumugaprabu, M. Uthayakumar, J. Clean. Prod. 2020, 277, 124109

²¹ E. Cardenas- Aguiar, G. Gasco, J. Paz-Ferreiro, A. Mendez, Int. Biodeterior. Biodegrad. 2017, 124, 223

²² S. J. Johannes Lehmann, Biochar for Environmental Management, Routledge, London, 2015

²³ V. Shanmugam, S.N. Sreenivasan, R. A. Mensah, M. Försth, G.Sas, M. S. Hedenqvist, R. E. Neisiany, Y. Tu, O; Das, Mater. Today Commun. 2022, 31, 103629

Ainsi, les propriétés du biochar doivent être adaptées à l'application ciblée, nécessitant au préalable une caractérisation détaillée du matériau :

4.1.1. Composition élémentaire

- ✓ Carbone Total et Carbone Organique
- ✓ Rapport H/C versus O/C
- ✓ Rapport C/N

4.1.2. Propriétés physico-chimiques

- ✓ Teneur en cendres minérales
- ✓ pH
- ✓ Capacité d'échange cationique (CEC)
- ✓ Conductivité électrique
- ✓ Densité

4.1.3. Caractérisation de la surface du biochar

Propriétés Physiques

- ✓ Surface spécifique
- ✓ Porosité
- ✓ Morphologie
- ✓ Capacité de rétention en eau

Propriétés Chimiques (fonctionnalisation)

- ✓ Contenu d'inertinite

Les composants organiques de la biomasse subissent une série de réactions de décomposition pendant le chauffage jusqu'à la température de pyrolyse et pendant la pyrolyse elle-même. À des températures relativement basses, ~120°C, l'humidité liée à la matière première est perdue. À des températures plus élevées (220 - 400°C), les hémicelluloses et la cellulose subissent une décomposition.²⁴ Les composants restants après cette décomposition affectent la réactivité et l'étendue de la modification ultérieure (au cours des étapes de traitement suivantes comme le cas du charbon actif). De même, les composants inorganiques de la matière première peuvent influencer la structure physique, en particulier à des températures de traitement plus élevées où les composants des cendres peuvent s'agglomérer ou réagir avec le réseau de carbone²⁵.

Il existe de nombreuses possibilités d'analyse physico-chimique pour caractériser et classer le biochar de manière plus complète. Les principales analyses sont présentées ci-dessous.

4.1.1. Composition élémentaire

Carbone Total (C_t) et Carbone Organique (C_{org})

L'une des propriétés les plus importantes du biochar est sa teneur relativement élevée en C organique (C_{org}) qui est principalement stocké dans des noyaux aromatiques condensés (qualifiés de récalcitrants) avec quelques groupes fonctionnels réactifs²⁶.

²⁴ H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. H. Lee, C. Zheng, Fuel, 2007, 86, 1781

²⁵ F. Ronsse, S. van Hecke, D. Dickinson, W. Prins, Global Change Biology Bioenergy, 2013, 5, 104

²⁶ G. Xu, Y. Lv, J. Sun, H. Shao, L. Wei Clean-Soil Air Water, 2012, 40, 1093

Lorsque l'on parle du carbone des biochars, il est important de faire la différence entre la teneur en carbone total (C_t) et la teneur en carbone organique (C_{org}) qui est la différence entre la teneur en carbone total (C_t) et la teneur en carbone inorganique (C_{inorg}).

La teneur en C_t des biochars peut varier considérablement (36-94 %), en fonction de la matière première et la température de pyrolyse, la teneur en C_t augmente avec les températures de pyrolyse^{27, 28}. Pour les biochars obtenus à partir de matières telles que le bois, le C_t varie entre 60 et 95 %, tandis que pour ceux obtenus à partir de matières comme les coquilles de noix le C_t varie entre 50 et 70 %.

Selon la norme EBC (European Biochar Certificate), pour qu'un matériau carboné puisse être nommé biochar, **son contenu en carbone total doit être ≥ 50 %, le rapport molaire $O/C_{org} < 0,4$ et le rapport molaire $H/C_{org} < 0,7$.**

La stabilité du biochar est liée à sa structure et peut être expliquée par le rapport molaire O/C_{org} . Les biochars les plus stables ont moins de groupes fonctionnels, par conséquent plus le rapport O/C_{org} est faible, plus le biochar sera stable (récalcitrant).²⁹

La stabilité à long terme du biochar n'est pas seulement liée au biochar lui-même, mais aussi à la façon dont il interagit et est stabilisé par son environnement (le climat, le sol, les microorganismes, etc.).

Rapport H/C versus O/C (Diagramme van Krevelen)

Pour mesurer les changements chimiques qui se produisent au cours de la pyrolyse, il ne suffit pas de comparer les contributions totales des éléments dans les biochars (C, H, O, N), mais également les contributions relatives des éléments comme : les rapports hydrogène/carbone (H/C), oxygène/carbone (O/C), hydrogène/oxygène (H/O), et carbone/azote (C/N).

Les rapports élémentaires H/C et O/C peuvent être utilisés pour prédire la structure chimique des biochars. Le rapport H/C est souvent utilisé comme indicateur de l'aromaticité et de la capacité à être minéralisé³⁰.

Les rapports H/C et O/C diminuent généralement avec l'augmentation des températures de pyrolyse, ce qui indique des biochars plus stables avec moins de groupes fonctionnels à base d'oxygène. La caractérisation structurale des biochars par RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) et analyses élémentaires sont nécessaires pour comprendre les spécificités des biochars provenant de différents matériaux et la manière dont ils peuvent être utilisés.

Rapport C/N

Le rapport C/N est utilisé pour prédire la minéralisation et la libération de l'azote dans les sols.³¹

Comme pour la plupart des propriétés chimiques des biochars, les valeurs du rapport C/N sont très variables et dépendent fortement du type de matière première.

²⁷ M. Keiluweit, P.S. Nico, M. G. Johnson, M. Kleber, Environmental Science & Technology, 2010, 44, 1247

²⁸ J. M. Novak, I. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K.C. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D.W. Watts, W.J. Busscher, H. Schmoert, Annals of Environmental Science 2009, 3, 195

²⁹ K. A. Spokas, Carbon Management, 2010, 1, 289

³⁰ K. Hammes, R. J. Smernik, J. O. Skjemstad, M. W. I. Schmidt Applied Geochemistry, 2008, 23, 2113

³¹ Il s'agit d'un indicateur du potentiel humique des résidus organiques classiques (résidus végétaux et déchets animaux), c'est-à-dire de la proportion d'humus stable qui se forme dans le sol après décomposition de la matière organique. Il est admis que, plus le rapport C/N d'un produit est élevé, plus il se dégrade lentement dans le sol. Agronomie (1997) 17, 157 – 171.

Par exemple, les biochars à base d'algues ont de faibles rapports C/N et les biochars à base de bois (résineux et feuillus) ont les rapports C/N les plus élevés.

La grande variabilité des rapports C/N des biochars de matières premières ligneuses est attribuée à la différence entre les rapports C/N des bois feuillus et des bois résineux, les biochars de bois résineux présentant des rapports significativement plus élevés.³²

Bien que la matière première soit la variable la plus importante en termes d'impact sur le rapport C/N du biochar, la température de pyrolyse influence également ce rapport, l'augmentation de la température de pyrolyse entraînant généralement une augmentation du rapport C/N pour une matière première donnée.

4.1.2. Propriétés physico-chimiques

Teneur en cendres minérales

La teneur en cendres reflète la teneur en éléments inorganiques de la matière première d'origine. Au cours des processus de pyrolyse et/ou de gazéification, C et O sont les principaux éléments perdus. Par conséquent, la teneur en cendres augmente généralement avec la température. La teneur en éléments inorganiques P, S, K, Ca, Mg, Na, Fe et Zn, varie en fonction des matières premières ³³, en particulier pour **celles qui contiennent des matières minérales (par exemple, la litière de volaille, le fumier de porc)**.

La teneur en cendres influe sur le pH du biochar, la conductivité électrique (CE) et la composition minérale ^{34, 35}.

En général, pour les biochars fabriqués à la même température, les biochars dérivés du bois ont une teneur en cendres très inférieure à celle des biochars non dérivés du bois tels que les déchets de biomasse, les graminées et les fumiers (**Tableau 2**).

Matière première	Fientes de volaille séchées	Bois de chêne
Cendres ATG ³⁶ (%)	22,5	0,7

Tableau 2. Quantité de cendres pour une pyrolyse effectuée à T = 500°C et à une vitesse de 10°C/min
(Rapport Qualichar, ADEME 2024)

pH des biochars

La plupart des biochars sont alcalins, avec un pH > 7, et leur utilisation augmente souvent le pH des sols acides et affecte la mobilité des cations dans le sol ³⁷.

Le pH augmente légèrement avec la température de pyrolyse (**Tableau 3**), et cette augmentation est due à l'augmentation associée de la teneur en cendres. Le pH du biochar est plus affecté par le type de

³² M. R. Saunders, S. Fraver, R. G Wagner, Silva Fennica, 2011, 45, 197
³³ QUALICHAR (ADEME Graine, 2020-2023) : Etude des qualités physico-chimiques et potentiels de valorisation des produits de la pyrolyse : biochars et huiles biosourcées (RITTMO-LRGP). Rapport final Mars 2024.
³⁴ J. Lehmann, M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday, D. Crowley, Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43, 1812
³⁵ M. A. Montes-Morán, D. Suárez, J. A. Menéndez, E. Fuente, Carbon, 2004, 42, 1219
³⁶ ATG = Analyse Thermo-Gravimétrique
³⁷ L. Van Zwieten, S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, Rust J., S. Joseph, A. Cowie, Plant and Soil, 2010, 327, 235

matière première que par la température de pyrolyse. Lorsque le biochar est produit à la même température, les matières premières non ligneuses (par exemple, le fumier, la canne de maïs et les algues) ont généralement un pH plus élevé que les matières premières ligneuses ³⁸.

Matière première	Ph	
	T pyro= 500 °C	T pyro=800 °C
Bois de chêne	7,8	9,3
Fientes de volaille séchées	10,3	10,7

Tableau 3. Ph en fonction de la matière première et la température de pyrolyse
(Rapport Qualichar, ADEME 2024)

La basicité du biochar provient de la présence de sels, tels que les carbonates et les chlorures de potassium et de calcium dans les cendres, en plus des groupes fonctionnels riches en oxygène, tels que les groupes de type γ -pyrone, chromène, dicétone ou quinone. Bien que la teneur en oxygène des matières premières diminue avec l'augmentation de la température de pyrolyse, la formation de composés tels que le lévoglucosan (issu de la pyrolyse de la cellulose (**Figure 8**)) et ses sous-produits (lévoglucosénone, furfural, 2,3-butanedione et 5-méthylfurfural) entraîne également la formation de groupes fonctionnels riches en oxygène ³⁹.

³⁸ Enders A., Hanley K., Whitman T., Joseph S., J. Lehmann, Bioresource Technology, 2012, 114, 644

³⁹ H. Kawamoto, M. Murayama, S. Saka, Journal of Wood Science, 2003, 49, 469

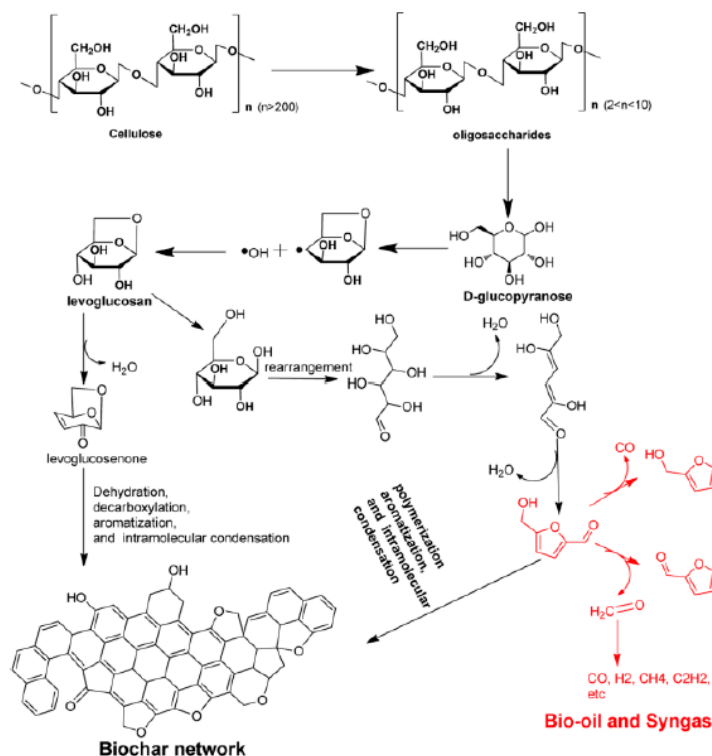


Figure 8. Mécanisme de formation du biochar par pyrolyse de la cellulose ⁴⁰

Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique est une mesure des cations échangeables (par exemple, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺). Les valeurs de CEC du biochar varient en fonction de la matière première et des conditions de pyrolyse.

Dans une étude comparant le biochar à base de plantes (bois et feuilles d'eucalyptus) et le biochar à base de fumier (litière de volaille et fumier de vaches laitières), une CEC plus élevée (**Tableau 4**) pour celui à base de fumier a été observée ⁴¹. Les résultats du projet Qualichar vont dans le même sens.

Il a également été démontré que la production par pyrolyse rapide donne un biochar avec une CEC plus élevée que la pyrolyse lente et la gazéification ⁴².

Matière première	CEC (μS/cm) T pyro= 500 °C	
	Pyrolyse lente	Pyrolyse rapide
Bois de chêne	81,7	95,1

⁴⁰ Asif, F.C.; Saha, G.C. Graphene-like Carbon Structure Synthesis from Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Feedstock–Process–Properties Relationship. C 2023, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/c9010031>

⁴¹ B. Singh, B. P Singh., A. Cowie, Australian Journal of Soil Research, 2010, 48, 516

⁴² Lee J.W., Kidder M., Evans B.R., Paik S., Buchanan Iii A.C., Garten C.T., Brown R.C., Environmental Science & Technology, 2010, 44, 7970

Fientes de volaille séchées	126,3	2 150
-----------------------------------	-------	-------

Tableau 4. CEC en fonction de la matière première et la vitesse de pyrolyse à T = 500 °C
(Rapport Qualichar, ADEME 2024)

Une CEC plus élevée peut résulter d'une surface spécifique élevée et de la présence de groupes carboxyles en surface ^{43,44}. La tendance à la baisse est attribuée à une perte de ces groupes fonctionnels acides avec l'augmentation de la température de pyrolyse ⁴⁵.

Conductivité électrique (CE)

La CE est une mesure de la capacité d'un matériau à conduire un courant électrique et est couramment utilisée comme indicateur de la salinité. Il a été démontré que la CE du biochar est davantage corrélée au type de matière première qu'à la température de pyrolyse, car elle dépend prioritairement de la teneur en cendres et de la composition élémentaire ^{46, 47}.

Comme mentionné, les biochars non issus de fumier ont généralement une teneur en cendres plus faible que les biochars issus de fumier, et il en va de même pour les valeurs de CE. Les valeurs élevées de CE sont associées aux grandes quantités de sels solubles généralement présents dans ces matières premières (fumiers). Les effets de la température de pyrolyse sont un peu moins concluants.

Densité

Deux types de densité sont généralement utilisés pour décrire les biochars. **La densité solide** (également appelée densité vraie ou densité squelettique) représente la densité du biochar au sein des phases solides à l'échelle moléculaire. **La densité apparente** (ou **masse volumique apparente**) représente la densité d'un volume plus important de particules de biochar et inclut les phases solides, les pores des particules et les vides interparticulaires. Les deux termes prennent en compte la masse du matériau biochar mais diffèrent sur le paramètre du volume.

Ces deux densités sont généralement inversement proportionnelles : une augmentation de la densité solide est souvent corrélée à une diminution de la densité apparente, car la densification au niveau moléculaire entraîne une augmentation de la porosité pour des traitements thermiques inférieurs à 700 °C. À des températures très élevées, la densité apparente des biochars augmente et le degré de porosité diminue en raison de l'effondrement des pores ⁴⁸.

La perte de composés volatils de la matière première et l'augmentation simultanée de la fraction de phases cristallines de type graphite entraînent une augmentation de la densité solide due à un tassement structural efficace des phases graphites par rapport aux matières premières d'origine ⁴⁹. La densité solide augmente avec la température du procédé et du temps de séjour.

⁴³ S. P. Sohi, E. Krull, E. Lopez-Capel, R. Bol, A review of biochar and its use and function in soil, Chapter 2, 2010, In: L.S. Donald (Ed.), *Advances in Agronomy*, Academic Press, San Diego, CA, pp. 47–82

⁴⁴ C.-H. Cheng, J. Lehmann, J. E. Thies, S. D. Burton, M. H. Engelhard, *Organic Geochemistry*, 2006, 37, 1477

⁴⁵ Y. Guo, D. A. Rockstraw, *Microporous and Mesoporous Materials* 2007, 100, 12

⁴⁶ S. D. Joseph, M. Camps-Arbestain, Y. Lin, P. Munroe, C. H. Chia, J. Hook, L. van Zwieten, *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48, 501

⁴⁷ S. Rajkovich, A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A. Zimmerman, J. Lehmann, *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48, 271

⁴⁸ J. Pastor-Villegas, J. F. Pastor-Valle, J. M. Meneses Rodríguez, M. García, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 76, 103
Cité dans <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/6074>

⁴⁹ F. G. Emmerich, J. C. Sousa, I. L. Torriani, C. A. Luengo, *Carbon*, 1987, 25, 417

La densité du biochar dépend de la matière première et du procédé de production, la première ayant un impact plus important. Par exemple, une étude portant sur plusieurs biochars produits par pyrolyse lente a montré que le type de matière première avait un impact plus important sur la densité apparente du biochar, comparé à la température de pyrolyse. Le biochar issu de cannes de maïs, de bois et de fumier de vache laitière présentait une densité apparente comparativement plus faible que le biochar produit à partir de déchets alimentaires, de coques de noix et de fumier de volaille avec de la sciure. Les valeurs varient généralement de 1,4 à 1,7 g/cm³, bien que des valeurs plus élevées, proches de 2 g/cm³, aient été rapportées ^{50,51}.

Une résistance mécanique supérieure du biochar est associée à une densité solide plus élevée. Cette association résulte d'une structure plus organisée et d'une concentration plus élevée de phases cristallines dans les biochars, résultant généralement d'une pyrolyse plus importante. **La résistance mécanique est fréquemment utilisée pour définir la qualité des charbons actifs, car les matériaux à haute résistance supportent mieux les charges appliquées, par exemple dans un réacteur catalytique ou une colonne de filtration.** Les charbons actifs dérivés de coques de noix et de noyaux de fruits présentent souvent une résistance et une dureté élevées. Ces propriétés seraient dues à la teneur élevée en lignine et à la faible teneur en cendres de ces matières premières ⁵².

4.1.3. Caractérisation de la surface du biochar

Les rôles potentiels du biochar dans la séquestration du carbone, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la rétention d'eau et la sorption des contaminants dépendent largement des propriétés de surface du biochar. Par conséquent, de nombreuses études ont été menées sur les propriétés physiques et chimiques du biochar afin d'élucider les mécanismes potentiels.

Propriétés Physiques

Surface spécifique

La surface spécifique Brunauer-Emmett-Teller (BET) est la surface par gramme d'échantillon et est généralement mesurée par la sorption d'une monocouche d'un gaz (N₂ et CO₂) sur la surface du biochar à la température de l'azote liquide (77 K).

Il existe une corrélation positive entre la surface spécifique (SSA – specific surface area) et la température de pyrolyse (**Figure 9**) ⁵³.

Pour certaines matières premières, cette relation n'est pas vérifiée à des températures plus élevées, probablement en raison de la perte de structure microporeuse due à la déformation plastique, au frittage ou à la fusion. Cet écart dépend des conditions de production, notamment la vitesse de chauffage, la pression et le temps de rétention⁵⁴.

⁵⁰ A. Downie, A. Crosky, P. Munroe. Physical properties of biochar. In: J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, 2009, London, UK, p 13

⁵¹ P. H. Emmett, Chemical Reviews, 1948, 43, 69

⁵² A. Aygun, S. Yenisoy-Karakas, N. I. Duma, Microporous and Mesoporous Materials, 2003, 66, 189

⁵³ R. S. Kookana, A. K. Sarmah, L. Van Zwieten, E. Krull, B. Singh, Advances in Agronomy, 2011, 112, 103

⁵⁴ Y. Chun, G. Sheng, C.T. Chiou, B. Xing, Environmental Science & Technology, 2004, 38, 4649

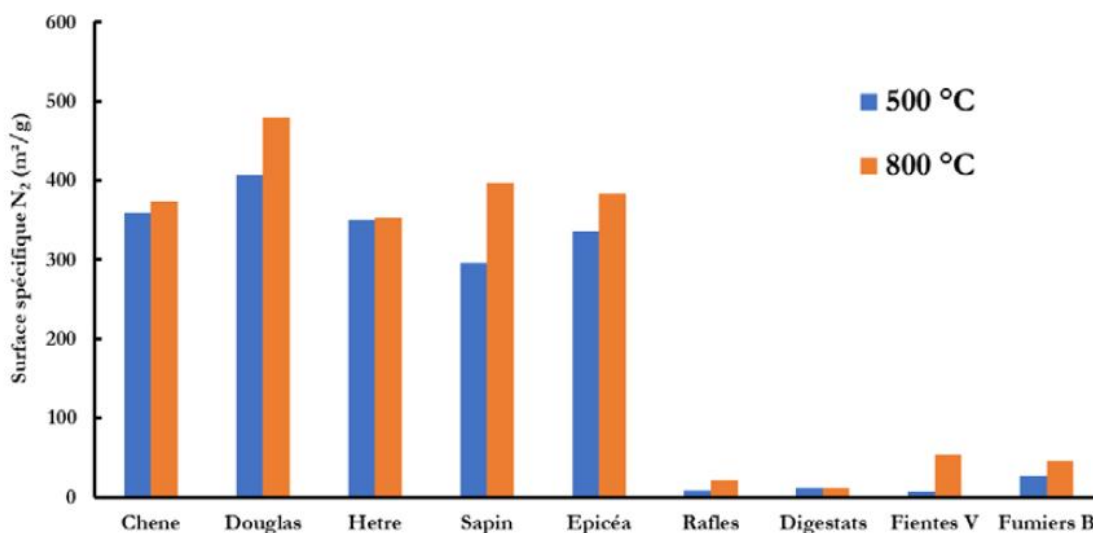


Figure 9. Valeurs des surfaces spécifiques (m²/g) obtenues en fonction de la température pour les biochars de pyrolyse rapide par la méthode BET (N₂)
(Rapport Qualichar, ADEME 2024)

La **Figure 9** présente les valeurs des surfaces spécifiques en fonction de la température pour les biochars de pyrolyse rapide par la méthode BET (N₂). Les valeurs obtenues pour les biomasses lignocellulosiques (chêne, douglas, hêtre, sapin et épicéa) sont plus importantes par rapport à celles des Rafles (matière lignocellulosique avec minéraux) et des biomasses non-lignocellulosiques (digestats, fientes et fumiers).

Porosité

La porosité concerne les zones de la particule de biochar qui ne sont pas remplies, c.à.d. la quantité de vides ⁵⁵. Elle provient de deux sources principales : les macropores et les micropores.

Les macropores (> 2 nm) proviennent de la structure vasculaire de matières premières (c.à.d. la biomasse) ; les micropores, plus abondants, proviennent des vésicules de gaz qui se forment lors du processus de production, suite au dégagement de gaz dû aux vitesses et aux temps de chauffage, ainsi qu'à la température de pyrolyse ⁵⁶.

⁵⁵ C. E. Brewer, V. J. Chuang, C. A. Masiello, H. Gonnermann, X. Gao, B. Dugan, L. E. Driver, P. Panzacchi, K. Zygourakis, C. A. Davies, Biomass and Bioenergy, 2014, 66, 176

⁵⁶ J. Pastor-Villegas, J. F. Pastor-Valle, J. M. Meneses Rodríguez, M. García García, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2006, 76, 103

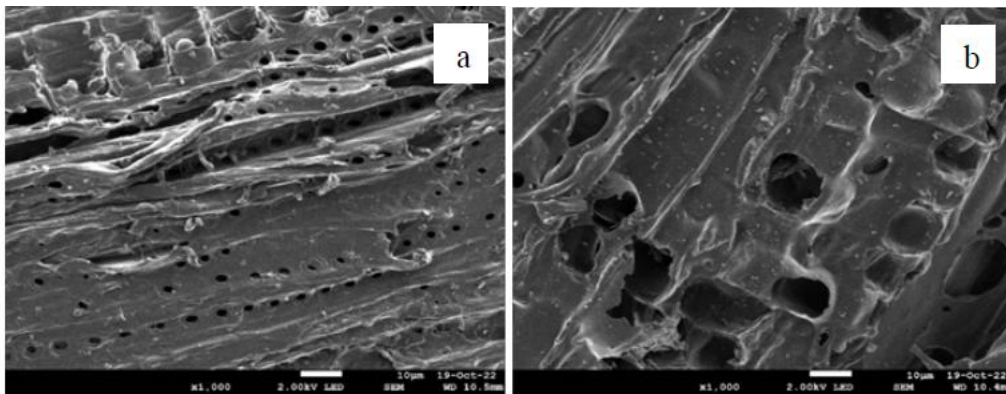


Figure 10. MEB des biochars de douglas obtenus par pyrolyse rapide à a 500 °C et b 800 °C
(Rapport Qualichar, ADEME 2024)

Les clichés de microscopie électronique à balayage (MEB) des biochars d'origine lignocellulosique (**Figure 10**) montrent que, pour une température de pyrolyse de 500°C, le biochar obtenu présente encore une structure similaire à la biomasse initiale (a). Pour une température de pyrolyse égale à 800°C, la biomasse change d'aspect et laisse apparaître une structure squelettique (b). En effet, la texture de surface devient de moins en moins lisse et laisse apparaître une porosité importante.

Les micropores sont responsables de la forte capacité de sorption (rétention d'eau, de gaz, de métaux lourds, de matières organiques et de nutriments) de la plupart des biochars. Il a été démontré que le biochar possède de nombreux pores de l'ordre du nanomètre, **essentiels aux interactions chimiques** ⁵⁷.

Morphologie

La morphologie est une mesure globale de la taille, de la forme et de la structure du biochar. Cette caractéristique est généralement obtenue sous forme d'image de la surface du biochar et varie en fonction de la température de pyrolyse et du type de matière première. Les images de surfaces de biochar de différentes matières premières présentent de nombreux micro- et macropores⁵⁸.

Les images MEB (microscopie électronique à balayage) du biochar de bois de pin pyrolysé à 300 et 900 °C montrent d'importantes différences de taille des pores du biochar lorsque la température augmente. Ces pores se forment à partir de vésicules de gaz produites lors de la pyrolyse. Il en résulte une augmentation avec la température de la porosité et de la surface.

Les biochars dérivés du bois présentent généralement de larges surfaces planes issues du tissu lignocellulosique végétal de la matière première d'origine, ce qui donne naissance à de larges pores. Les biochars non dérivés du bois, comme le biochar de coques d'amandes, présentent généralement des pores plus petits, une macrostructure plus faible et davantage de particules de cendres ou de suie.

Capacité de rétention en eau (CRE)

La matière première détermine les macropores résiduels du biochar et la température de pyrolyse détermine les nanopores pyrogènes. La CRE est directement affectée par la surface interne élevée et les

⁵⁷ M. J. Antal, M. Gronli, Ind. Eng. Chem. Res., 2003, 42, 1619

⁵⁸ D. Özçimen, A. Ersoy-Meriçboyu, Renewable Energy, 2010, 35,1319

macropores résiduels, car ces pores sont les premiers à être remplis par l'eau. Les pores plus petits peuvent être remplis par les forces capillaires.⁵⁹

Propriétés Chimiques (fonctionnalisation)

Les connaissances spécifiques sur la chimie des groupements fonctionnels du biochar sont essentielles pour prédire et comprendre comment un biochar donné réagira avec son environnement.

Dans le cadre de cette caractérisation, la connaissance de la teneur en groupes fonctionnels du biochar est essentielle. Bien que l'analyse élémentaire soit importante, elle ne fournit pas d'informations directes sur la nature des fonctions chimiques associées aux éléments présents dans l'échantillon. Pour obtenir des informations sur les liaisons moléculaires au sein du biochar, une série d'outils d'analyse spectroscopique est utilisée.

Ces approches analytiques incluent le plus souvent les spectroscopies infrarouges à transformée de Fourier (FTIR), Raman et par résonance magnétique nucléaire (RMN). Pour déterminer l'aromaticité du biochar, la spectrométrie Raman ou RMN est préférable.

Les biochars fonctionnalisés avec des groupes carboxyles et hydroxyles ont une CEC plus élevée et une capacité de sorption élevée pour les cations et les métaux. Les biochars hautement aromatiques sont plus hydrophobes et présentent une forte affinité pour une large gamme de composés organiques, en particulier ceux à faible solubilité aqueuse. De même, la teneur en groupes fonctionnels détermine la manière dont les biochars interagiront avec l'hydrogène du sol et donc son pH.

La connaissance des groupes fonctionnels présents permet de sélectionner les biochars en fonction de l'utilisation ciblée et des impacts souhaités.

Contenu d'inertinite⁶⁰

La forme de carbone la plus stable (macérale) identifiable au microscope et issue de la carbonisation naturelle de la biomasse est appelée inertinite⁶¹. L'inertinite est constituée de carbone polyaromatique condensé et est chimiquement inerte. Si une biomasse est pyrolysée à une température suffisamment élevée, généralement d'environ 550 à 600 °C ou plus, et avec des temps de séjour plus longs, le biochar est comparable à l'inertinite. La stabilité de la structure du carbone dépend du degré d'aromatisation et de condensation, qui est principalement contrôlé par la carbonisation maximale. Cette température peut être évaluée par des mesures aléatoires de réflectance (Ro) de l'inertinite, car la réflectance augmente avec la température de carbonisation. Récemment, une valeur de Ro = 2 % a été proposée comme « référence d'inertinite » (IBRo2 %) pour le biochar. Autrement dit, **un biochar dont la distribution totale de Ro est supérieure à 2 % est considéré comme non dégradé et persistant à long terme dans le sol.**

59 Adhikari, Sirjana and Mahmud, M. A. Parvez and Nguyen, Minh Duc and Timms, Wendy, Evaluating Fundamental Biochar Properties in Relation to Water Holding Capacity. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4356539> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4356539>

60 Arka Rudra, Henrik I. Petersen, Hamed Sanei, Molecular characterization of biochar and the relation to carbon permanence, International Journal of Coal Geology, Volume 291, 2024, 104565, ISSN 0166-5162

61 Une inertinite est un macéral, de la matière organique oxydée ou du charbon fossilisé.
<https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/12371/maceral>

Conclusions sur la caractérisation des biochars

Les propriétés physico-chimiques des biochars dépendent fortement des caractéristiques de la biomasse d'origine et des paramètres de pyrolyse.

La température du procédé et la vitesse de chauffage sont des paramètres particulièrement importants pour déterminer la structure finale du biochar.

D'autres travaux de recherche, avec des variations contrôlées des paramètres du processus et des méthodes de caractérisation complémentaires, sont toujours nécessaires pour obtenir des relations prédictives entre, d'une part, les matières premières du biochar et les conditions de traitement de la pyrolyse, et d'autre part, les propriétés physico-chimiques et texturales du biochar produit.

4.2 Quel type de biomasse

Le biochar peut être obtenu à partir d'intrants **très variés** tels que les résidus et rémanents de bois issus de la sylviculture ou de l'industrie du bois, mais aussi issus de l'agriculture (fumier, paille, résidus de cultures sèches comme les coques de grains de café) ou de déchets (bois B⁶²). Les CSR⁶³, les pneus, les PET⁶⁴ et les boues d'épuration sont également utilisables pour la production de biochars.

L'utilisation de déchets pour la production de biochars est à prendre avec précaution car il y a un risque de pollution qui peut provenir des métaux lourds et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)⁶⁵ les rendant inappropriés pour certaines applications (exemple production de Silicium (Si)).

Les caractéristiques morphologiques et chimiques (**Tableau 5**) des biochars dépendent, entre autres, du type d'intrant. Les résidus de pyrolyse sont principalement composés de carbone dont la quantité varie en fonction de l'intrant (voir exemple ci-dessous).

Tableau 5. Composition chimique et rendements de biochar (%) après une pyrolyse à T=800°C (Sabogal et al. (2022)⁶⁶)

Intrant	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Cendres (%)	Biochar (%)
Bois	75,9	1	0,6	0,1	12,5	10,0	18
Carton	44,5	1,1	0,5	0,1	13,2	40,1	15
PET	87	1,4	0,2	0,1	9,2	2,0	11
CSR	36	1,3	1,0	1,0	11	49,7	18

⁶² Les bois de classe B correspondent à des déchets de bois traités, peints ou vernis. Ils contiennent donc des substances chimiques (colles, finition, etc.).

⁶³ CSR (combustibles solides de récupération) : sont des combustibles fabriqués à partir de déchets issus des déchets ménagers. Ils sont des déchets ménagers, non dangereux et classifié par la norme Européenne NF EN 15359. Un CSR est composé de plastiques, de bois, de métaux, de textiles, de mousse, de papiers / cartons, de pneumatiques / élastomères et de polystyrène.

⁶⁴ Polytéraphthalate d'éthylène

⁶⁵ Allaire SE, Lange SF, Auclair IK, Quinche M, Greffard L (The Char Team) (2015) Rapport : Analyse des propriétés de biochars. CRMR-2015-SA-3. Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 61 p.

⁶⁶ Sabogal, O. S. (2022). Pyrolysis and gasification of a solid recovered fuel (SRF) and its model materials (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux). (NNT: 2022EMAC0007). (tel-03771696)

4.3 Les verrous concernant le développement de la filière biochar

Le choix des biomasses⁶⁷ pour la production de biochars est lié à plusieurs paramètres, notamment aux enjeux environnementaux pour la génération de combustibles gazeux, liquides et solides qui se substituent respectivement au gaz naturel et aux combustibles liquides élaborés directement à partir du pétrole.

De ce fait, si une filière biochar devait se mettre en place, plusieurs verrous seraient à lever :

- **Disponibilité durable de la biomasse** : nécessité d'avoir une vision systémique des intrants et globale sur l'usage concernant la biomasse lors du développement de nouvelles filières comme celle du biochar. Une planification de la mobilisation de la biomasse doit répondre aux besoins identifiés à l'échelle locale et nationale tout en préservant les écosystèmes naturels, agricoles et forestiers⁶⁸. Cependant, une récente étude⁶⁹ sur les gisements de bois B a montré que la disponibilité de cette ressource reste limitée. Par exemple, les cellules biomasse régionales jouent un rôle important dans l'analyse et l'évaluation des plans d'approvisionnement et des risques de concurrence d'usage entre les projets qui mobilisent des volumes importants de biomasse. A l'échelle nationale, l'ADEME travaille avec d'autres organismes sur le partage des données et des méthodes pour renforcer l'analyse systémique de la biomasse. Un groupement d'intérêt scientifique sur la thématique de la biomasse (GIS Biomasse) a été initié début 2024⁷⁰. Il constitue une instance publique de référence sur la biomasse (ressources et usages), et qui a vocation à venir en appui aux politiques publiques.
- **Question sur les applications du biochar** : qu'il s'agisse de la production d'énergie ou de l'élaboration de matériaux, il existe une approche commune qui consiste à mieux connaître la variabilité des diverses propriétés physiques, chimiques et structurales de la biomasse ligneuse afin d'en tirer profit dans l'affectation des ressources. D'une manière récurrente, nous devons nous préoccuper des incidences de la variabilité des ressources sur les procédés de conversion/transformation/séparation ainsi que sur la qualité des produits obtenus en vue d'opérer les meilleures mises en adéquation biomasse/procédés et biomasse/produits.⁷¹
- **Question sur la logistique du biochar** : le transport, la préparation, le stockage et la qualité de produits à partir de biochar seront à prendre en compte. En effet, lors de l'application de biochar ou des opérations de labour, des microparticules peuvent être transportées par le vent.⁷²

⁶⁷ List of biomass feedstock. Juin 2025. <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents>

⁶⁸ Avis de l'ADEME 2024 : la biomasse, enjeu stratégique de la transition écologique. En ligne : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/6860-biomasse-enjeu-strategique-de-la-transition-ecologique.html>

⁶⁹ ADEME : Étude de gisement des déchets de bois dans la filière bois / bois énergie. Juillet 2024.

⁷⁰ <https://agriculture.gouv.fr/sia2024-lancement-dun-groupement-dinteret-scientifique-gis-en-faveur-de-la-biomasse>

⁷¹ Rousset Patrick (2014) Pyrolyse basse température de biomasses lignocellulosiques pour une co-valorisation énergie/matière. Nancy : Université de Lorraine, 123 p. Habilitation à diriger des recherches : Université de Lorraine

⁷² Thierry Caquet, Monique Axelos, Jean-François Soussana, Eric Martin, Pierre Renaul. 2024. Enjeux agronomiques, techniques et économiques d'une mobilisation accrue des différents gisements de biomasse et de leur transformation en bioénergies. INRAE. 2024. (hal-04530404)

5 La plus-value environnementale d'une filière biochar

5.1 Le biochar, une solution de stockage de carbone ?

Le sol contient deux fois plus de carbone que l'atmosphère et la biomasse végétale réunies. Augmenter le temps de résidence du carbone dans le sol constitue un moyen de réduire massivement les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère et donc de contribuer à l'atténuation du changement climatique.⁷³

Les plantes transforment l'énergie solaire en matière organique par la transformation du CO₂ atmosphérique en « sucres » grâce à la photosynthèse. La matière lignocellulosique est principalement constituée de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), de soufre (S) et de matière inorganiques (Si, K, Na, Ca, Mg, ...). Les constituants de la biomasse sont un stock de matière carbonée qui peut être valorisée par transformations biochimiques ou par transformations thermochimiques en énergie (chaleur, électricité), carburants (ex : bio-huiles, biogaz) ou molécules chimiques à forte valeur ajoutée (phénols) (**Figure 2**).

Ainsi, grâce à ce procédé, le carbone capté par les végétaux est piégé. La connaissance de la stabilité et de la vitesse de dégradation du biochar sont fondamentales. On peut citer par exemple Wang⁷⁴ qui a estimé que le temps de résidence du biochar dans le sol est de 556 ans.

Selon certaines études⁷⁵, l'efficacité de la séquestration du C dépend du rendement de la pyrolyse et de la stabilité du biochar dans le sol. 25 à 50 % du carbone initialement présent dans la matière première pour la pyrolyse resterait dans le sol après 100 ans. L'efficacité de séquestration du C la plus élevée serait obtenue pour des températures de pyrolyse de 500 à 550 °C.

D'autre part, des travaux ont déterminé qu'**une tonne de biochar permet de séquestrer 2 à 3 tonnes de CO₂ équivalent sur un horizon de cent ans.**^{76, 77}

Dans les scénarios ADEME Transitions 2050, deux types de puits sont considérés : les puits dits « naturels » intégrant l'impact des changements d'affectation des sols, des pratiques agricoles et de la gestion forestière sur les stocks de carbone dans les sols et la biomasse (végétaux, produits bois...) ; les puits dits « technologiques » liés aux technologies de captage et de stockage géologique de carbone (BECCS⁷⁸, DACCS⁷⁹). Aucun levier anthropique d'accroissement du puits dans les milieux marins et littoraux n'a pu être pris en compte en l'absence de références nationales. **Les matériaux à base de minéraux pouvant séquestrer le CO₂ (hors produits bois), les produits biosourcés et les amendements (biochars, silicates) n'ont pas été inclus en raison du manque de données et d'études permettant d'évaluer leur potentiel**

⁷³ Abiven, Samuel. (2011). Le biochar : une nouvelle technique pour séquestrer du carbone et augmenter la fertilité du sol ? 10.5167/uzh-51356.

⁷⁴ Wang J., Xiong Z., Kuzyakov Y., 2016. Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects. GCB Bioenergy, 8, 512–523. <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12266> (Cité dans la réf. 17)

⁷⁵ Rodrigues, Leonor & Budai, Alice & Elsgaard, Lars & Hardy, Brieuc & Keel, Sonja & Mondini, Claudio & Plaza, César & Leifeld, Jens. (2023). The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice. European Journal of Soil Science. 74. 10.1111/ejss.13396.

⁷⁶ Thierry Caquet, Monique Axelos, Jean-François Soussana, Eric Martin, Pierre Renaul. 2024. Enjeux agronomiques, techniques et économiques d'une mobilisation accrue des différents gisements de biomasse et de leur transformation en bioénergies. INRAE. 2024. (hal-04530404)

⁷⁷ Enjeux et potentiels du développement de la filière biochar en France
https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/2024.06.27_Note-position-France-BIOCHAR_VF.pdf

⁷⁸ BECCS : Combinaison de bioénergie et de piégeage et stockage du carbone (en anglais BE+CCS=BECCS)

⁷⁹ La capture directe de l'air avec stockage du carbone (DACCS) est une technologie qui utilise des procédés chimiques pour capturer et séparer le dioxyde de carbone (CO₂) directement de l'air ambiant. Le CO₂ est ensuite séparé des produits chimiques et capturé afin de pouvoir être injecté dans des réservoirs géologiques ou utilisé pour fabriquer des produits durables.

au niveau français. Des études en analyses de cycle de vie conséquentielles seraient également nécessaires pour préciser l'impact de leur développement sur le climat (ADEME Transitions 2050).

L'évaluation de l'impact de la production des biochars est encadrée dans la norme European Biochar Certificate (EBC) qui exige un bilan GES prenant en compte les émissions liées à :

- La croissance de la biomasse (cas particulier : en cas de résidu, aucune émission de croissance de la biomasse n'est attribuée aux systèmes de biochar)
- Au transport et stockage
- La conversion en biochars
- L'application
- Au stockage final (sol) (taux de dégradation de 0,3% par an pour les biochars de qualité EBC)

5.2 Focus sur l'impact du puits forestier

On estime que près de 50 % du carbone organique des sols est présent dans les horizons profonds au-delà de 30 centimètres de profondeur. Ce carbone peut être affecté par les changements d'occupation des sols et les pratiques agricoles et sylvicoles. Ce compartiment pourrait représenter un potentiel de stockage additionnel significatif. Des travaux de recherche sont nécessaires pour mieux appréhender ce potentiel.⁸⁰

En effet, une augmentation des prélèvements aura un effet sur la fonction de puits de la forêt et du sol. **L'enjeu est donc de trouver un équilibre entre ces différents leviers.** On observe ces dernières années une croissance forestière plus faible et une mortalité beaucoup plus élevée (ravageurs, sécheresses, incendies, tempêtes). Les connaissances progressent sur l'évolution du puits de carbone en forêt, sur l'impact potentiel de différents niveaux de mobilisation des ressources forestières mais également sur **la qualité de cette ressource.** Les dernières estimations ont mis en évidence une division par 2 du puits forestier en 10 ans (c'est-à-dire une diminution de la capacité de la forêt à capter le CO₂ de l'atmosphère). Il apparaît essentiel d'accompagner l'adaptation de la sylviculture pour développer une forêt plus résiliente aux effets du changement climatique.

5.3 Technologies de CDR (Carbon Dioxide Removal : le captage et la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂)).

Pour rappel, l'élimination du CO₂ atmosphérique, ou Carbon Dioxide Removal (CDR), fait référence au captage et la séquestration du CO₂ présent dans l'atmosphère par l'intervention humaine. Elle se distingue de la séquestration naturelle (photosynthèse) par le fait qu'elle est la conséquence d'une action volontaire de l'être humain (par exemple, la reforestation, le changement de pratiques agricoles, ...). La pyrolyse est la voie privilégiée pour la fabrication de biochar au niveau mondial. Une étude (**Figure 11**) a quantifié la contribution potentielle du biochar au niveau mondial à la réduction des émissions de CO₂ atmosphériques et a confirmé que le biochar peut jouer un rôle dans les stratégies de CDR. Les résultats sont présentés dans le graphique ci-dessous :

⁸⁰ Carbone organique des sols, L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. ADEME. 2014.

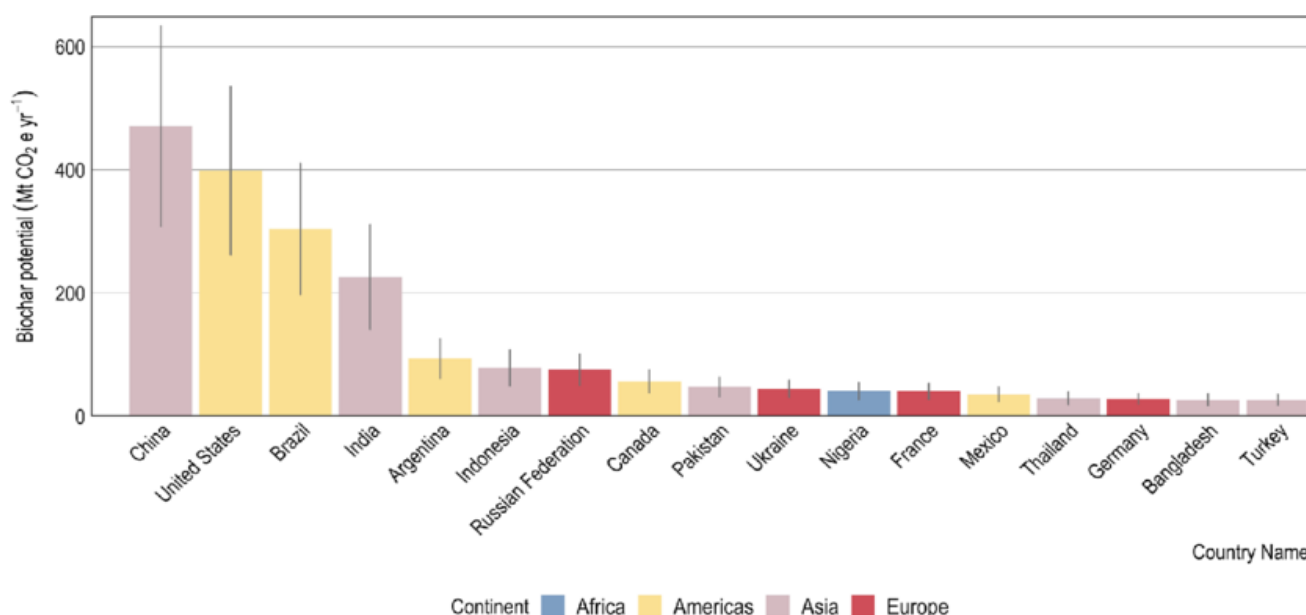


Figure 11. Les pays avec un CDR (Carbon dioxide removal) > 25 Mt CO₂/an⁸¹

Au niveau européen, des travaux sont engagés par la commission européenne pour mettre en place un système de certification des crédits carbone pour cadrer le marché carbone volontaire⁸². Également, un document sur les spécifications techniques pour la certification des séquestrations permanentes de carbone par le biochar a été publié⁸³.

D'autre part, le GIEC estime 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.⁸⁴

6 Les marchés du biochar

6.1 En Europe et au niveau mondial

Un recensement des unités de biochars en fonctionnement en Europe a été réalisé par l'European Biochar Industry Consortium (EBI)⁸⁵ : 171 unités de production de biochars en Europe ont été comptabilisées en 2023. Elles devraient monter à 220 d'ici fin 2024 (**Figure 12**). Il est évoqué dans ce rapport qu'environ 40 nouveaux projets sont en préparation en 2025 ; 78% ont des capacités annuelles de production de biochar et sont distribuées entre les catégories entreprises médium (200-499t), grandes (500-1999t) et très grandes (2000-4999t). Le reste se répartit entre industrielles (> 5000t) et petites (100-199t).

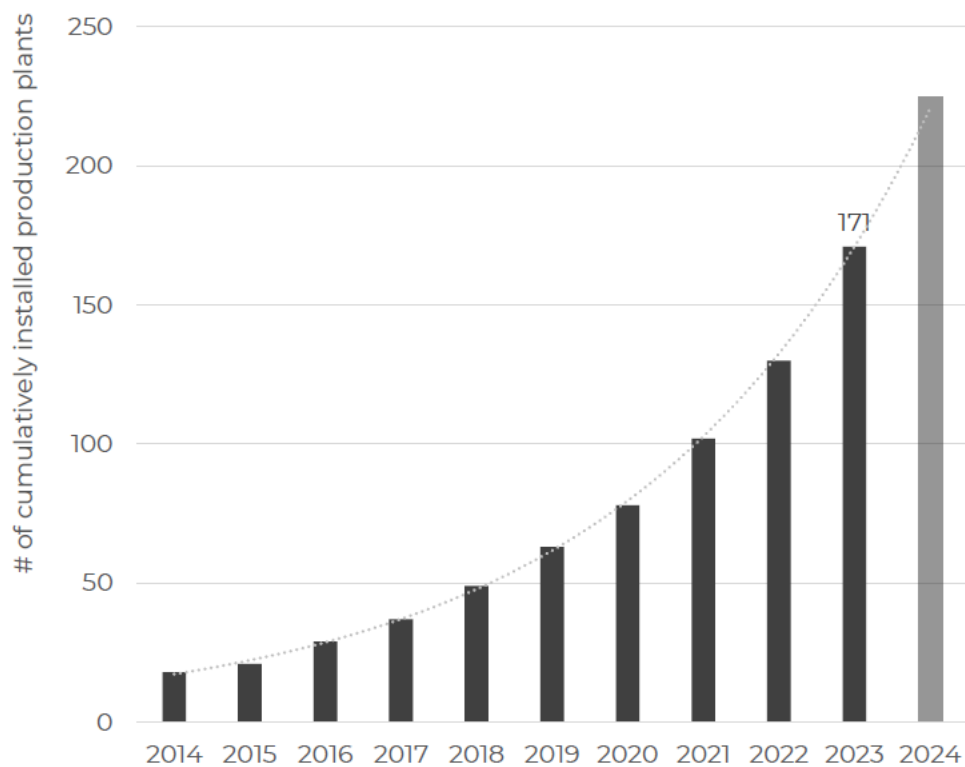
⁸¹ Lefebvre, David & Fawzy, Samer & Aquije, Camila & Osman, Ahmed & Draper, Kathleen & Trabold, Thomas. (2023). Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. Biochar. 5. 10.1007/s42773-023-00258-2.

⁸² https://climate.ec.europa.eu/news-other-reads/news/commission-adopts-rules-and-launches-initiatives-boost-carbon-removals-and-carbon-farming-eu-2025-12-01_en

⁸³ European Commission: Directorate-General for Climate Action, Cerulogy, Fraunhofer ISIS and ICF, Support to the development of methodologies for the certification of industrial carbon removals with permanent storage – Draft technical specifications for the certification of permanent carbon removals through biochar, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2834/8524183>

⁸⁴ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf Page 115.

⁸⁵ European Biochar Market Report 2023-2024 – EBI (publié en mars 2024)



www.biochar-industry.com/market-overview/ © EBI 2024

Figure 12. Évolution de la production des unités de biochar en Europe
(European Biochar Market Report 2023-2024 – EBI (publié en mars 2024))

La capacité de production de biochars en 2023 a été de 75 kt. Selon la **Figure 13**, la production pour l'année 2024 serait d'environ 115 kt.

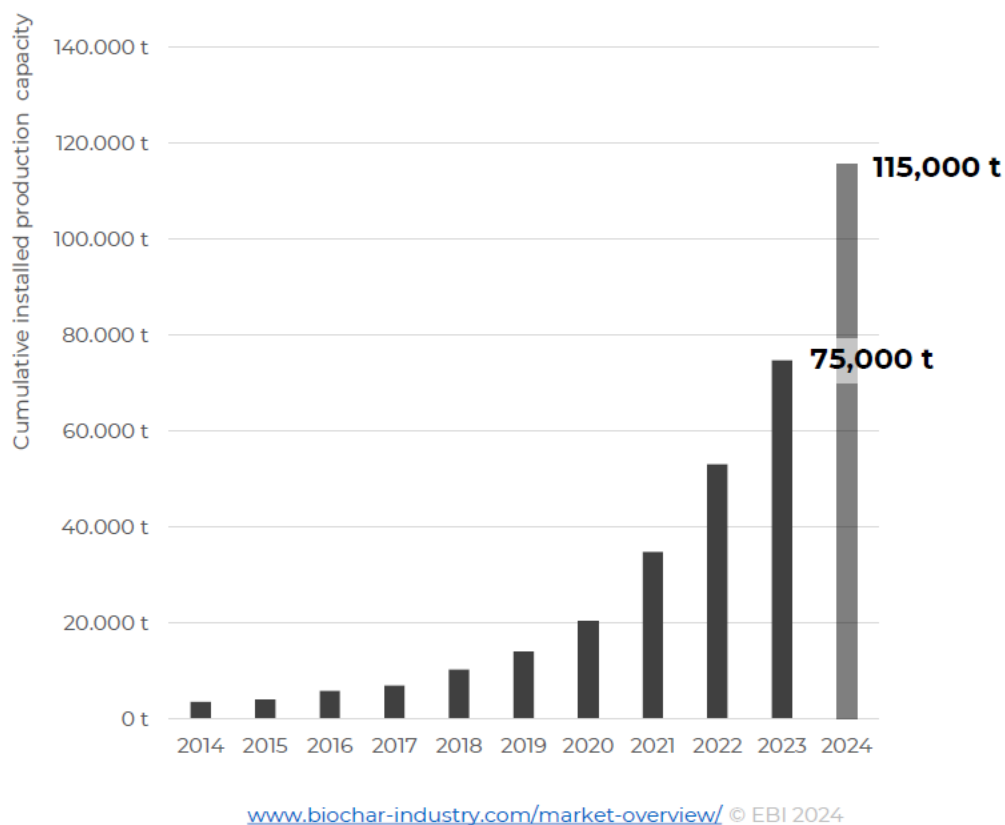


Figure 13. Capacité de production de biochar en Europe

Environ 70% de la production en 2023 a été faite par les pays suivants : l'Allemagne (26%), les pays nordiques (28%), l'Autriche et la Suisse (16%) (**Figure 14**).

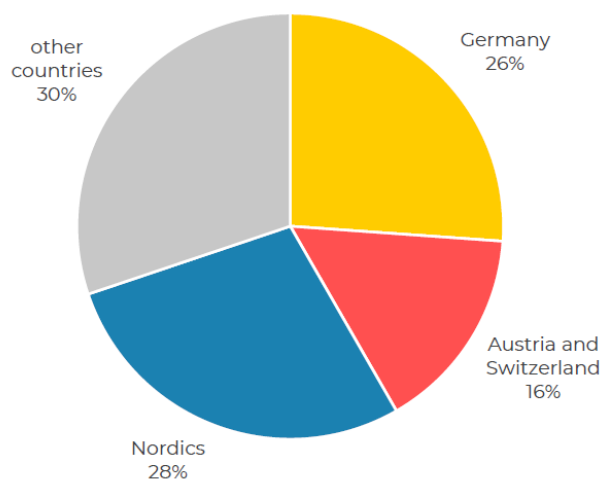


Figure 14. Les principaux producteurs de biochar en Europe

En se basant sur le rapport de marché EBI de 2023, les pays nordiques, qui présentent une croissance marquée sont : la Suède, le Danemark⁸⁶ et la Finlande (**Figure 15**). Les « autres pays » qui augmentent leurs activités dans la filière biochar en 2024 sont l'Espagne, la France et l'Angleterre.

Les volumes de consommation de biomasse pour produire des biochars restent aujourd'hui limités. Néanmoins, les perspectives de diversification des usages du biochar dans l'industrie pourraient amener à de plus fortes consommations de biomasse. Ces évolutions potentielles sont à prendre en compte dans un exercice de planification et/ou priorisation des usages d'une biomasse mobilisable d'ici 2050 qui reste limitée.

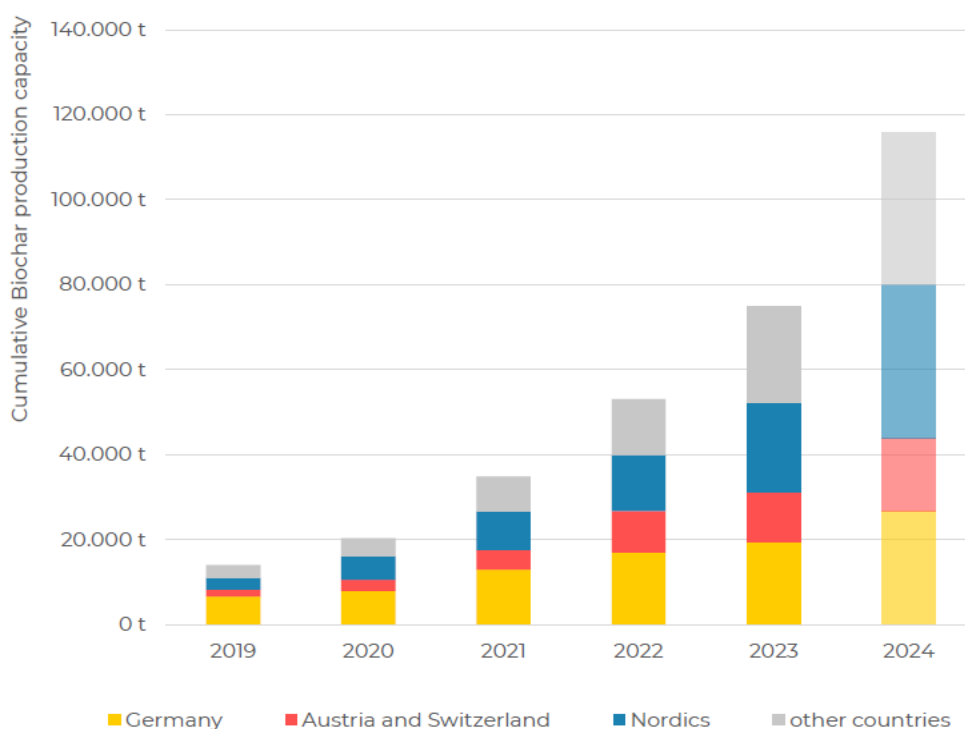


Figure 15. Capacité de production de biochar par pays en Europe

Au niveau international, les acteurs majeurs du marché⁸⁷ sont les États-Unis et la Chine (**Figure 16**). Ces pays ont été précurseurs dans l'utilisation du biochar principalement à des fins agricoles.⁸⁸

⁸⁶ La nouvelle stratégie pour le biochar a été annoncée cette année par le gouvernement danois dans laquelle l'administration du pays s'est engagée à investir 1,4 milliards d'euros pour promouvoir l'adoption du biochar dans l'agriculture. Intervention à Biochar Summit (Juin 2025): The Danish Pyrolysis Industry: Challenges, Achievements and inspiration for implementation of biochar in EUs agricultural climate strategy (Morten Heick, Stiesdal SkyClean) <https://carbonherald.com/denmark-publishes-new-pyrolysis-strategy-accelerating-biochar-adoption/>

⁸⁷ Source : <https://www.stellarmr.com/report/Biochar-Market/1608>

⁸⁸ Source : <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/biochar-market>



Figure 16. Marché mondial du biochar par secteur (à gauche) et par procédé de conversion thermochimique (à droite)

6.2 Focus sur les producteurs de biochars en France***

Un récapitulatif des principaux producteurs de biochar français*** identifiés par Biochar zero est présenté dans le Tableau 6.

Tableau 6. Principaux producteurs de biochar en France***

Compagnie	Localisation	Intrants	Process	Capacité *** (t/an)	Usages	Certification
DEMIO	Avranches	Résidus biomasse	Pyrolyse	200-2000	Huiles de pyrolyse, compost, amendement, méthanisation, purification eau	Non
Sylva Fertilis	Argentan	Plaquettes forestières	Procédé pyrolyse	400-800	Agriculture et jardinage	EBC*, crédits carbone puro earth
Carbonloop	Paris	Plaquettes forestières	Unités pyrolyse clé en main	-	H2 + syngaz + biochar, principalement énergétique pour industriels	
CarbonCentric	Troyes	Bois France PEFC**	Procédé pyrolyse Soler	200-2000	Agriculture, construction	EBC agro
Carbonex (groupe Soler)	Gyé-sur-seine	Bois local PEFC**	Procédé pyrolyse Soler	30 000	Cogénération, barbecue, Agriculture, Industrie	EBC-Agro, EBC-BasicMaterials, REACH
Groupe Bordet	Leuglay	Bois de coupe, taillis et connexes de scieries	Techno Carboépuré + Licence clé en main	200-2000	Barbecue, amendement jardinage, charbon actif	EBC

NB : * BC pour European Biochar Certificate

**PEFC est un acronyme qui signifie Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes. Concrètement, PEFC est une certification internationale en faveur de la gestion durable des forêts.

*** Cette liste est non exhaustive et ces volumes sont à titre estimatifs

7 Principaux usages en cours et en développement

7.1 Retour au sol et les usages agronomiques des biochars

Les biochars sont mis en avant pour les bénéfices qu'ils pourraient apporter sur la fertilité des sols, en particulier pour les sols tropicaux, sur la réduction des émissions de N₂O ou encore sur la rétention de l'eau.

Une étude scientifique basée sur plus de **300 articles recensés** montre un **effet très significatif (***)** des biochars sur les teneurs en P, K, N, C et pH du sol et une efficacité significative (**) sur le rendement, la croissance aérienne et la biomasse microbienne du sol (**Figure 17**).

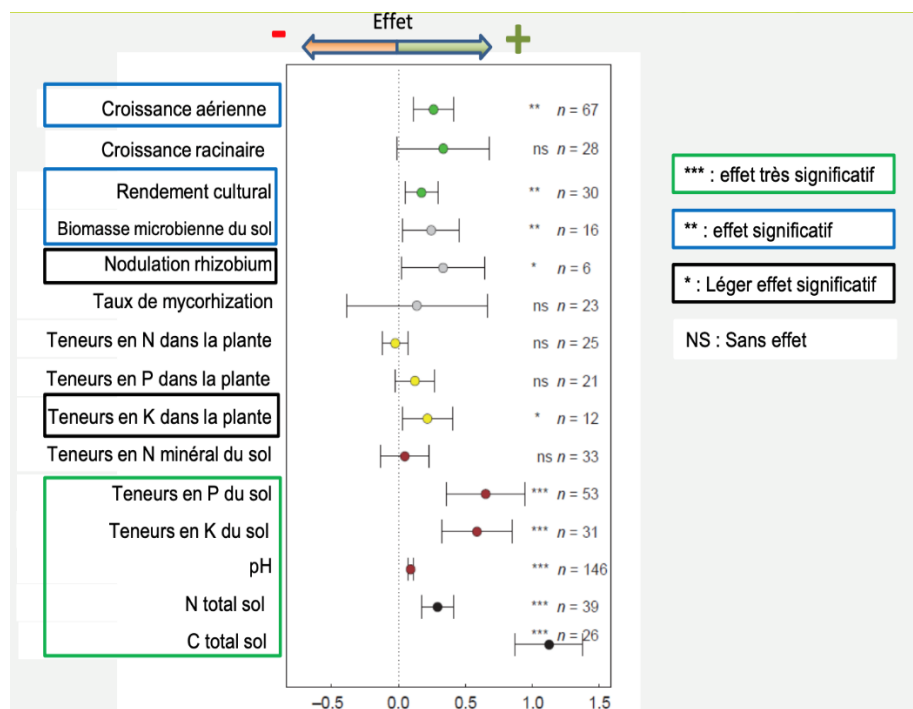


Figure 17. Les différents effets agronomiques des biochars basés sur une méta-analyse scientifique (Adapté de Biederman & Harpole, 2013)⁸⁹

Le biochar peut aussi être employé pour le traitement des fumiers et des litières (réduction des odeurs et des GES), ainsi que comme additif pour le compostage, ou l'ensilage, ou encore l'alimentation (effet positif sur la digestibilité, le gain de masse et l'apport en nutriments).⁹⁰

Néanmoins à ce stade, le développement en agriculture est principalement poussé par l'offre et non la demande. Par ailleurs, les derniers rapports du GIEC soulèvent des points d'attention importants, en particulier en termes de conflit d'usage de la biomasse (biomasse qui se doit d'être de qualité si un retour au sol est envisagé), voir point 10.

⁸⁹ Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. GCB bioenergy, 5(2), 202-214.

⁹⁰ Source : <https://www.pleinchamp.com/actualite/tout-savoir-ou-presque-sur-le-biochar>

Les bénéfices pour la séquestration de carbone et la fertilité des sols restent par ailleurs à préciser selon les types de « biochars », les types de sols et les systèmes de cultures ciblés, tout comme les gisements potentiels pour chaque biomasse envisagée.⁹¹

7.2 Les autres applications des biochars

L'institut ITHAKA⁹² propose plus d'une cinquantaine d'applications envisagées selon les propriétés des biochars. La **figure 18** est une représentation résumée et non-exhaustive :



Figure 18. Applications du biochar par secteur (GT Biochar de l'ATEE⁹³, 2024)

Cela veut dire qu'au-delà de son usage agronomique, le biochar peut être potentiellement employé dans des secteurs très variés tels que les matériaux ou les systèmes de dépollution.

8. Un cadre réglementaire et normatif en construction

Au niveau international, deux systèmes ont été développés, l'un par des industriels (l'**IBI** International Biochar Certification) l'autre au niveau européen l'**EBC** (l'European Biochar Certificate). Ces deux systèmes normatifs visent à permettre aux acteurs du marché d'identifier les biochars les plus aptes à répondre aux exigences en fonction de leur utilisation. Certaines méthodes d'analyse du biochar, utilisées dans la littérature, proviennent des analyses standards soit de l'industrie du charbon et de l'énergie, soit de l'industrie des engrais ou des amendements agricoles. Les exigences ne sont donc pas toujours adaptées pour des applications agricoles et environnementales. Certaines analyses sont influencées par des méthodes de déclaration obligatoires pour la protection de l'environnement comme dans le cas des métaux lourds. De la même façon, certaines méthodes sont parfois obligatoires par l'IBI,

⁹¹ Rapport ADEME Transition(s) 2050 Choisir Maintenant – Agir pour le climat, 687 pages

⁹² 55 Uses of Biochar by Hans-Peter Schmidt
<https://www.ithaka-journal.net/en/ct/143-55-uses-of-biochar>

⁹³ Enjeux et potentiels du développement de la filière biochar en France
https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/2024.06.27_Note-position-France-BIOCHAR_VF.pdf

alors qu'elles ne le sont pas pour l'EBC et vice versa. L'EBC requiert aussi des déclarations obligatoires de contenus en contaminants (ex : métaux lourds, HAP) en vue d'applications environnementales, mais avec des normes et des méthodes basées sur les règles européennes plutôt que nord-américaines.⁹⁴

Les travaux normatifs en cours⁹⁵ pour définir le terme « biochar » montrent la faible maturité de la filière et les efforts mis en place afin de poursuivre ces travaux afin d'approfondir la caractérisation des propriétés physiques et chimiques du biochar et leurs applications potentielles.

9. Un modèle économique pas encore stabilisé

En fonction des technologies employées, des objectifs visés, de la quantité et de la qualité des biochars les prix de ces produits peuvent varier.

En effet, en fonction du marché visé, le procédé de production ne sera pas le même, et les propriétés physico-chimiques du biochar non plus. Même si des débouchés sont recherchés pour les résidus de transformation (biohuiles, syngas, chaleur), **c'est bien la valorisation agronomique du biochar** qui est la plus connue et développée aujourd'hui. Aujourd'hui, le prix de vente pour une utilisation en agriculture varie entre 500 €/t à plus de 1 000 €/t⁹⁶.

Il faut noter que la voie associée aux crédits carbone⁹⁷ apparaît aujourd'hui comme une valorisation économique de ces produits. Comme exemple, en octobre 2021, le Groupe SLB a été certifié par Puro earth, plateforme qui vend des crédits carbone à partir de biochar. L'entreprise française appartenant à ce groupe a récemment pris la décision de doubler sa capacité de production, soutenue par les acheteurs de CORC Carbon Removal Price Index.⁹⁸ Ainsi, le modèle économique du biochar dépend, entre autres, d'une valorisation sur le marché volontaire de la compensation carbone.

10. Les points de vigilance

Ces points de vigilance sont basés à la fois sur l'expertise ADEME, les données du GIEC et le Biochar Summit⁹⁹.

10.1 Choix technologique

La pyrolyse et la pyrogazéification sont deux technologies distinctes qui visent des objectifs différents : la pyrogazéification est un procédé priorisant les rendements de conversion de biomasse en syngas tandis que la pyrolyse a pour but prioritairement la production de biochar.

Il faut noter que ces conversions thermochimiques peuvent utiliser différents types de biomasse¹⁰⁰. Les conditions de la pyrolyse jouent un rôle important lors de la fabrication du biochar car **les paramètres de temps de réaction dans le réacteur et les conditions de température vont conditionner les ratios entre production de gaz et de biochar.**

⁹⁴ Allaire SE, Lange SF, Auclair IK, Quinche M, Greffard L (The Char Team) (2015) Rapport : Analyse des propriétés de biochars. CRMR-2015-SA-3. Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 61 p.

⁹⁵ <https://www.biochareurope.eu/resources/iso-expands-the-standardization-of-biochar-and-biocarbon>

⁹⁶ Source : https://www.artb-france.com/images/actualite/fichier-actualite/Biochar_-_Decembre_2022.pdf

⁹⁷ <https://7518557.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/7518557/Puro%20Biochar%20Methodology%20-%20Edition%202025%20-%20Approved%20Version%20-%20Pending%20Copy%20Edit.pdf>

⁹⁸ Source : <https://www.sival-innovation.com/credits-carbone-terra-fertilis/>

⁹⁹ <https://www.biochareurope.eu/summit/program>

¹⁰⁰ List of biomass feedstock. Juin 2025. <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-and-WBC-guidelines-documents>

10.2 La biomasse forestière, une ressource renouvelable mais limitée

Le développement de nouveaux usages de la biomasse se fera au détriment d'autres secteurs. Il est donc nécessaire de s'interroger sur les bénéfices environnementaux de chacun des usages et sur les risques de conflits (d'usage) lors de l'implantation de tout nouveau projet. Dans un cadre non réglementé, **cela pourrait conduire à un risque de dérive avec une réorientation excessive de la biomasse vers un secteur en particulier.**

Il est indispensable de poursuivre les études pour mieux caractériser cette nouvelle filière biochar par rapport à des filières existantes afin d'éclairer les décideurs publics notamment. Par ailleurs, les porteurs de projets devront être incités à s'interroger sur la nécessité **d'utiliser des biochars et sur les alternatives possibles à l'utilisation de la ressource biomasse.** Dans le cas de l'ADEME, les plans d'approvisionnement font l'objet d'une validation par les cellules biomasse afin d'évaluer les risques de concurrence d'usages.

10.3 Quelle est la réelle contribution des biochars à l'atténuation du changement climatique ?

L'ADEME, dans son étude d'analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel¹⁰¹, montre la grande variabilité des impacts sur le puits de carbone en forêt. Les exemples étudiés dans ce rapport montrent une grande variabilité du bilan GES global de la production de chaleur à partir de plaquettes forestières en fonction des pratiques sylvicoles considérées, et confirme donc l'importance de mieux prendre en compte les variations de puits de carbone forestier dans l'évaluation environnementale du bois-énergie dans un contexte d'augmentation des prélèvements. En effet, celui-ci peut diminuer, ou augmenter, suivant les pratiques sylvicoles modélisées. Cette même approche de quantification des bilans de gaz à effet de serre (GES) devrait être considérée dans la production de biochar issue de différents scénarios sylvicoles.

Les contributions et bénéfices environnementaux des biochars doivent être évalués comparativement à la référence d'usage des biomasses dont ils sont issus, dans une logique complète d'analyse de cycle de vie. Les enjeux environnementaux autres que le bilan GES et séquestration de carbone doivent impérativement être pris en compte, comme recommandé par le GIEC pour l'évaluation de la durabilité des biomasses : biodiversité, ressource en eau, etc. A ce titre, bien que le biochar permette une séquestration prolongée de carbone dans le sol, sa substitution au retour au sol d'une matière organique minéralisable peut conduire à des impacts significatifs sur l'activité biologique et la santé des sols, qui sont par ailleurs des conditions de résilience pour les écosystèmes et la production future de biomasse.

Les nouveaux usages du biochar dans l'industrie lourde¹⁰² pourraient participer à la décarbonation de ce secteur mais posent la question des volumes en biomasse nécessaires pour un effet significatif de réduction des émissions GES. D'après le GIEC, il faudrait viser uniquement des biomasses gérées durablement et considérer des systèmes de bioénergie qui combinent bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS) + biochar + utilisation des gaz en substitution d'une matière ou énergie fossile pour maximiser les co-bénéfices.

¹⁰¹ ADEME : Analyse du cycle de vie du bois énergie collectif et industriel. Janvier 2022.

¹⁰² Biochar as the key to a climate-neutral, competitive & resilient European economy. Renewable Carbon for a Successful European Steel and Metals Action Plan. Juin 2025. Philipp Hauser.

<https://www.biochareurope.eu/resources/biochar-as-the-key-to-a-climate-neutral-competitive-resilient-european-economy>

10.4 Remarques générales

La gouvernance autour du développement des biochars est indispensable. En effet, les mesures pourraient inclure des normes¹⁰³ : d'étiquetage, des systèmes de certification de la durabilité, une réglementation de la production et de l'utilisation du biochar.

Finalement, l'intérêt technique doit être démontré pour chaque application et la quantification des impacts environnementaux associés à l'usage des « biochars » nécessitent d'être encadrés pour éviter toute communication erronée et pratique qui relèverait du « green washing »¹⁰⁴.

¹⁰³ <https://www.biochareurope.eu/resources/iso-expands-the-standardization-of-biochar-and-biocarbon> (ISO TC238 travaux en cours au niveau international) et l'AFNOR / X34B au niveau national (travaux en cours)

¹⁰⁴ Le greenwashing (ou « éco-blanchiment », « verdissage » en français) est une méthode de marketing consistant à communiquer auprès du public en utilisant l'argument écologique de manière trompeuse pour améliorer son image.

