



Revue des pratiques de production du biochar pour ENABEL – projet CIV2200111



# Revue des pratiques de production du biochar

CIV2200111 – Programme VABICUI

Mai 2025





## Table des matières

Liste des illustrations .....	3
Liste des tableaux .....	3
Sigles et Abréviations .....	4
1. Contexte et objectifs de la mission .....	5
2. Introduction et méthodologie.....	5
3. Pratiques de production du biochar .....	6
3.1 Technologies et méthodes de production .....	6
3.2 Matières premières .....	17
3.3 Paramètres de production du biochar .....	19
3.4 Points clés à contrôler et bonnes pratiques.....	22
4. Caractérisation des biochars .....	24
4.1 Caractéristiques générales et propriétés du biochar .....	24
4.2 Utilisations possibles des biochars .....	27
4.3 Certification, normes et seuils .....	32
5. Les différents modèles de production.....	35
5.1 Modèle Industriel.....	35
5.2 Modèle Artisanal.....	37
6. Challenges et clés de succès.....	38
6.1 Pour les projets industriels .....	38
6.2 Pour les projets artisanaux.....	39
Annexe 1 : Liste non-exhaustive des équipementiers produisant des technologies de production de biochar en EU et aux USA.....	43



## Liste des illustrations

Figure 1 : Représentation schématique de la réaction thermochimique au cours de la pyrolyse. (Source : A. Dufour, Y. Le Brech, G. Mauviel, 2018) .....	8
Figure 2 : Exemple de four en fût métallique (Source : Yann Gressier, 2023) .....	10
Figure 3 : Four Adams (Source : Dexter Kombo, 2015) .....	11
Figure 4 : Image d'un four à rideau de flamme (Source : Cornelissen et al., 2016) .....	11
Figure 5 : Generator Carbon de model Suisse installé au Burkina Faso .....	12
Figure 6 : Modèle de fours à pyrolyse sur le site de Biochar Now .....	14
Figure 7 : Four à carbonisation EKKO conçu par Green Char .....	14
Figure 8 : Modèle du Four BIO-FOUR conçu par Green Char .....	14
Figure 9: Photo et principe du gazogène IED .....	15
Figure 10 : Interaction entre le temps de séjour et la HTT (Source : IBI) .....	19
Figure 11 : Interaction entre température et pression (Source : Dufour_Asprom_2018) .....	20

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Description comparative des principales technologies de production du biochar .....	9
Tableau 2 : Récapitulatif du rendement du Generator Carbon, modèle Suisse .....	12
Tableau 3 : Récapitulatif des impacts des biomasses sur la qualité du biochar .....	18
Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres de production et leurs impacts sur les biochars produits .....	21
Tableau 5 : Récapitulatif des facteurs d'émission liés à la production du biochar .....	23
Tableau 6 : Différentes classes de certification EBC .....	34
Tableau 7 : Valeurs limites des paramètres du biochar .....	34



## Sigles et Abréviations

ADD : Action pour le Développement Durable  
BCF : Biochar-based fertilizer  
BDO : Business Development Organization.  
C/N : Carbone sur Azote<sup>40</sup>.  
CC : Crédit Carbone  
CEC : Cation Exchange Capacity  
CH<sub>4</sub> : Méthane  
CNRA : Centre National de Recherche Agronomique  
CO : Monoxyde de Carbone  
CO<sub>2</sub> : Dioxyde de Carbone  
COS : Carbone Organique du Sol  
COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques  
EBC : European Biochar Certificate  
ECHA : European Chemicals Agency  
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations  
GES : Gaz à Effet de Serre  
GMP+ : Good Manufacturing Practice  
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques  
HTT : température de traitement la plus élevée<sup>41</sup>.  
IBI : International Biochar Initiative  
INP-HB : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny  
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change  
NO<sub>x</sub> : Oxydes d'azote  
ONG : Organisation Non Gouvernementale  
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement  
REACH : Registration, Evaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals  
TEQ : Toxic Equivalent  
USBI : US Biochar Initiative



## 1. Contexte et objectifs de la mission

L'étude de la demande internationale et nationale et de l'offre du biochar commanditée par ENABEL rentre dans le cadre de l'implémentation du projet VABICUI dont l'objectif principal est de renforcer les secteurs de la valorisation des déchets organiques et de la cuisson propre et ainsi de diminuer les émissions de GES de la Côte d'Ivoire. Il existe diverses possibilités pour valoriser les déchets et sous-produits des filières agricoles et industrielles (et déchets urbains). Parmi ces options, le biochar est une solution intéressante et qui suscite beaucoup d'intérêt ces dernières années, notamment grâce à la consolidation apparente de la finance climat.

Le travail demandé est assez vaste et peut se résumer en une analyse à 360° de la thématique biochar, avec un focus particulier sur les évolutions de ce marché naissant au niveau mondial (offre et demande). Etant donné le périmètre d'action du projet VABICUI, la Côte d'Ivoire, cette étude de marché aura aussi pour but de situer la filière ivoirienne de biochar dans ce contexte mondial.

De façon plus détaillée, les objectifs de l'étude sont : évaluer et caractériser la production de biochar dans le monde, ainsi que les pôles de consommation, les contextes et évolutions réglementaires, les différentes technologies impliquées et innovations récentes, et enfin comment la Côte d'Ivoire se place dans ce paysage, avec quelle compétitivité et quelles opportunités. Des recommandations pour orienter l'appui de VABICUI à la filière biochar ivoirienne seront aussi présentées.

## 2. Introduction et méthodologie

Le biochar, un matériau carboné produit par pyrolyse de biomasses (déchets agricoles, forestiers ou organiques), suscite un intérêt croissant à l'échelle mondiale en raison de ses multiples applications et de ses bénéfices environnementaux. Utilisé traditionnellement comme amendement des sols pour améliorer la fertilité et la rétention d'eau, le biochar est également reconnu pour son rôle dans la séquestration du carbone, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. En effet, sa production permet de capturer et de stocker durablement le CO<sub>2</sub> présent dans la biomasse, réduisant les émissions de GES.

Ce rapport vise à fournir une revue approfondie des pratiques de production du biochar, en mettant l'accent sur les méthodes utilisées sur les marchés national et international. L'objectif est d'identifier les meilleures pratiques, les technologies émergentes et les défis associés à la production de biochar, tout en évaluant son potentiel de développement économique et environnemental. Plus spécifiquement, ce document cherche à :

- Analyser les pratiques de production du biochar ;
- Présenter les modèles de production et technologies de production du biochar ;
- Présenter les paramètres influençant la qualité du biochar.



Pour réaliser cette étude, une approche comparative a été adoptée, s'appuyant sur une revue de la littérature scientifique, des rapports sectoriels et des études de cas. Les données proviennent de sources variées, notamment des publications académiques, des rapports d'organisations internationales et des entretiens avec des acteurs clés du secteur.

### 3. Pratiques de production du biochar

La production de biochar repose sur des procédés thermochimiques, principalement la **pyrolyse** et la **gazéification**, qui transforment la biomasse en un matériau carboné stable. Cette section explore les technologies, les matières premières, les paramètres de production et les bonnes pratiques associées.

#### 3.1 Technologies et méthodes de production

##### 3.1.1 Processus thermochimiques impliqués dans la production de biochar

La biomasse ligno-cellulosique est constituée de trois composants majeurs : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Elle représente la plus grande majorité de la biomasse. En moyenne, la matière ligno-cellulosique contient 40-60 % de cellulose, 20-40 % d'hémicelluloses et 10-25 % de lignine (Edwige Privas, 2013), tous cela constitué de carbone, hydrogène, oxygène et azote (C, H, O, N). Elle contient également de l'eau et des minéraux, dans des proportions dépendant de la source. La biomasse non ligneuse (déchets animaux ou plantes herbacées par exemple) est moins intéressante pour la production de biochar car contient peu de carbone fixe.

Le biochar est la partie solide résultant d'une transformation de la biomasse suivant des processus de décomposition thermique qui vont principalement extraire les matières volatiles de la biomasse et modifier la structure du carbone fixe (carbone restant sur forme solide à la fin de la transformation).

En fonction de la température de traitement et des conditions opératoire (principalement quantité d'oxygène en présence), la biomasse peut suivre 4 étapes : le séchage, la torréfaction, la pyrolyse et la gazéification.

##### ➤ Séchage et conditionnement

La biomasse contient toujours de l'humidité. Par exemple, le bois « sec » contient 12 à 19% d'eau en revanche le bois fraîchement coupé ou les résidus agricoles peuvent avoir une teneur en eau de 40 à 60 % en poids humide.

La majeure partie de l'eau est éliminée lorsque la biomasse est chauffée au-dessus de 100°C. À une température d'environ 150°C, la biomasse commence à se décomposer et à se ramollir (on parle alors de conditionnement). L'eau liée chimiquement (à partir de la structure des molécules de la biomasse) est libérée avec de petites quantités de dioxyde de carbone et de composés organiques volatils.



### ➤ Torréfaction

À mesure que la biomasse est chauffée jusqu'à une température comprise entre 200 et 280°C, les liaisons chimiques au sein des constituants de la biomasse commencent à se rompre. Ce processus est endothermique ; un apport de chaleur est nécessaire pour augmenter la température de la biomasse sèche et rompre les liaisons moléculaires. Du méthanol, de l'acide acétique et d'autres composés organiques volatils oxygénés sont libérés au cours de cette étape, ainsi que des émissions de CO<sub>2</sub> et de CO provenant de la décomposition de l'hémicellulose et de la cellulose.

La biomasse torréfiée est plus cassante que la biomasse fraîche, ce qui rend son broyage (par exemple pour le combustible de chaudière) plus facile et moins gourmand en énergie. Elle est plus résistante à la dégradation biologique et à l'absorption d'eau, ce qui améliore sa capacité de stockage. On n'obtient néanmoins pas encore du biochar car le carbone n'a pas encore sa structure stable et le produit contient trop d'éléments volatiles.

Le condensat liquide des vapeurs de torréfaction, connu sous le nom d'acide pyroligneux ou de « vinaigre de bois » peut être utilisé comme produit aromatisant. Selon sa concentration et sa température de production, il peut être utilisé comme fongicide, promoteur de croissance des plantes, pour favoriser la germination des graines, stimuler le compostage et améliorer l'efficacité du biochar.

### ➤ Pyrolyse

À 250-300 ° C, selon la composition de la matière première, la décomposition thermique de la biomasse devient plus extrême, libérant un mélange combustible de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, d'autres hydrocarbures et de goudrons.

Un apport de chaleur externe est nécessaire pour augmenter puis maintenir la température pendant la pyrolyse. Le rendement maximal est obtenu avant la fin de la pyrolyse, mais la teneur en carbone stable est relativement faible. La teneur en cendres d'un biochar de bois est généralement d'environ 1,5 à 5 %, les matières volatiles d'environ 25 à 35 % en poids et le reste est du carbone fixe à 60 à 70 %.

Le biochar restant à l'issue de la pyrolyse à 300 °C contient encore des quantités importantes de composés volatils.

Un chauffage supplémentaire est nécessaire pour augmenter la teneur en carbone fixe, la surface et la porosité en éliminant et en décomposant davantage de substances volatiles. Une température de 550-600°C donne une teneur typique en carbone fixe du biochar de bois d'environ 80-85% et une teneur en carbone volatile d'environ 12%. Le rendement en biochar de bois à cette température est d'environ 25 à 30% sur sec (A. Dufour, Y. Le Brech, G. Mauviel, 2018).

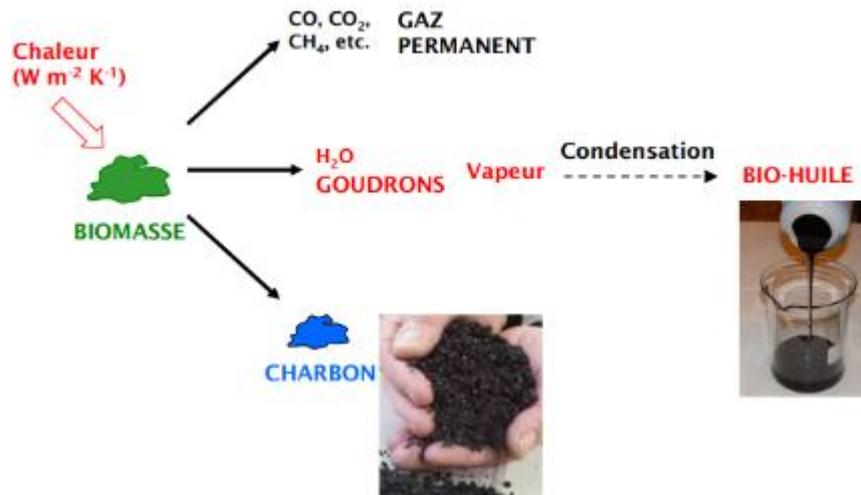


Figure 1 : Représentation schématique de la réaction thermochimique au cours de la pyrolyse. (Source : A. Dufour, Y. Le Brech, G. Mauviel, 2018)

### ➤ Activation et gazéification

Une fois que la température est supérieure à 600°C, l'ajout d'une petite quantité d'air et de vapeur peut augmenter la température de surface du biochar jusqu'à 700-800°C. Cette étape n'est pas nécessaire à la production de biochar (la pyrolyse étant suffisante) mais permet d'initier deux processus distincts :

- **Activation** : L'air, la vapeur et la chaleur peuvent *activer* la surface du biochar et libérer davantage de substances volatiles. Cela peut augmenter la surface et également l'échange de cations du biochar en ajoutant des groupes fonctionnels acides. Le rendement de production de biochar est réduit.
- **Gazéification** : Si l'on ajoute plus d'air et/ou de vapeur, le processus est appelé gazéification. Cela produit un gaz appelé gaz de synthèse ou syngas qui peut être utilisé pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Le rendement du biochar est faible (souvent inférieur à 20 %) car une partie plus importante de la matière est dégradée. Dans un gazéifieur, la matière subit les étapes thermochimiques suivantes :
  - Séchage : La biomasse est séchée pour réduire son taux d'humidité.
  - Pyrolyse : La biomasse est chauffée en absence d'oxygène, ce qui la décompose en gaz, liquides (goudrons) et charbon de bois.
  - Oxydation partielle : Une petite quantité d'oxygène est introduite pour brûler une partie du charbon de bois, générant de la chaleur nécessaire au processus.
  - Réduction : Les gaz produits réagissent avec le charbon de bois pour former du syngas, composé principalement de monoxyde de carbone (CO), d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et de méthane (CH<sub>4</sub>).
  - Filtration : Le syngas est nettoyé pour éliminer les impuretés avant d'être utilisé.

Dans ce contexte, il convient maintenant d'examiner les réacteurs les plus couramment utilisés pour la production de biochar.



### 3.1.2 Les réacteurs de pyrolyse et de gazéification

Ces réacteurs sont des équipements spécifiques, adaptés à l'échelle de production (artisanale, semi-industrielle ou industrielle) et au type de procédé (pyrolyse, gazéification). Ces équipements varient en fonction de l'échelle de production, du type de biomasse utilisée et des objectifs finaux (agriculture, énergie, séquestration du carbone, etc.). Le Tableau 1 présente une description comparative des principales méthodes :

*Tableau 1 : Description comparative des principales technologies de production du biochar*

Technologie		Pyrolyse lente	Pyrolyse rapide	Gazéification	Carbonisation traditionnelle
Description		Chauffage lent de la biomasse (350-700 °C) en absence d'oxygène.	Chauffage rapide (500-800 °C) avec temps de résidence court.	Conversion de la biomasse en gaz et biochar à haute température (800-1200 °C).	Méthode artisanale utilisant des fours simples ou des fosses.
Rendement	Biochar	20-35%	10-20%	10-15%	20-30% - Gaz (faible) - Cendres
	Gaz	20-30%	10-20%	70-80%	
	Biohuile	30-40%	50-70%	Minime	
Investissement initial		Modéré à élevé (10'000 à 100'000€)	Élevé (50 000 à 500 000 €)	Très élevé (100'000 à 1M€)	Faible (50 à 1 000€)
Besoin énergétique		Modéré	Élevé	Très élevé	Faible
Complexité technique		Moyenne	Élevée	Très élevée	Faible
Coût de maintenance		Modéré	Élevé	Très élevé	Faible
Disponibilité des équipements		Large disponibilité (commerciaux et artisanaux)	Disponibilité limitée (industriels)	Disponibilité limitée (systèmes industriels)	Très large (méthodes locales et artisanales)
Avantages		- Rendement élevé en biochar - Polyvalent (biochar, gaz, biohuile) - Adapté à diverses biomasses	- Rendement élevé en biohuile - Processus rapide - Efficace pour les petites particules	- Production de gaz de synthèse pour énergie - Efficacité énergétique élevée	- Faible coût - Simple à mettre en œuvre - Pas besoin d'électricité
Inconvénients		- Temps de traitement long - Coût modéré à élevé	- Rendement faible en biochar - Coût élevé - Complexité technique	- Rendement très faible en biochar - Coût très élevé - Nécessite une biomasse de haute qualité	- Faible contrôle du processus - Pollution de l'air (fumées) - Rendement variable



### 3.1.3 Les réacteurs les plus utilisés pour la production de biochar

#### ➤ Four en fût métallique

Le four en fût est un système de pyrolyse à très petite échelle. Il est simple à construire et à utiliser, ce qui le rend idéal pour les agriculteurs, les jardiniers ou les petits exploitants. Il est constitué d'un fût en acier de 200 litres utilisé comme chambre de pyrolyse. Il doit être résistant à la chaleur et en bon état. Une cheminée est ajoutée au sommet d'un second fût pour évacuer les gaz de pyrolyse. Des trous sont percés à la base du fût pour permettre un apport contrôlé d'oxygène. Facile à construire, même à base de matériaux recyclés, il convient à une grande variété de biomasse et est mobile.

Sa simplicité s'accompagne d'inconvénient parmi lesquels sa capacité limitée, son contrôle aléatoire des paramètres de pyrolyse, sa durabilité (dégradation rapide des fûts).



Figure 2 : Exemple de four en fût métallique. (Source : Yann Gressier, 2023)

#### ➤ Four Adams

Le four Adam est un système de pyrolyse maçonné (inspiré des meules traditionnels), à lit fixe, simple et efficace utilisé pour la production de biochar à partir de biomasse lignocellulosique. Il peut contenir jusqu'à 1 tonne de biomasse et permet un rendement en biochar de 35 à 40% avec un taux de carbone fixe compris entre 70 et 80%. L'ensemble du processus dure jusqu'à 12 heures de temps avec une température comprise 450 et 600°C. Il est robuste, peu coûteux, minimise les émissions de gaz et peut être alimenté entre autres par des balles de riz, cabosse de cacao, coque de coco.

Il est particulièrement populaire en Afrique en raison de sa simplicité et de son faible coût et convient aux utilisateurs artisanaux pour production bord champs.



Figure 3 : Four Adams (Source : Dexter Kombo, 2015)

D'autres modèles de fours maçonné avec un fonctionnement simple existent comme Maggieco fornos par exemple :

Capacité : 2 100 kg de charbon (moyenne)

Teneur en matières volatiles : 12,07 %

Teneur en cendres : 0,84 %

Teneur en carbone fixe : 87,09 %

#### ➤ Four à rideau de flamme

Il s'agit d'un autre système à lit fixe accessible pour la production de biochar à petite et moyenne échelle. Il permet un rendement en biochar de 20 à 25%, un taux de carbone fixe atteignant 70 à 85%, et une température de pyrolyse variant entre 600 et 900°C tout en minimisant les émissions polluantes grâce à la technique du rideau de flammes.

Ses principaux avantages sont :

- Sa simplicité de construction et d'utilisation, avec des matériaux locaux disponibles ;
- Son faible coût d'investissement (50'000€) et de maintenance, favorisant une adoption dans les pays en développement ;
- Sa flexibilité en matière de biomasse, permettant la valorisation de nombreux résidus agricoles (bois, coques de noix, tiges végétales, paille, rafles de maïs, etc.) ;
- Ses émissions réduites de gaz polluants, en comparaison aux fours traditionnels.



Figure 4 : Image d'un four à rideau de flamme (Source : Cornelissen et al., 2016)



Son utilisation s'étend aujourd'hui à plusieurs régions<sup>1</sup> du monde, notamment en Afrique, Amérique Latine et Asie du Sud-Est, où il est adopté par des communautés agricoles, des chercheurs et des initiatives de reforestation. Grâce à son efficacité environnementale et économique, les fours à rideau de flamme représentent un modèle d'innovation low-tech.

➤ Le four à vis de type *Generator Carbon*

Le four *Generator Carbon* (développé par la société suisse du même nom) est un système de pyrolyse conçu pour la production de biochar à petite ou moyenne échelle. C'est une technologie de pyrolyse continue qui utilise une vis sans fin pour transporter la biomasse à travers une chambre de chauffage (contrairement aux « lit fixe » vu précédemment). Il permet la récupération des autres produits de pyrolyse (gaz et huiles) pour la production de chaleur pour des utilisations externes.



*Figure 5 : Generator Carbon de model Suisse installé au Burkina Faso*

Le tableau 2 présente le récapitulatif du rendement de ce four.

*Tableau 2 : Récapitulatif du rendement du Generator Carbon, modèle Suisse*

Produit	Rendement (% de la masse sèche de biomasse)	Facteurs influençant le rendement
Biochar	20-35 %	Type de biomasse, température de pyrolyse
Gaz	30-50 %	Température, temps de résidence
Bio-huile	10-30 %	Type de biomasse, température de pyrolyse

Ce modèle présente des caractéristiques qui font de lui une technologie performante :

- Son efficacité énergétique : Le système récupère et réutilise les gaz de pyrolyse pour chauffer la chambre, réduisant ainsi la consommation d'énergie.



- Sa modularité : Le four peut être adapté à différentes échelles de production, de quelques kilogrammes à plusieurs tonnes par jour.
- **Son contrôle précis** : Le système automatisé permet de réguler les paramètres de pyrolyse (température, débit, temps de résidence) pour optimiser la qualité du biochar.
- **Son respect des normes environnementales** : Conforme aux normes européennes strictes en matière d'émissions et de sécurité.
- Sa polyvalence : Capable de traiter une grande variété de biomasses (déchets agricoles, forestiers, urbains).

### ➤ Les fours industriels

Il existe plusieurs entreprises à l'échelle mondiale qui fabriquent et fournissent des équipements pour la production de biochar. Ces équipementiers offrent une gamme de technologies adaptées à différents types de biomasse, de capacités de production et d'objectifs d'application du biochar. Voici un aperçu des principaux acteurs de ce secteur :

- Carbo Culture : Cette société est un leader dans la production de biochar à grande échelle avec des technologies avancées de pyrolyse. Elle propose des solutions intégrées pour la production de biochar à partir de diverses matières organiques.
- Biochar Now : Un fabricant bien établi qui fournit des unités de pyrolyse à petite et moyenne échelle, adaptées à la production locale de biochar avec un fort accent sur l'efficacité énergétique.
- Green Char : Cette entreprise propose des solutions modulaires de production de biochar, basées sur des technologies de pyrolyse continue, adaptées pour des producteurs de taille moyenne ou des entreprises agricoles cherchant à produire du biochar localement.
- Carbon Clean Solutions : Bien qu'elle soit plus connue pour ses technologies de capture de carbone, Carbon Clean propose également des équipements spécialisés pour la production de biochar à partir des gaz issus de l'industrie lourde.
- PYREG (NetZero Technology) : spécialisée dans les systèmes de pyrolyse pour la production de biochar. Il propose des systèmes de pyrolyse adaptés à différents types de biomasse, qu'il s'agisse de déchets agricoles, forestiers ou d'autres résidus organiques. Leurs technologies sont utilisées dans des projets visant à améliorer la durabilité des sols en stockant du carbone de manière permanente via le biochar.

Nous en présentons certains modèles ici.

- Biochar Now utilise des fours à pyrolyse lente brevetés conçus sur mesure pour fabriquer son biochar. Le système unique de combustion multizone, de débit d'air, de pression négative et de contrôle permet à chaque four de produire indépendamment un biochar constant et de haute qualité. L'ensemble de cheminée amovible breveté des fours a été conçu pour brûler efficacement les gaz de pyrolyse afin d'éviter les émissions indésirables et être autorisé par diverses agences d'État à travers les États-Unis.



*Figure 6 : Modèle de fours à pyrolyse sur le site de Biochar Now*

- Le four EKKO pour la carbonisation des matières premières, y compris le bois énergétique et de plantation et les déchets de bois, les briquettes combustibles et les déchets de plantation pour produire du charbon de bois de haute qualité. Il est conçu par l'équipementier Green Char et peut être utilisé pour la carbonisation ou la pyrolyse lente. En plus de la production du biochar, de l'énergie thermique est générée au cours du processus. La chaleur supplémentaire peut être utilisée pour le séchage préliminaire de la matière première ou à d'autres fins. La production d'huile de pyrolyse est également possible.
- Le four BIO-FOUR est une installation brevetée, respectueuse de l'environnement et continue pour le traitement thermique des matières végétales. Il est spécialement conçu pour la production de charbon de bois ou de biochar de haute qualité comme matière première pour la production de charbon de bois pour narguilé, de briquettes pour barbecue, de charbon actif.



*Figure 7 : Four à carbonisation EKKO conçu par Green Char*



*Figure 8 : Modèle du Four BIO-FOUR conçu par Green Char*

Il existe un grand nombre d'équipementiers et de modèles industriels de biochar, en effet à partir d'une certaine échelle, les modèles sont conçus sur-mesure pour s'adapter parfaitement à la situation du projet (type de biomasse, insertion dans une unité industrielle existante, etc.). Une liste non exhaustive des équipementiers recensés pour cette étude est présentée en Annexe 1: Liste non-exhaustive des équipementiers produisant des technologies de production de biochar en EU et aux USA.

Par ailleurs, il est important de noter aussi une innovation récente dans le milieu des équipements de production du biochar : il s'agit des modèles de production « en kit » ou « containerisés ». Il s'agit d'unités modulables en fonction de l'échelle des projets biochar et facilement importables car contenus à l'intérieur de différents containers. Ce modèle est notamment promu par les développeurs de projet tels que NetZero ou PyroCCS.

### ➤ Gazéifieur

Un gazéifieur ou gazogène est d'abord conçu pour produire de l'énergie (sous forme de gaz de synthèse, appelé syngaz) à partir de la gazéification de biomasse, notamment de bois ou de déchets agricoles (coques, balle de riz...). Ce système industriel est particulièrement adapté aux contextes où les déchets organiques sont abondants et l'accès à l'électricité limité : la combustion du gaz de synthèse en groupe électrogène permettant en effet de produire de l'électricité.

Le processus de gazéification ne dégrade pas totalement la matière en cendres mais produit un résidu riche en carbone, biochar. Le rendement en biochar sera très dépendant de la biomasse utilisée et des paramètres de réaction (priviliégiant la production de syngas ou de biochar). Le projet Agrogazelec mis en œuvre par IED, Cirad et Nitidae, actuellement en cours au Sénégal, a permis le développement de gazogène adapté notamment aux coques d'anacarde, d'arachide et à la balle de riz avec des rendement en biochar allant de 15 à 35%.

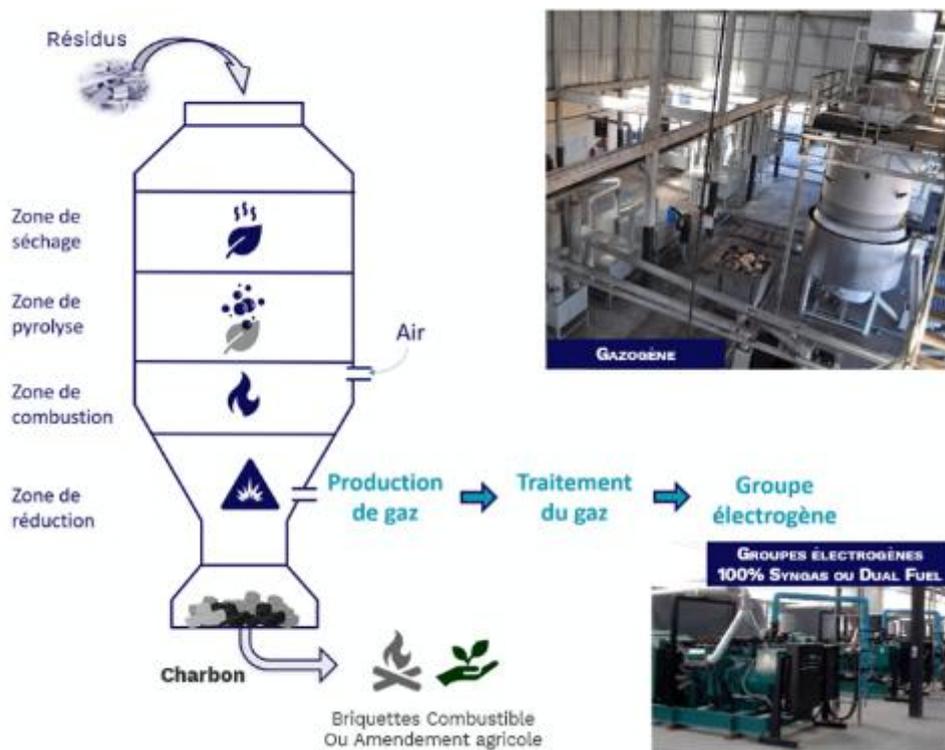


Figure 9: Photo et principe du gazogène IED

### 3.1.4 Accessibilité et coûts des technologies

La facilité d'acquisition des technologies dépend de plusieurs facteurs :

- **Accessibilité géographique** : Les principaux équipementiers sont présents en Europe, Amérique du Nord et Asie. Dans d'autres régions, l'accès est plus limité, mais des



solutions internationales et des partenaires locaux peuvent faciliter la distribution et l'installation.

- **Échelle et complexité des équipements** : Les installations varient en taille et complexité. Les petites installations de pyrolyse sont accessibles pour les petites entreprises (PME de valorisation énergétique) ou les applications bord champs, tandis que les technologies à grande échelle nécessitent des investissements plus importants et une expertise technique.
- **Support technique et formation** : L'accès à ces technologies peut être limité par un manque de support technique et de formation. Bien que de nombreux équipementiers offrent des services après-vente, leur disponibilité et qualité varient. Une expertise préalable en gestion de biomasse peut être nécessaire.
- **Réglementation et normes locales** : Les réglementations locales en matière de qualité de l'air et de gestion des déchets ou de certifications environnementales, comme les normes ISO, peuvent également constituer un obstacle.

Les coûts des équipements de production de biochar varient en fonction de plusieurs facteurs, notamment la taille de l'installation, le type de technologie utilisée (pyrolyse, gazéification, etc.), la capacité de production, et les services associés (installation, formation, maintenance).

Unités de production artisanales : Les systèmes mobiles (fûts) ou fixe (Four adams, H2CP), sont accessibles pour des coûts allant de **quelques centaines d'euros à 20'000€**.

Petites unités de production : Les systèmes à petite échelle, souvent destinés à des producteurs agricoles ou des petites entreprises de recyclage de biomasse, peuvent coûter entre **50'000€ et 200'000€** selon leur capacité. Ces installations ont généralement une capacité de traitement de quelques tonnes de biomasse par jour et sont conçues pour des applications locales. Elles peuvent générer **jusqu'à 1'000 t de biochar par an**.

Unités à moyenne échelle : Les équipements à moyenne échelle, adaptés aux entreprises agricoles de taille moyenne ou aux industries locales cherchant à produire du biochar à une échelle plus importante, peuvent coûter entre **200 000 € et 1 million d'euros**. Ces unités peuvent transformer **jusqu'à 50'000 tonnes de biomasse par an** et peuvent inclure des systèmes automatisés et des contrôles sophistiqués des émissions.

Installations à grande échelle : Les installations de production de biochar à grande échelle, utilisées dans les grandes industries ou dans les projets nationaux ou internationaux, peuvent coûter plusieurs millions d'euros, allant de **1 million € à 10 millions € ou plus**. Ces installations peuvent traiter **au-delà de 100'000 tonnes de biomasse par an** et sont associées à des projets d'infrastructure complexes et à des contrats de long terme.

Outre le coût d'acquisition, les coûts opérationnels doivent être pris en compte, notamment les coûts d'énergie, la maintenance régulière, et les frais liés à l'exploitation continue des équipements. Le retour sur investissement dépendra du modèle économique choisi, notamment si la production de biochar est utilisée principalement comme matière première



pour d'autres industries (comme l'agriculture ou la filtration) ou pour des applications énergétiques.

L'acquisition et la mise en œuvre des technologies de production de biochar sont influencées par une série de facteurs, dont la disponibilité des équipements, les coûts initiaux et opérationnels, ainsi que les exigences techniques et réglementaires locales. Si certaines technologies peuvent être relativement accessibles pour des petites installations ou des entreprises locales, les projets de grande envergure peuvent nécessiter des investissements considérables et un soutien technique spécifique. Il est essentiel pour les acteurs intéressés par la production de biochar de bien évaluer leurs besoins, leur capacité d'investissement et de formation avant de choisir une technologie ou un fournisseur.

## 3.2 Matières premières

### 3.2.1 Types de matières premières

La production de biochar peut être réalisée à partir d'une grande variété de biomasses, classées en plusieurs catégories :

- **Déchets agricoles :** Riches en cellulose et en hémicellulose, mais pauvres en lignine. Ces biomasses produisent un biochar moins stable mais riche en nutriments. Les principales biomasses que l'on retrouve dans cette catégorie sont les pailles de céréales (riz, blé, maïs...), les cortex de cacao, bagasse de canne à sucre, tiges de coton. Leur collecte est particulièrement difficile et coûteuse.
- **Déchets industriels :** Riches en lignine et en cellulose, ces biomasses produisent un biochar de qualité intermédiaire. La valorisation des déchets industriels en biochar peut répondre aux besoins de l'agriculture ou l'énergie. Ils sont constitués de coques de noix (coco, anacarde), noyaux de fruits, résidus de transformation du bois... Leur concentration géographique en fait des options plus viables pour les projets de biochar grâce à la suppression des coûts de collecte.
- **Déchets forestiers :** Riches en lignine, ces biomasses produisent un biochar de haute qualité, très stable et poreux, souvent utilisé en agriculture et en filtration et adapté à la séquestration du carbone. Ce sont le bois, les écorces, les sciures, les branches, résidus de coupe etc.
- **Espèces invasives :** Certains pays ont des problématiques d'espèces invasives, à croissance rapide qui occupent l'espace et consomment les ressources. Collecter ces espèces (bambou, arbustes, buissons) et les valoriser sous forme d'énergie ou de biochar peuvent être des solutions pour régler ces problématiques.
- **Déchets urbains :** Composés de déchets organiques ménagers, boues d'épuration, déchets verts (feuilles, herbe). Ils ont une composition hétérogène, souvent riches en azote



et en contaminants (métaux lourds, plastiques). Leur transformation en biochar nécessite un prétraitement pour éliminer les contaminants, par exemple les plastiques. Le biochar produit peut être utilisé pour la gestion des sols ou la filtration.

- **Effluents :** Il s'agit des déchets humides et eaux usées de certaines industries (par exemple huilerie de palme, laiterie...). Ce type de déchet nécessite un prétraitement avant de pouvoir être utilisé comme matière première du biochar : l'humidité rend la pyrolyse ou la gazéification difficile. Des processus de fermentation existent permettant de produire de l'hydrogène à partir de ces effluents, puis de valoriser les résidus solides en biochar (voir le modèle de l'entreprise [Athéna Recherche et innovation](#)).

### 3.2.2 Impact des matières premières sur la qualité du biochar

La qualité du biochar dépend fortement du type de biomasse utilisée et des conditions de pyrolyse. Les principaux critères de qualité influencés par la biomasse sont :

- **La stabilité du carbone :** les biomasses riches en lignine (bois, coques de noix) produisent un biochar plus stable, avec une durée de vie dans le sol pouvant atteindre plusieurs siècles. En revanche, les biomasses riches en cellulose (pailles, herbe) produisent un biochar moins stable, plus rapidement dégradable.
- **Sa porosité et sa surface spécifique :** les biomasses ligneuses (bois, écorces) produisent un biochar très poreux, idéal pour la filtration de l'eau ou comme support pour les microorganismes du sol tandis que les non ligneuses (pailles, déchets urbains) produisent un biochar moins poreux.
- **Sa teneur en nutriments :** les biomasses riches en azote (déchets agricoles, boues d'épuration) produisent un biochar riche en nutriments, bénéfique pour la fertilité des sols ce qui est le contraire pour les biomasses pauvres en azote (bois, coques de noix).
- **Son contenu en cendres :** les biomasses riches en minéraux (pailles, boues d'épuration) produisent un biochar à haute teneur en cendres, ce qui peut affecter son pH et sa stabilité. Quant aux biomasses pauvres en minéraux (bois, coques de noix), ils produisent un biochar à faible teneur en cendres.
- **La présence de contaminants :** les biomasses contaminées (boues d'épuration, déchets urbains) peuvent produire un biochar contenant des métaux lourds ou des polluants organiques, nécessitant un traitement préalable.

*Tableau 3 : Récapitulatif des impacts des biomasses sur la qualité du biochar*

Type de biomasse	Stabilité du carbone	Porosité	Teneur en nutriments	Teneur en cendres	Risque de contaminants
Déchets agricoles	Faible +	Modérée	Élevée	Modérée +	Faible
Déchets forestiers	Élevée	Élevée	Faible	Faible	Faible



Déchets urbains	Faible	Faible	Élevée	Élevée	Élevé
Déchets industriels	Modérée +	Modérée	Modérée	Modérée	Faible +

Le choix des matières premières influence directement la qualité du biochar. Il est par ailleurs important que l'équipement de production soit adapté à la biomasse (granulométrie, taux de cendre...). L'approvisionnement de la biomasse et sa saisonnalité seront les autres facteurs de dimensionnement de l'outil de production.

### 3.3 Paramètres de production du biochar

La production de biochar est influencée par une série de facteurs qui déterminent le rendement, la qualité et les propriétés du produit final. Les facteurs les plus importants sont la **température de traitement la plus élevée (HTT)**, le **temps de séjour**, la **matière première**, la **vitesse de chauffage**, la **teneur en eau** et la **pression à l'intérieur du réacteur**. Ces facteurs interagissent de manière complexe, la HTT étant le déterminant le plus important des caractéristiques du biochar.

Un contrôle adéquat de ces variables est essentiel pour optimiser le processus de pyrolyse et produire des biochars ayant les qualités nécessaires pour chaque application spécifique, et exigences des certifications, avec une optimisation des coûts.

#### 3.3.1 Température de traitement

La température est le facteur le plus influent dans la production de biochar. Elle affecte directement le processus de carbonisation, déterminant la composition chimique, la porosité et la stabilité du biochar. Des températures plus élevées entraînent une augmentation de la teneur en carbone et une réduction des matières volatiles, ce qui se traduit par un biochar plus stable et plus poreux.

La plage de température pour la production de biochar se situe généralement entre **300°C et 700°C**. Les températures inférieures à cette fourchette peuvent entraîner une pyrolyse incomplète, tandis que les températures trop élevées peuvent entraîner une perte excessive de carbone et donc une chute de rendement.



### 3.3.2 Temps de séjour

Le temps de séjour correspond à la durée pendant laquelle la biomasse est soumise aux conditions de pyrolyse dans le réacteur. Des temps de séjour plus longs permettent une décomposition plus complète des matières organiques, augmentant ainsi la teneur en carbone et la stabilité du biochar. Cependant, des temps de séjour trop longs peuvent réduire le rendement en raison d'une dégradation excessive. **Le temps de séjour doit être optimisé en conjonction avec la HTT** pour atteindre l'équilibre souhaité entre le rendement et la qualité.

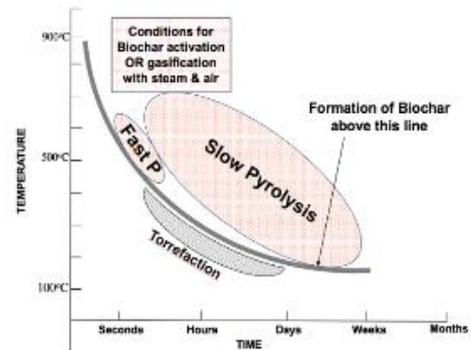


Figure 10 : Interaction entre le temps de séjour et la HTT (Source : IBI)

### 3.3.3 Matière première biomasse

Le type de biomasse utilisé (bois, résidus agricoles, fumier) a un impact significatif sur les propriétés du biochar en raison des différences de teneur en lignine, en cellulose et en hémicellulose. Les matières premières à forte teneur en lignine ont tendance à produire du biochar avec une teneur en carbone et une stabilité plus élevées, tandis que les matières premières riches en cellulose peuvent produire du biochar avec une porosité plus élevée.

### 3.3.4 Taux de chauffage

C'est la vitesse à laquelle la biomasse est chauffée pendant la pyrolyse. Les taux de chauffage lents favorisent la formation de biochar avec une teneur en carbone et une stabilité plus élevées, tandis que les taux de chauffage rapides peuvent augmenter le rendement des sous-produits volatils tels que le gaz de synthèse et la bio-huile. Le choix de la vitesse de chauffe dépend des produits finis souhaités. Pour une production axée sur le biochar, des vitesses de chauffe plus lentes sont préférées : de quelques heures à plusieurs jours.

### 3.3.5 Teneur en eau de la biomasse

Un taux d'humidité élevé dans la biomasse peut réduire l'efficacité du processus de pyrolyse en nécessitant une énergie supplémentaire pour évaporer l'eau, ce qui peut réduire le rendement global et la qualité du biochar. La biomasse ayant subi un séchage passif pour atteindre un **taux d'humidité de 10 à 20%** est généralement idéale pour la pyrolyse.

### 3.3.6 Conditions de pression

La pression à l'intérieur du réacteur de pyrolyse peut affecter la décomposition de la biomasse et la distribution des produits de pyrolyse. La pression atmosphérique est systématiquement utilisée pour la production de biochar à usage agricole, mais des



réacteurs spécifiques avec des conditions de haute pression peuvent être employées pour améliorer des propriétés ou des rendements spécifiques, en fonction de l'application.

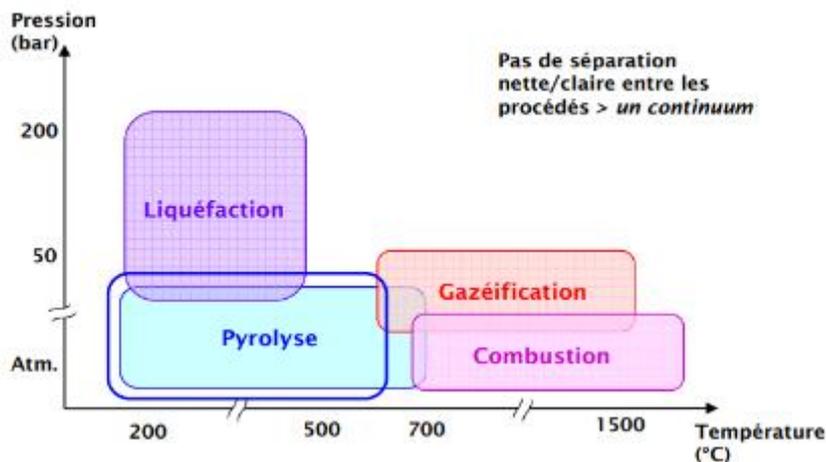


Figure 11 : Interaction entre température et pression (Source : Dufour Asprom 2018)

En contrôlant soigneusement ces facteurs, les producteurs peuvent adapter le biochar à des exigences spécifiques pour des applications telles que l'amendement des sols, la séquestration du carbone ou la filtration de l'eau. Il est essentiel de comprendre l'interaction entre ces variables pour optimiser le processus de pyrolyse et garantir une production de biochar constante et de haute qualité.

En effet, l'optimisation de ces facteurs clés, et leur adaptation régulière, sont parmi les plus gros challenges de la production du biochar. Les conditions des matières premières en particulier peuvent varier (différents types de biomasses, taux d'humidité saison sèche/humide...), et les équipes doivent être en capacité d'adapter le matériel pour produire un biochar aux conformes aux exigences de qualité et de manière constante.

Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres de production et leurs impacts sur les biochars produits

Facteurs	Impact sur le biochar	Plage optimale/Considérations
Température de traitement la plus élevée (HTT)	Détermine la teneur en carbone, la porosité et la stabilité.	300°C-700°C ; des températures plus élevées augmentent la stabilité mais risquent une perte de carbone.
Temps de séjour	Affecte la teneur en carbone et la stabilité ; des temps plus longs augmentent la qualité mais réduisent le rendement.	Équilibrer avec la température ; éviter la sur-carbonisation
Matière première de la biomasse	Influence sur la teneur en carbone, la stabilité et la porosité.	Matières premières à forte teneur en lignine pour la stabilité ; particules plus petites et plus sèches pour l'efficacité



Taux de chauffage	Influence la formation de biochar et le rendement des sous-produits	Taux lents pour une teneur en carbone plus élevée ; taux rapides pour plus de gaz de synthèse et de bio-huile
Teneur en humidité	Affecte l'efficacité de la pyrolyse et la qualité du biochar.	10-20% d'humidité pour une efficacité énergétique et une qualité optimales
Conditions de pression	Influence la décomposition et la distribution des produits	Pression atmosphérique courante ; haute pression pour des applications spécifiques

### 3.4 Points clés à contrôler et bonnes pratiques

#### 3.4.1 Optimisation des processus

L'optimisation des processus de production de biochar est essentielle pour maximiser l'efficacité, la qualité du biochar et minimiser les impacts environnementaux. Voici les bonnes pratiques à suivre :

- **La sélection de la biomasse** : Choisir des biomasses adaptées en fonction de l'usage final du biochar (agriculture, filtration, séquestration du carbone) et éviter les biomasses contaminées (métaux lourds, pesticides).
- **Contrôle des paramètres de pyrolyse** : Adapter les paramètres, principalement la température en fonction de la biomasse et de l'usage souhaité du biochar. Une température de 400-600°C est souvent optimale pour un bon compromis entre rendement et qualité. Un temps de résidence plus long favorise la stabilité du biochar. Tandis qu'un chauffage lent (5-10°C/min) favorise un rendement élevé en biochar.
- **Utilisation de technologies avancées** : Adopter des systèmes de pyrolyse continus (comme les fours à vis) pour une production plus efficace et contrôlée.
- **Valorisation des co-produits** : Les modèles de production les plus performants financièrement sont ceux associant diverses sources de revenus à tous les co-produits. Ainsi de l'énergie peut être produite par combustion des gaz de pyrolyse et valorisée sous forme de chaleur ou d'électricité, la biohuile peuvent aussi trouver des débouchés.
- **Automatisation et monitoring** : Utiliser des systèmes de contrôle automatisés pour réguler les paramètres de pyrolyse (température, débit d'air, temps de résidence) puis surveiller en temps réel les émissions et la qualité du biochar.

#### 3.4.2 Facteurs d'émission liés à la production du biochar

Les facteurs d'émission du biochar dépendent de plusieurs paramètres, notamment le type de biomasse utilisée, les conditions de pyrolyse (température, temps de résidence) et les



propriétés chimiques de la biomasse. Ces facteurs d'émission sont exprimés en termes de quantité de gaz (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.) émit lors de la production du biochar. Les facteurs influençant les émissions sont liés à :

- La composition de la biomasse : Les biomasses riches en azote (pailles, cortex de cacao) produisent plus de NO<sub>x</sub>. Les biomasses riches en lignine (coques de coco, brindilles) produisent plus de COVNM et de HAP.
- Les conditions de pyrolyse : Une température plus élevée réduit les émissions de COVNM et de HAP, mais augmente les émissions de NO<sub>x</sub>.
- L'efficacité de la combustion : Une combustion complète des gaz de pyrolyse réduit les émissions de CO, CH<sub>4</sub>, COVNM et HAP.
- Système de filtration : Les filtres à particules et les systèmes de lavage des gaz peuvent réduire les émissions de particules et de HAP. Le **Tableau 5** donne une estimation des facteurs d'émission spécifiques pour la production de biochar à partir de biomasses différentes. Ces valeurs sont exprimées en g/kg de biomasse sèche (g/kg).

*Tableau 5 : Récapitulatif des facteurs d'émission liés à la production du biochar*

Biomasse	CO <sub>2</sub> (g/kg)	CO (g/kg)	CH <sub>4</sub> (g/kg)	Particules (g/kg)	NO <sub>x</sub> (g/kg)	COVNM (g/kg)	HAP (g/kg)
Cortex de cacao	600-900	15-40	2-6	2-8	1-4	3-10	0,02-0,1
Balle de riz	500-800	10-30	1-4	1-6	0,5-3	2-8	0,01-0,08
Coque de coco	700-1 000	20-50	3-7	3-10	1-5	4-12	0,03-0,12
Coque anacarde	600-900	15-40	2-6	2-8	1-4	3-10	0,02-0,1
Brindilles	550-850	12-35	1,5-5	1,5-7	0,8-3,5	2,5-9	0,015-0,09

### 3.4.3 Réduction des émissions

La pyrolyse génère des émissions de gaz et de particules qui doivent être contrôlées pour minimiser l'impact environnemental. Ce point est particulièrement important en ce qui concerne la production du biochar puisque la plupart des modèles financiers incluent une partie de vente de crédits carbone. Pour générer le plus de crédits carbone possible, il faut minimiser les émissions. Ci-après les bonnes pratiques pour réduire les émissions :

- **Combustion complète des gaz de pyrolyse** :
  - Brûler les gaz de pyrolyse dans une chambre secondaire pour produire de l'énergie et réduire les émissions de CO, CH<sub>4</sub> et COVNM.
  - Utiliser des catalyseurs pour améliorer l'efficacité de la combustion.
- **Filtration des particules** :
  - Installer des filtres à particules (filtres à manches, cyclones) pour capturer les particules fines (PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>).
  - Utiliser des systèmes de lavage des gaz (scrubbers) pour éliminer les polluants gazeux.



- Réduction des NOx :
  - Adopter des technologies de combustion à basse température pour limiter la formation de NOx.
  - Utiliser des additifs (comme l'urée) pour réduire les émissions de NOx.
- Gestion des HAP :
  - Optimiser les conditions de pyrolyse (température, temps de résidence) pour minimiser la formation de HAP.
  - Utiliser des systèmes de filtration avancés (charbon actif) pour capturer les HAP.

## 4. Caractérisation des biochars

### 4.1 Caractéristiques générales et propriétés du biochar

#### 4.1.1 Teneur en nutriments

Contrairement à l'incinération, la pyrolyse préserve la plupart des nutriments contenus dans la biomasse. Les éléments P et K sont intégralement préservés à des températures typiques de pyrolyse (300 – 800 °C). En revanche, 50 à 80 % du N peut être perdu, dépendant de la concentration initiale en N de la biomasse et de la température de pyrolyse. De l'ordre de 50 % du carbone est conservé.

La teneur en nutriments du biochar dépend de la température de pyrolyse et de la biomasse de départ. Une méta-analyse donne des fractions respectives de N, P et K de 1 %, 0,4 % et 1,9 % dans des biochars de biomasse ligneuse, 1,5 %, 0,8 % et 4,1 % dans des biochars de résidus de culture et 2,4 %, 2,6 % et 2,5 % dans des biochars de fumier et de boues de station d'épuration (Joseph et al, 2021). Toutefois, seule une fraction de ces nutriments est biodisponible aux plantes (N indisponible présent sous la forme de N hétérocyclique par exemple). La même méta-analyse indique que la part de N, P et K biodisponible est respectivement de 0,5 %, 3 % et 9 % dans des biochars de biomasse ligneuse, 0,4 %, 6 % et 22 % dans des biochars de résidus de culture et 5 %, 5 % et 17 % pour des fumiers et de boues de station d'épuration.

#### ❖ Effet fertilisant

La teneur en nutriments des biochars est faible et ils sont peu biodisponibles, c'est pourquoi son impact en tant que fertilisant à proprement parler n'est pas significatif. On peut cependant le combiner avec d'autres fertilisants (composts, effluents de méthaniseur...) pour produire des intrants agricoles bien plus efficaces.

Par exemple, le co-compostage du biochar avec d'autres matières organiques d'un rapport C/N plus faible est intéressant d'une part parce qu'elle permet, le « chargement » du biochar : c'est-à-dire d'augmenter le taux de N, et d'autre part, parce qu'elle peut influencer sur le processus de compostage en : (i) réduisant les pertes de N par volatilisation et lessivage



pendant le compostage, (ii) réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) du processus de compostage, (iii) augmentant la rémanence de C dans le compost et (iv) réduisant la disponibilité de métaux lourds dans le compost.

#### 4.1.2 Acidité (pH) faible

##### ❖ Augmentation du pH du sol

Les biochars sont caractérisés par un pH élevé, compris entre 7 et 10. Un des avantages agronomiques des biochars est de pouvoir rééquilibrer le pH de certains sols trop acides, permettant, entre autres, une meilleure disponibilité des nutriments pour les plantes et influence aussi leur santé.

#### 4.1.3 Porosité et surface spécifique

La porosité du biochar obtenu lui confère une surface spécifique<sup>2</sup> autour de 420 m<sup>2</sup>/g qui conduit à de grandes capacités d'adsorption : c'est en quelque sorte un réservoir qui peut stocker jusqu'à deux fois et demie son volume en eau par exemple. Cependant, cette caractéristique est la plus influencée par les facteurs de production clefs cités en partie 3.3.

##### ❖ Augmentation des capacités de rétention d'eau du sol

Les biochars tendent à augmenter la capacité de rétention d'eau du sol. Des méta-analyses ont montré des augmentations de la capacité de rétention d'eau du sol de 33 à 45% dans des sols à texture grossière et de 9 à 14% dans des sols argileux. Il est important de noter que les impacts les plus significatifs ont été observés à des taux d'application élevés, compris entre 30 et 70 t/ha. La capacité d'infiltration des sols en cas de fortes pluies par exemple est également améliorée.

Dans le cadre de l'utilisation des biochars dans l'agriculture en amendement du sol, c'est probablement leur propriété la plus intéressante. En effet, augmenter la capacité de rétention de l'eau du sol permet une meilleure résilience des systèmes de production face au changement climatique et aux épisodes de sécheresse, et aussi d'économiser la ressource en eau dans le cas de systèmes d'irrigation.

##### ❖ Augmentation de la porosité et de l'aération du sol

Les biochars amendent le sol en augmentant sa porosité et son aération. Une observation aux rayons X a mis en évidence une augmentation de la porosité totale du sol, une augmentation de la connectivité des pores entre eux et le nombre de pores fins dans des sols de différentes textures.

---

<sup>2</sup> La surface spécifique d'un matériau traduit sa capacité à fixer à l'échelle microscopique des molécules à sa surface. Exprimée en m<sup>2</sup>/g, c'est la surface disponible par unité de masse du matériau.



#### 4.1.4 Capacités d'adsorption du biochar

Par sa porosité et d'autres caractéristiques chimiques (faible concentration de groupes O-fonctionnels entre autres), les biochars possèdent des capacités d'adsorption très importantes, leur conférant des propriétés de « capture et relargage lent » de nutriments.

##### ❖ Amélioration de la disponibilité des nutriments présents dans le sol

On peut comparer les biochars à des éponges à nutriments permettant de fixer des nutriments qui pourraient être autrement perdus par lessivage du sol, et ensuite les diffuser de façon lente aux plantes.

##### ❖ Optimisation des nutriments apportés par les fertilisants

De la même manière, associer des biochars à des fertilisants permet de séquestrer leurs nutriments et de les libérer de façon lente aux plantes par le « minage » des microorganismes. Cela permet de baisser les quantités de fertilisants appliqués. Pour information, dans certains cas les nutriments apportés par les fertilisants chimiques peuvent être perdus jusqu'à 60% (après une pluie par exemple). Ainsi l'utilisation des biochars peut baisser le coût d'achats de fertilisants, ce qui est aussi une des propriétés clefs dans le cas d'agricultures intensives en intrants.

##### ❖ Stimulation de la vie microbienne

Dans le cadre d'agriculture reposant sur la fertilité « naturelle » du sol et la biodiversité (agriculture bio, régénérative), les biochars ont aussi des propriétés intéressantes de stimulation de la vie microbienne. Cet effet est permis premièrement par l'augmentation conjointe du pH et de l'aération. Les pores du biochar offrent en outre des habitats propices aux microorganismes. Enfin, les microorganismes sont stimulés par le « minage » des nutriments présents à la surface et dans les pores du biochar (contenus initialement dans le biochar et/ou adsorbés depuis des fertilisants).

##### ❖ Dépollution et filtration (air et eau)

Les capacités d'adsorption des biochars permettent aussi de capturer des contaminants ou des métaux lourds, ce qui les rend aussi pertinents dans la dépollution des sols ou les usages de filtration de l'eau ou de l'air (voir partie 4.2.5).

##### ❖ Bénéfices alimentaire pour l'humain et les animaux d'élevage

A nouveau, les capacités d'adsorption du biochar permet de capter les substances nocives présents dans les systèmes digestifs (bactéries, toxines...). C'est pourquoi on le retrouve en additif dans les compléments alimentaires et autres produits de santé humaine, mais aussi en complément dans l'alimentation animale, notamment bovine (voir partie 4.2.2).



#### 4.1.5 Impacts climatiques : le biochar en puit de carbone

##### ❖ Le contenu carbone ultra durable du biochar : le carbone rémanent

La structure aromatique du biochar, qui résulte de la transformation thermochimique de biomasse durant la pyrolyse, lui confère une décomposition très lente dans le sol : de l'ordre de centaines à des milliers d'années<sup>3</sup>. La température de pyrolyse a de l'importance : une étude a relevé que >80% du biochar est rémanent pour des températures avoisinant 600-700 °C, quand seul <20% l'est pour des températures <450 °C. Le temps de dégradation dépend du type de biochar et du type de sol, c'est un élément souvent débattu au sein de la sphère des auditeurs et certificateurs liée aux crédits carbone, mais dans tous les cas c'est la forme de carbone la plus stable et durable qu'on puisse trouver en agriculture.

##### ❖ Sécurisation du carbone dans le sol : le Priming Effect (PE)

Le *priming effect* (PE) désigne le changement du taux de minéralisation de la matière organique du sol, c'est-à-dire sa décomposition par les microorganismes, qui relâche donc du carbone dans l'atmosphère. L'addition de biochar dans un sol diminue ce taux de minéralisation, on parle de PE négatif. Ce PE négatif s'explique principalement par l'adsorption de composés organiques par le biochar et la formation d'agrégats organo-minéraux qui s'en suit, structures stables qui offrent une protection à la minéralisation par les micro-organismes. Le biochar augmente donc le stock de carbone stabilisé dans le sol, en plus du carbone rémanent qu'il apporte déjà : sa fonction de séquestration de carbone dépasse la seule quantité de carbone qu'il contient.

##### ❖ Réduction d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du sol

L'addition de biochar permet la diminution des émissions de 2 GES du sol : le N<sub>2</sub>O et potentiellement le CH<sub>4</sub> (pour ce dernier, il manque encore de références scientifiques).

##### ❖ Réduction des émissions de GES de l'élevage bovin

L'addition du biochar dans l'alimentation bovine permet aussi, dans une certaine mesure, d'améliorer le transit et donc de baisser les émissions liées aux éructations et flatulences, qui sont des facteurs d'émission non négligeables de l'élevage.

Introduire des biochars dans le sol a donc de multiples effets qui justifient son rôle de « puits de carbone ». Il est cependant important de noter que les méthodologies de comptabilisation carbone utilisée aujourd'hui par les certifications de crédit carbone, ne prennent en compte que le contenu carbone rémanent du biochar. Les effets sur le PE et les émissions de GES du sol ne sont pas considérés, car trop difficiles à quantifier (ils dépendent énormément du type de sol, et de la méthodologie d'analyse utilisée).

<sup>3</sup> Lorsque la biomasse initiale est du fumier ou des boues d'épuration, on parle plutôt de décennies.



## 4.2 Utilisations possibles des biochars

Dans cette partie sont listées les utilisations les plus communes du biochar. Il n'est cependant pas abordé la taille de chacun de ces marchés, ainsi que la pertinence / la compétitivité du biochar pour chaque utilisation. Ces aspects seront présentés dans le rapport dédié au marché du biochar (offre et demande).

### 4.2.1 Utilisations en agronomie

Bien que l'utilisation de biochar soit encore marginale dans les systèmes de cultures mondiaux, elle est en croissance, particulièrement en Chine, mais aussi en Amérique du Nord, en Australie et en Europe (cultures annuelles essentiellement). Trois modes d'utilisation peuvent être distingués :

- En tant que biochar compound fertilizer (BCF) : à des taux de <1 t/ha, par enfouissement adjacent aux graines, au moment du semis : Les BCF sont des pellets ou granulés produits industriellement et composés à 25 % de biochar. L'utilisation en tant que BCF s'observe essentiellement en Chine, bien que des produits similaires émergent en Australie et en Amérique du Nord.
- En application conjointe à un fertilisant organique ou synthétique, à des taux de 1 à 2 t/ha habituellement (par exemple 10 % de biochar dans un compost appliqué à 20 t/ha), au moment du semis, proche des graines ou des jeunes pousses : L'application conjointe de biochar et d'un fertilisant peut convenir à l'agriculture paysanne. Elle fait écho à la terra preta du bassin amazonien, dont la fertilité a été maintenue pendant des siècles.
- En application unique à des taux de 10 t/ha et plus, par incorporation dans la couche superficielle du sol. L'application peut être renouvelée au bout de quelques années (entre 1 et 3 ans) : L'application unique à des taux d'application élevés se fait pour des sols particulièrement pauvres ou fortement acides, dans des cultures horticoles à forte valeur ajoutée, dans des terrains de pelouses (terrains de golf par exemple) ou encore lorsque l'objectif premier est la séquestration de carbone. Elle intervient également dans la réhabilitation de sols pollués (à des taux d'application encore plus importants, dépassant 50 t/ha).
- Une approche émergente consiste à incorporer du biochar dans l'alimentation de ruminants, afin qu'il soit mélangé au fumier au moment du retour du sol.

#### ➤ Impact des biochars sur les rendements de culture

Plus de 1700 études publiées entre 2010 et 2020 décrivent les effets de l'application de biochar sur les rendements de culture. Ces méta-analyses donnent des augmentations moyennes de rendement d'au moins 10%. La plus haute valeur moyenne obtenue est de 42%. La plupart des taux d'application des études considérées sont comprises entre 5 et 20



t/ha, bien que des taux <5 t/h (notamment en mélange avec du fertilisant) aient également eu des effets positifs sur le rendement des cultures).

Dans la plupart des cas il s'agit d'études réalisées en conditions de laboratoire. Les cultures considérées sont essentiellement des cultures annuelles, cette utilisation est largement pressentie comme étant l'utilisation future principale du biochar.

Les sols pauvres ( $CEC^4 < 100 \text{ mmol}_c/\text{kg}$  et contenu de C organique < 20 g/kg) et sableux (dans lesquels la fonction de rétention d'eau du biochar a plus d'impact) sont les plus réceptifs. Les résultats sont également plus importants pour des sols acides (dans lesquels l'augmentation du pH permise par le biochar a plus d'effet).

Il n'en demeure pas moins que le biochar peut n'avoir aucun effet sur les rendements de culture lorsque du biochar pauvre en nutriments est administré sans fertilisant associé, ou lorsque le biochar est appliqué à des sols déjà riches en nutriments.

Le biochar peut même avoir un effet négatif s'il est appliqué dans des doses trop importantes : il réduit alors trop fortement la disponibilité de N et de P pour les cultures. Cela vaut en particulier pour le biochar produit à des températures élevées, qui a une capacité d'adsorption plus importante.

De façon générale, l'impact du biochar sur les cultures agricoles est considéré comme positif par la sphère scientifique. En revanche il est presque non pertinent d'avancer des fourchettes d'impacts sur les rendements telle l'influence de nombreux facteurs est décisive (type de biochar, type de sol, type de culture, type de climat, pratiques agricoles). Ainsi il est important d'étudier la littérature scientifique abordant chaque situation spécifique.

On peut aussi noter que bien que la littérature scientifique récente soit abondante à ce sujet, les périodes d'expérimentations n'ont pas encore atteint des durées suffisantes pour réellement étudier les effets long-terme du biochar.

#### 4.2.2 Utilisations pour l'alimentation animale et humaine

L'utilisation des biochars dans l'alimentation animale et humaine est un domaine émergent qui suscite un intérêt croissant en raison de leurs propriétés bénéfiques pour la santé et la digestion. Cependant, cette application doit être abordée avec prudence, car les biochars peuvent contenir des contaminants ou des impuretés selon leur source et leur méthode de production. Ci-après, une explication détaillée de leurs utilisations potentielles, des avantages et des précautions à prendre :

##### ➤ Amélioration de la digestion et de la santé animale

Le biochar peut adsorber les mycotoxines (comme l'aflatoxine) présentes dans les aliments pour animaux, réduisant ainsi leur toxicité. Par exemple, des études ont montré que l'ajout

<sup>4</sup> *Cation exchange capacity*, indicateur clef de la fertilité du sol



de biochar à l'alimentation des volailles réduit les effets néfastes des mycotoxines sur leur santé. Ils améliorent également la flore intestinale ; Le biochar peut servir de support pour les microorganismes bénéfiques dans le système digestif des animaux, améliorant ainsi la digestion et l'absorption des nutriments. Enfin, l'ajout de biochar à l'alimentation des ruminants (bovins, ovins) peut réduire les émissions de méthane en modifiant la fermentation dans le rumen.

Les taux d'incorporation varient généralement entre 0,5 % et 2 % de la ration alimentaire, selon l'espèce animale et l'objectif visé. Cette alimentation nécessite des précautions ; le biochar doit être produit à partir de biomasses propres (sans contaminants) et traité thermiquement pour éliminer les impuretés. Une certification de qualité est recommandée.

#### ➤ Utilisation dans l'alimentation humaine

Le biochar est utilisé comme complément alimentaire pour adsorber les toxines dans le système digestif, améliorant ainsi la santé intestinale. Par exemple, il est utilisé dans certains pays pour traiter les intoxications alimentaires. Celui-ci peut contenir des minéraux bénéfiques (calcium, magnésium, potassium) qui sont libérés progressivement dans le système digestif.

En revanche, les doses recommandées pour les humains sont généralement faibles (quelques grammes par jour), et l'utilisation doit être supervisée par un professionnel de santé. Le biochar doit être produit à partir de sources sûres et certifié pour une utilisation alimentaire. Les contaminants (métaux lourds, HAP) doivent être strictement contrôlés. Une utilisation excessive peut entraîner des déséquilibres minéraux ou des blocages intestinaux.

### 4.2.3 Utilisations pour dépollution ou restauration des sols

Plusieurs études ont montré que le biochar réduit l'assimilation de métaux lourds par les plantes. Une méta-analyse donne une réduction moyenne de la concentration en Cd, Pb, Cu et Zn de 38, 39, 25 et 17% respectivement, pour des taux d'application de 10 t/ha et plus. À l'instar des nutriments, ce sont les groupes O-fonctionnels à la surface du biochar qui peuvent immobiliser les métaux lourds, *via* diverses réactions chimiques.

La fonction de mitigation de la teneur des cultures en métaux lourds est dépendante du type de biochar, des propriétés du sol, du type de culture et des métaux lourds en question. À noter enfin que des biochars produit à partir de boues de station d'épuration ou de bois traité peuvent contenir des traces de métaux lourds (certains métaux tels Cd, Zn ou As peuvent être volatilisés au cours de la pyrolyse mais toujours que partiellement).



Les biochars sont efficaces pour adsorber les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)<sup>5</sup>, les pesticides et autres polluants organiques, limitant leur migration dans les eaux souterraines.

➤ **Restauration des sites miniers / paysagisme urbain / projets de reforestation**

Les anciens sites miniers sont souvent caractérisés par des sols dégradés, acides et contaminés par des métaux lourds. Les biochars peuvent aider à leur réhabilitation :

- Neutralisation de l'acidité : Les biochars, de nature alcaline, peuvent augmenter le pH des sols acides, réduisant ainsi la mobilité des métaux lourds et améliorant les conditions pour la croissance des plantes.
- Stabilisation des métaux lourds : En adsorbant les métaux lourds, les biochars réduisent leur toxicité et favorisent la recolonisation végétale.
- Amélioration de la structure du sol : Les biochars augmentent la porosité et la rétention d'eau, ce qui est essentiel pour restaurer les sols compactés et érodés des sites miniers.

En Australie, des biochars issus de déchets forestiers ont été utilisés pour stabiliser les métaux lourds et restaurer la végétation sur des sites miniers abandonnés. Pareil aux USA, précisément dans l'état de New York, des biochars ont été testés pour réduire la concentration de plomb dans les sols des jardins communautaires.

#### 4.2.4 Utilisations dans des matériaux de construction

➤ **Biochar dans les ciments et bétons**

Le biochar, grâce à sa structure poreuse et à sa surface spécifique élevée, agit comme un renfort dans la matrice cimentaire. Il améliore la résistance à la compression et à la traction du béton. Il est un matériau léger. Son incorporation dans les bétons permet de réduire leur densité tout en maintenant, voire en améliorant, leurs propriétés mécaniques. Il possède, grâce à sa structure poreuse des propriétés thermiques et acoustique.

Le biochar réduit par ailleurs la perméabilité du béton, limitant la pénétration d'eau et d'agents corrosifs comme les chlorures et les sulfates. Cela prolonge la durée de vie des structures exposées à des environnements agressifs (zones côtières, routes salées en hiver). En améliorant la cohésion de la matrice cimentaire, le biochar réduit la formation de microfissures, qui sont souvent le point de départ de dommages plus importants. Des études ont montré que l'ajout de 2 à 5 % de biochar dans les bétons améliore leur résistance mécanique et leurs propriétés isolantes.

---

<sup>5</sup> Beesley, L., et al. (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269-3282; Ahmad, M., et al. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33



#### ➤ Biochar dans les bitumes et enrobés routiers

Le biochar améliore la résistance des bitumes à la déformation permanente, un problème courant sur les routes fortement fréquentées. Il augmente la flexibilité des enrobés, réduisant ainsi les dommages causés par les cycles de gel-dégel et les variations de température. Le biochar protège le bitume contre l'oxydation et le vieillissement, prolongeant la durée de vie des routes et réduisant les coûts d'entretien.

#### ➤ Biochar dans les composites et matériaux innovants

Le biochar est utilisé comme charge dans les composites polymères pour améliorer leurs propriétés mécaniques et thermiques, dans les revêtements pour améliorer leurs propriétés isolantes. Il peut être également incorporé dans les panneaux isolants pour améliorer leurs performances thermiques et acoustiques.

### 4.2.5 Utilisations pour la filtration d'eau et de l'air

L'utilisation des biochars pour la filtration de l'eau et de l'air est une application fréquente en raison de leurs propriétés absorbantes, de leur structure poreuse et de leur surface spécifique élevée. Ces caractéristiques permettent aux biochars de piéger efficacement les polluants, les particules et les contaminants, offrant ainsi des solutions durables pour la purification de l'eau et de l'air. Voici une explication détaillée de ces applications :

#### ➤ Filtration de l'eau

Les polluants sont piégés dans les pores du biochar grâce à des forces intermoléculaires. Les principales cibles sont les métaux lourds (le plomb (Pb), le cadmium (Cd), l'arsenic (As) et le mercure (Hg)) ; les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les pesticides, les médicaments et autres composés organiques. Le biochar peut adsorber les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et les phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), réduisant ainsi l'eutrophisation des eaux.

Les biochars sont réutilisables après régénération (par lavage ou chauffage). Le biochar est une alternative économique aux adsorbants traditionnels comme le charbon activé.

#### ➤ Filtration de l'air

Le biochar peut adsorber le  $\text{CO}_2$  et le méthane ( $\text{CH}_4$ ), contribuant à la réduction des émissions. Il élimine les  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  et les COV émis par les usines et les véhicules. Il est efficace pour capturer les particules fines, améliorant ainsi la qualité de l'air intérieur et extérieur.

### 4.2.6 Utilisations comme alternative aux matériaux chimiques

Il existe aujourd'hui de nombreuses start-ups cherchant de nouvelles applications au biochar en tant qu'alternative ou substituant dans l'industrie chimique, on donne ici l'exemple du noir de carbone : l'utilisation des biochars comme alternative au noir de carbone, notamment dans les pneus et d'autres applications industrielles, est un domaine en pleine expansion. Le noir de carbone, traditionnellement utilisé comme renfort dans les



élastomères (caoutchoucs), est produit à partir de combustibles fossiles et a un impact environnemental significatif. Le biochar, produit à partir de biomasses renouvelables, offre une alternative durable et écologique.

### 4.3 Certification, normes et seuils

Les certifications et les normes relatifs aux biochars sont essentiels pour garantir leur qualité, leur sécurité et leur conformité aux réglementations internationales. Ces certifications couvrent des aspects tels que la pureté, la teneur en contaminants, les propriétés physico-chimiques et les applications spécifiques (agriculture, filtration, etc.). Ci-dessous une explication détaillée des principales certifications et normes, ainsi que des risques liés aux contaminants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Dans cette partie seules les certifications de « qualité » des biochars sont détaillées. Tout ce qui concerne les certifications liées à la génération de crédit carbone sera abordé dans le rapport dédié aux outils de finance climat.

#### 4.3.1 European Biochar Certificate (EBC)

L'EBC est la norme la plus reconnue en Europe pour les biochars. Elle garantit leur qualité et leur sécurité pour des applications agricoles, environnementales et industrielles. Elle a été développée pour limiter les risques liés à l'utilisation du biochar et pour aider les utilisateurs et producteurs de biochar à prévenir ou au moins à réduire tout danger pour la santé et pour l'environnement lors de la production et de l'utilisation du biochar.

##### ➤ Principales exigences de la certification EBC

Pour obtenir la certification EBC, les producteurs de biochar doivent respecter un ensemble d'exigences strictes, couvrant tous les aspects de la production, de la qualité et de la traçabilité. Les principales exigences sont :

- L'inscription : les producteurs doivent s'inscrire sur le site web de l'EBC, figurer au registre et fournir des informations détaillées sur leur processus de production.
- Lot de production : chaque lot de production doit être enregistré sur le site web de l'EBC et recevoir un numéro d'identification unique et un code QR. Un lot de production ne peut excéder 365 jours. La température de pyrolyse et la composition de la biomasse ne doivent pas varier de plus de 20 % pendant la production.
- L'échantillonnage : un échantillonnage représentatif doit être effectué par un auditeur et un plan d'échantillonnage doit être soumis et approuvé par Carbon Standards International (CSI – l'entreprise détenant les droits sur EBC).
- La biomasse : Seule la biomasse figurant sur la liste positive de l'EBC peut être utilisée<sup>6</sup>. La biomasse ne doit contenir aucun résidu, solvant ou autre impureté toxique.



- La technologie de pyrolyse : l'utilisation de chaleur excessive et de produits de pyrolyse liquides et gazeux doit être optimisée. Les valeurs limites d'émission définies au niveau national doivent être respectées.
- Les propriétés du biochar : le biochar doit être analysé selon le package d'analyse de base EBC. Les valeurs limites et exigences de déclaration doivent être respectées (ex. : teneur en carbone organique, pH, rapport H/C, contaminants).
- Santé et sécurité : une fiche de données de sécurité doit être disponible pour chaque lot de biochar. Les travailleurs doivent être informés des dangers possibles et disposer de l'équipement de protection individuelle nécessaire.
- Traçabilité : le numéro d'identification et le code QR garantissent la traçabilité de la matière première de biomasse, des conditions de production et de la qualité.

➤ **Cahier des charges de la certification EBC**

Le cahier des charges de l'EBC définit les règles et les procédures à suivre pour obtenir et maintenir la certification. Il est décliné en 5 classifications, en fonction de l'usage du biochar. Les paramètres contrôlés et taux d'exigence sont de plus en plus élevés en fonction des risques liés à l'utilisation :

*Tableau 6 : Différentes classes de certification EBC*

Classification	Application	Paramètres contrôlés
EBC - BasicMaterials	Matériaux de base (construction, filtration, etc.).	Carbone organique, HAP, métaux lourds.
EBC - Urban	Applications urbaines (gestion des eaux pluviales, espaces verts).	Carbone organique, HAP, métaux lourds.
EBC - Agro	Applications agricoles (amendement des sols).	Carbone organique, pH, rapport H/C, métaux lourds, HAP.
EBC - AgroOrganic	Application agricoles pour les systèmes certifiés bio	Idem + matière première bio
EBC - Consumer Materials	Matériaux destinés aux consommateurs (filtration de l'eau, cosmétiques).	Carbone organique, HAP, métaux lourds, PCB.
EBC - Feed	Alimentation animale.	Carbone organique, HAP, dioxines, PCB, métaux lourds.
EBC – FeedPlus	Alimentation animale avec des critères de qualité plus élevés.	Seuils plus bas

*Tableau 7 : Valeurs limites des paramètres du biochar*

Paramètre	Valeur limite (EBC-Basic)	Valeur limite (EBC-Feed+)	Unité
Plomb (Pb)	< 150	< 10	mg/kg
Cadmium (Cd)	< 1,5	< 0,5	mg/kg
Arsenic (As)	< 13	< 2	mg/kg
HAP totaux	< 4	< 1	mg/kg
Dioxines	Non applicable	< 1	ng TEQ/kg



PCB totaux	Non applicable	< 0,2	mg/kg
------------	----------------	-------	-------

### 4.3.2 Autres certifications

La certification EBC est pour le moment le schéma de certification dominant dans le secteur du biochar. On peut citer d'autres types de certifications pertinentes, bien que pour le moment peu employé :

- WBC (World Biochar Certificate) : autre certification développée et détenue par CSI, elle est moins exigeante que l'EBC mais respecte les normes internationales.
- L'USBI (US Biochar Initiative) travaille sur une autre certification, qui ne sera pas dépendante des normes Européennes et des conditions d'analyses des laboratoires européens. Pour le moment, les lots de biochar échantillonnés pour l'EBC doivent être envoyés dans des laboratoires en Europe.
- GMP+ (Good Manufacturing Practice) pour l'alimentation animale
- REACH (Registration, Evaluation, autorisation and Restriction of Chemicals) qui est une certification généraliste pour les produits dans l'industrie chimique.

La possibilité de certifier le biochar permet de valider sa qualité et son absence de contaminant pour une application. C'est un facteur clef nécessaire à la commercialisation du biochar dans bien des contextes. En effet, le biochar étant un matériau encore peu connu, quelle que soit son utilisation, le passage par une certification de qualité permet de rassurer le potentiel consommateur.

## 5. Les différents modèles de production

### 5.1 Modèle Industriel

Dans le modèle industriel, la production de biochar est réalisée à grande échelle, avec des équipements spécialisés et des processus automatisés. Ce modèle est généralement associé à des installations à forte capacité de production, avec des investissements significatifs en infrastructure. L'objectif principal est de maximiser la production de biochar, tout en optimisant les coûts et les rendements. Selon la manière dont le biochar est produit et utilisé, plusieurs sous-modèles peuvent être distingués.

#### 5.1.1 Pure player : Produire et vendre uniquement du biochar et ses sous-produits

Un **pure player** dans le secteur de la production de biochar se concentre uniquement sur la production, la vente et la distribution du biochar et de ses sous-produits. Dans ce modèle,



L'ensemble du processus est orienté vers l'optimisation de la production de biochar, que ce soit pour des applications agricoles, environnementales ou industrielles.

- **Caractéristiques d'un producteur de biochar de type « pure player » :**
  - L'entreprise se spécialise exclusivement dans la **fabrication de biochar**.
  - Le **biochar** produit peut être destiné à différents marchés, comme l'agriculture (amendement des sols), la gestion des émissions de CO<sub>2</sub> (captation du carbone), ou même la production d'énergie.
  - L'accent est mis sur la production en **grande quantité**, avec des investissements dans des **installations de pyrolyse** hautement performantes.

On peut citer par exemple NetZero ou bien HUSK.

### 5.1.2 Biochar comme co-produit

Le modèle de **biochar comme co-produit** implique que le biochar est une sous-production ou un produit secondaire dérivé d'un processus principal, comme la production d'électricité, de chaleur ou d'assainissement. Dans ce cas, le biochar n'est pas l'objectif principal de la production, mais il est valorisé dans une logique de maximisation des ressources et des synergies.

#### [De la production d'électricité](#)

Dans ce modèle, le biochar est produit en même temps que de l'électricité à partir de la **gazéification de biomasse**. Le processus génère des gaz de synthèse qui sont utilisés pour produire de l'électricité, tandis que le biochar est récupéré comme sous-produit. Les installations sont souvent associées à des centrales de biomasse ou à des projets de production d'énergie renouvelable.

**Exemples d'application :** Des centrales gazogènes peuvent permettre à des industriels de l'anacarde, de l'arachide ou du riz de faire de l'autoproduction d'électricité à partir des coques ou balles. Le biochar, produit lors de ce processus, peut être utilisé pour des applications agricoles ou énergétique et permettre d'améliorer la rentabilité de la centrale électrique.

#### [De la production de chaleur](#)

Ici la biomasse est utilisée pour la production de chaleur en brûlant les gaz de pyrolyse pour des applications où la combustion directe n'est pas adaptée. Le biochar, récupéré comme sous-produit, peut ensuite être utilisé comme amendement du sol ou dans d'autres applications industrielles.

**Exemples d'application :** Les pyrolyseurs de coques d'anacarde utilisés en Afrique de l'Ouest permettent d'alimenter en chaleur les chaudières utilisées pour le décorticage de noix de cajou, la production d'huile de coton ou le séchage de mangue. Le biochar obtenu est un co-produit valorisé généralement en combustible secondaire.



## De l'assainissement

Dans ce cas, la pyrolyse de la biomasse est utilisée pour produire du biochar tout en désinfectant ou assainissant des déchets organiques. Ce processus est particulièrement utile dans les applications de gestion des déchets solides, comme le traitement des boues d'épuration ou des déchets agricoles. Le biochar produit est ensuite utilisé pour améliorer la qualité des sols ou pour d'autres applications environnementales.

## 5.2 Modèle Artisanal

Le modèle artisanal de production de biochar est caractérisé par une petite échelle de production, des installations plus simples, et un processus moins automatisé. Il est pratiqué par des agriculteurs, des petites entreprises ou des coopératives qui produisent du biochar pour une utilisation locale, souvent avec des ressources limitées.

### 5.2.1 Caractéristiques du modèle artisanal

- **Échelle réduite** : La production de biochar se fait à une échelle réduite, avec des installations artisanales ou semi-industrielles, utilisant des équipements simples comme des fours ou des réacteurs à petite échelle.
- **Méthodes manuelles ou semi-automatisées** : Dans ce modèle, les processus sont souvent manuels ou semi-automatisés. Cela signifie que la production est plus flexible, mais aussi moins efficace en termes de volume.
- **Utilisation locale** : Les producteurs artisanaux de biochar produisent généralement pour un marché local ou régional, souvent en réponse à une demande spécifique d'agriculteurs ou de petites industries locales. Le biochar est utilisé pour l'amendement des sols, la gestion des eaux ou d'autres applications agricoles.
- **Faibles coûts d'investissement initiaux** : En raison de l'échelle réduite et des technologies simples utilisées, les coûts d'investissement initiaux sont bien inférieurs à ceux des modèles industriels.

### 5.2.2 Exemples d'applications

- **Projets carbone « artisan »** : Un modèle de projet biochar qui se développe beaucoup ces dernières années est le projet de crédits carbone « artisans » ou « artisans pro ». Ils sont portés par un développeur de projet qui forme des agriculteurs ou des entreprises locales spécialisées, et leur distribue des équipements de pyrolyse artisanaux. Le biochar ainsi produit est soit directement utilisé par les producteurs, soit distribué à des agriculteurs. Le développeur met aussi en place un système de traçabilité et peut ainsi générer des crédits carbones, dont la valeur est partagée avec les artisans. Le modèle artisan pro est plus strict et nécessite que la production de biochar soit localisée et contrôlée par des experts. Ces deux modèles



génèrent des crédits carbone selon la certification Artisan C-sink (*voir le rapport sur les outils de la finance climat pour plus d'informations*).

- **Entreprenariat rural** : Il existe des petites entreprises comme Agro Eco Service au Bénin qui collectent des déchets agricole ou d'activité de transformation et réalise de la carbonisation à petite échelle pour la production de biochar. Pour plus de valeur ajoutée, le biochar est parfois mélangé à du compost et d'autres compléments pour un apport complet au sol.
- **Projets communautaires** : Certaines coopératives ou projets communautaires de petite taille mettent en commun des moyens de production et de la biomasse pour produire du biochar pour des usages multiples, y compris l'amélioration de la gestion des déchets organiques et la séquestration du carbone dans les sols.

## 6. Challenges et clefs de succès

### 6.1 Pour les projets industriels

Les projets industriels de production de biochar rencontrent des défis majeurs, notamment des marges faibles, des marchés incertains, des coûts logistiques élevés et des exigences strictes en matière de qualité et de certifications, nécessitant une optimisation continue des procédés, une diversification des revenus et une gestion rigoureuse des ressources pour garantir leur viabilité économique et environnementale.

**Marges faibles et marchés incertains** : les revenus issus de la vente de biochar sont souvent limités, et les marchés restent instables. Il y a nécessité de développer des modèles économiques diversifiés avec plusieurs sources de revenus (ex : crédits carbone, valorisation énergétique).

**Optimisation des paramètres de production** : Il est crucial d'adapter régulièrement les paramètres de production (température, durée de pyrolyse, etc.) pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs finaux. Il faut investir dans des équipements modulables et une équipe technique compétente.

**Qualité et constance du biochar** : produire un biochar de haute qualité, adapté à un usage précis, de manière constante est essentiel pour fidéliser les clients. Il faut mettre en place des procédures strictes de contrôle qualité.

**Certifications et traçabilité** : le respect des normes et la traçabilité des procédés sont nécessaires pour obtenir des certifications (ex : European Biochar Certificate). La formation d'une équipe RH qualifiée et pouvant faire respecter des protocoles rigoureux reste utile.

**Coûts de la biomasse et logistique** : le prix de la biomasse et la logistique de collecte représentent des coûts significatifs. Il faut analyser les gisements de biomasse disponibles, privilégier les déchets à évacuer et localiser l'usine près des sources pour réduire les coûts.



**Revenus des crédits carbone :** les revenus issus des crédits carbone sont souvent indispensables pour assurer la viabilité financière du projet. Comme solution, il faut intégrer ces revenus dans le modèle économique dès la conception.

**Localisation et dimensionnement de l'usine :** une analyse précise des gisements de biomasse et des marchés locaux est nécessaire pour optimiser la localisation et la taille de l'usine, réduisant ainsi l'impact environnemental. Il faut réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV).

En Afrique :

- **L'accès limité aux équipements** demeure une préoccupation majeure ; les équipements doivent souvent être fabriqués sur mesure, ce qui prolonge les délais d'installation.
- **La maintenance des équipements** peut être un défi en raison du manque de pièces détachées et de techniciens qualifiés. Il faut privilégier des équipements robustes et faciles à entretenir, et former localement des techniciens.

## 6.2 Pour les projets artisanaux

La production artisanale de biochar, bien que prometteuse pour les communautés locales, fait face à des défis spécifiques liés à l'accès à la technologie, à la formation, à la qualité des produits et à la structuration des marchés, nécessitant des solutions adaptées et innovantes pour assurer sa viabilité et son impact.

**Accès à la technologie :** Les projets artisanaux rencontrent souvent des difficultés à accéder à des technologies de pyrolyse efficaces et abordables. Des solutions low-cost et adaptées aux contextes locaux sont nécessaires.

**Formation et compétences :** La production de biochar nécessite des compétences spécifiques en pyrolyse et en gestion des déchets. Des programmes de formation pour les artisans sont essentiels.

**Qualité et standardisation :** La qualité du biochar peut varier considérablement dans les projets artisanaux, ce qui limite son utilisation commerciale. Des protocoles simples mais stricts doivent être établis pour assurer une qualité constante.

**Débouchés commerciaux :** Les marchés locaux pour le biochar sont souvent limités ou peu structurés. Identifier des débouchés locaux (agriculture, énergie) et sensibiliser les utilisateurs potentiels est crucial.

**Financement :** Les projets artisanaux manquent souvent de capital pour investir dans des équipements et des matières premières. Explorer des mécanismes de microfinance ou des partenariats avec des ONG peut être une solution.



Pour conclure, les projets industriels et artisanaux de production de biochar doivent relever des défis techniques, économiques et logistiques complexes pour atteindre leur plein potentiel. Les clefs de succès reposent sur une optimisation rigoureuse des procédés de production, une diversification stratégique des sources de revenus (incluant les crédits carbone, la valorisation énergétique et les sous-produits), ainsi que sur la formation et la mobilisation d'équipes qualifiées. Une analyse approfondie des ressources disponibles, comme les gisements de biomasse, et des marchés locaux est également indispensable pour adapter les projets aux réalités territoriales et maximiser leur impact environnemental, économique et social. Ces éléments, combinés à une gestion rigoureuse et innovante, sont essentiels pour assurer la viabilité et la durabilité des initiatives de production de biochar, qu'elles soient à grande ou petite échelle.

## 7. Bibliographie et Netographie

A. Dufour, Y. Le Brech, G. Mauviel, (2018). Pyrolyse, liquéfaction et gazéification de la biomasse.

Amin FR, Huang Y, He Y, Zhang R, Liu G, Chen C, (2016). Applications du biochar et techniques modernes de caractérisation. Technologies propres et politique environnementale 18(05), p1457-1473.

Biochar international : guides basic-principles-of-biochar-production, en ligne, consulté le 06 février 2025.

Borel LD, Lira TS, Ribeiro JA, Ataíde CH, Barrozo MA, (2018). Pyrolyse des drêches de brasserie : étude cinétique et identification des produits. Cultures et produits industriels, p21:388-395

Borel LD, Reis Filho AM, Xavier TP, Lira TS, Barrozo MA, (2020). Une étude sur la pyrolyse du principal résidu de l'industrie brassicole. Biomasse et bioénergie, p140:105-698

Budai, A., Zimmerman, A.R., Cowie, A.L., Webber, J.B.W., Singh, B.P., Glaser, B., Masiello, C.A., Andersson, D., Shields, F., Lehmann, J. and Camps Arbostain, M., (2013). Biochar carbon stability test method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability. International Biochar Initiative, pp. 1-10.

Cornelissen, G., Makate, C., Mulder, J., Janssen, J., Trimarco, J., Obia, A., Martinsen, V. and Sørmo, E. (2024). Emission Factors for Biochar Production from Various Biomass Types in Flame Curtain Kilns. Applied Sciences, 14(21), p.9649.

Cornelissen, G., Sørmo, E., Anaya de la Rosa, R. K., and Ladd, B. (2023). Flame curtain kilns produce biochar from dry biomass with minimal methane emissions. Science of the Total Environment, 903, 166547.



- Edwige Privas, (2013). Matériaux ligno-cellulosiques : "Élaboration et caractérisation".
- Glaser, B. and Lehr, V.I., (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: a meta-analysis. *Scientific reports*, 9, 9338.
- Guillaume PILON, (2013). Etude de production ET DE CARACTERISet de caractérisation de biocharbons de Panic Erige (*Panicum virgatum* L.) obtenus par Pyrolyse.
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A.C., Van Groenigen, J.W., Hungate, B.A. and Verheijen, F., (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental research letters*, 12(5), p. 053001.
- Joseph, S., Cowie, A.L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M.L., Graber, E.R., Ippolito, J.A., Kuzyakov, Y. and Luo, Y., (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *Gcb Bioenergy*, 13(11), pp.1731-1764.
- Karan, S.K., Woolf, D., Azzi, E.S., Sundberg, C. and Wood, S.A., (2023). Potential for biochar carbon sequestration from crop residues: A global spatially explicit assessment. *GCB Bioenergy*, 15(12), pp.1424-1436.
- Lefebvre, D., Fawzy, S., Aquije, C.A., Osman, A.I., Draper, K.T. and Trabold, T.A., (2023). Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar. *Biochar*, 5(1), p.65.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387.
- Marguerite Rinaudo, (JIREC 2006). La biomasse végétale, source de molécules organiques.
- NetZero, STOA (Février 2023). Document de vulgarisation sur les effets du biochar, Due Diligence agronomique. Résumé.
- Paul IWUNZE TRIFYL / IMT MINES-ALBI, (2020). Benchmarking des technologies de pyrolyse et de gazéification.
- Schmidt, H.P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T.D., Sánchez Monedero, M.A. and Cayuela, M.L., (2021). Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13(11), pp.1708-1730.
- The Char Team, (2015). Analyse des propriétés de biochars.
- Whitman, T., Singh, B.P. and Zimmerman, A.R., (2015). Priming effects in biochar-amended soils: implications of biochar-soil organic matter interactions for carbon storage. In Lehmann, J. and Joseph, S. eds., 2015. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation* (pp. 453-487). Routledge.



Zhou Y et al., (2021). Production et impact bénéfique du biochar pour une application environnementale : une revue complète. *Bioresource Technology*, p337:125-451.

Zimmerman, A.R. and Gao, B., (2013). The stability of biochar in the environment. In Ladygina, N. and Rineau, F. eds., 2013. *Biochar and soil biota*, (pp. 1-40). CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, U.S.A.



## Annexe 1 : Liste non-exhaustive des équipementiers produisant des technologies de production de biochar en EU et aux USA

Nom	Continent	Pays	Website
<b>EUROPE</b>	<b>35</b>		
AquaGreen	EU	Allemagne	<a href="https://aquagreen.dk/">https://aquagreen.dk/</a>
BiokW	EU	Italie	<a href="http://www.biokw.it/">http://www.biokw.it/</a>
Biomacon	EU	Finlande	<a href="https://www.biomacon.com/?lang=en">https://www.biomacon.com/?lang=en</a>
Carboculture	EU	Finlande	<a href="https://carboculture.com/">https://carboculture.com/</a>
Carbofex	EU	Finlande	<a href="https://carbofex.fi/">https://carbofex.fi/</a>
Carboforce	EU	Allemagne	<a href="https://www.carbo-force.de/en">https://www.carbo-force.de/en</a>
Carbon Char Store	EU	UK	<a href="https://carboncharstore.com/">https://carboncharstore.com/</a>
Carbonauten	EU	Allemagne	<a href="https://carbonauten.com/">https://carbonauten.com/</a>
Carbonis	EU	Allemagne	
CTS (Carbon Technik Schuster)	EU	Danemark	<a href="https://ct-schuster.de/">https://ct-schuster.de/</a>
EQTEC	EU	Irlande	<a href="https://eqtec.com/">https://eqtec.com/</a>
Euthenia	EU	Espagne	<a href="https://www.euthenia-energy.com/">https://www.euthenia-energy.com/</a>
Evac	EU	Finlande	<a href="https://evac.com/">https://evac.com/</a>
Haffner Energy	EU	France	<a href="https://www.haffner-energy.com/">https://www.haffner-energy.com/</a>
MASHMAKES	EU	Danemark	<a href="https://www.mashmakes.com/">https://www.mashmakes.com/</a>
Meva Energy	EU	Suisse	<a href="https://mevaenergy.com/">https://mevaenergy.com/</a>
NetZero	EU	Suisse	<a href="http://www.biochar.info/">http://www.biochar.info/</a>
NGE	EU	Autriche	<a href="https://nge.at/en/">https://nge.at/en/</a>
Organic Full Technology	EU	Danemark	<a href="https://www.organicfueltechnology.com/">https://www.organicfueltechnology.com/</a>
Polytechnik	EU	Autriche	<a href="https://polytechnik.com/en/">https://polytechnik.com/en/</a>
PYREG	EU	Allemagne	<a href="https://pyreg.com/de/">https://pyreg.com/de/</a>
PyroCore	EU	Belgique	<a href="https://pyrocore.com/">https://pyrocore.com/</a>
PyroCCS	EU	Allemagne	<a href="https://pyroccs.com/">https://pyroccs.com/</a>
RE-CORD	EU	Italie	<a href="https://www.re-cord.org/">https://www.re-cord.org/</a>
Rouge H2 Engineering	EU	Autriche	<a href="https://rgh2.com/">https://rgh2.com/</a>
Rainbow Bee Eater	EU	Autriche	<a href="https://www.rainbowbeeeater.com.au/">https://www.rainbowbeeeater.com.au/</a>
SOLER	EU	France	<a href="https://soler-group.com/">https://soler-group.com/</a>
SPSC	EU	Danemark	<a href="https://www.sp-sc.de/en/">https://www.sp-sc.de/en/</a>
Standard Gas	EU	UK	<a href="https://standardgas.com/">https://standardgas.com/</a>
Standard Bio	EU	Norvège	<a href="https://www.standard.bio/">https://www.standard.bio/</a>
Stiesdal	EU	Danemark	<a href="https://www.stiesdal.com/skyclean/">https://www.stiesdal.com/skyclean/</a>
SYNCRAFT	EU	Autriche	<a href="https://www.syncraft.at/">https://www.syncraft.at/</a>
TORRCoal	EU	Pays-bas	<a href="https://www.torrcoal.com/">https://www.torrcoal.com/</a>
VOW	EU	Norvège	<a href="https://www.vowasa.com/">https://www.vowasa.com/</a>
Xylergy	EU	Belgique	<a href="https://xylergy-group.com/en/">https://xylergy-group.com/en/</a>



Nom	Continent	Pays	Website
<b>AMERIQUE DU NORD</b>	<b>36</b>		
Advanced Biorefinery Inc	Canada		<a href="http://www.advbiorefineryinc.ca/">http://www.advbiorefineryinc.ca/</a>
Ag Waste Solutions	USA	California	<a href="http://www.agwastesolutions.com/">http://www.agwastesolutions.com/</a>
Ambient Energy LLC	USA	Washington	-
Airex Energie Inc	Canada	Quebec	<a href="https://airex-energy.com/">https://airex-energy.com/</a>
Avello Bioenergy	USA	Iowa	<a href="http://www.avellobioenergy.com/">http://www.avellobioenergy.com/</a>
Bioenergy Design	USA	California	<a href="https://bioenergydesign.com/">https://bioenergydesign.com/</a>
Bio-Techfar	Canada	Ontario	<a href="http://www.bio-techfar.com/">http://www.bio-techfar.com/</a>
FEECO	USA	Wisconsin	<a href="http://www.feeco.com/">http://www.feeco.com/</a>
Frontline Bioenergy	USA	Iowa	<a href="http://frontlinebioenergy.com/">http://frontlinebioenergy.com/</a>
Genesis Industries	USA	California	<a href="http://www.egenindustries.com/">http://www.egenindustries.com/</a>
Heyl & Patterson	USA	Pennsylvania	<a href="https://www.hpprocess.com/calciners/">https://www.hpprocess.com/calciners/</a> <a href="https://icminc.com/process-technologies/advanced-gasification/">https://icminc.com/process-technologies/advanced-gasification/</a>
ICM Inc	USA	Kansas	<a href="https://www.nulifegreentech.com/">https://www.nulifegreentech.com/</a>
Nulife Green	Canada	Saskatchewan	<a href="https://www.nulifegreentech.com/">https://www.nulifegreentech.com/</a>
Pyrovac	Canada	Quebec	<a href="https://pyrovac.com/en/projects/">https://pyrovac.com/en/projects/</a>
Schenck Process LLC	USA	Illinois	<a href="https://www.schenckprocess.com/">https://www.schenckprocess.com/</a>
Aries Clean Energy	USA	Tennessee	<a href="https://ariescleanenergy.com/">https://ariescleanenergy.com/</a>
BC Biocarbon	Canada	Brit Columbia	<a href="https://www.bcbiocarbon.com/">https://www.bcbiocarbon.com/</a>
BiocharNow	USA	Colorado	<a href="http://www.biocharnow.com/">http://www.biocharnow.com/</a>
Bioforcetech	USA	California	<a href="http://bioforcetech.com/">http://bioforcetech.com/</a>
Biogreen			
Energy/VOW/Scanship	USA		<a href="http://biogreen-energy.com/">http://biogreen-energy.com/</a>
Char Technologies	Canada	Ontario	<a href="http://www.charbiocarbon.com/">http://www.charbiocarbon.com/</a>
Coaltec Energy USA	USA	Indiana	<a href="http://www.coaltecenergy.com/">http://www.coaltecenergy.com/</a>
Earthcare LLC	USA	Indiana	<a href="http://www.earthcarellc.com/">http://www.earthcarellc.com/</a>
Smartcare Terra LLC	USA	Kansas	<a href="https://www.smartterracare.com/biochar/">https://www.smartterracare.com/biochar/</a>
Qualterra	USA	Washington	<a href="https://ag.energy/">https://ag.energy/</a>
All Power Labs	USA	California	<a href="http://www.allpowerlabs.com/">http://www.allpowerlabs.com/</a>
ARTi	USA	Iowa	<a href="http://www.arti.com/">http://www.arti.com/</a>
Biochar Solutions	USA	Columbia	<a href="http://www.biocharsolutions.com/">http://www.biocharsolutions.com/</a>
Biomass Controls	USA	Connecticut	<a href="http://www.biomasscontrols.com/">http://www.biomasscontrols.com/</a>
Biomass Energy Techniques	USA	Missouri	<a href="https://biomassenergytechniques.com/">https://biomassenergytechniques.com/</a>
Chip Energy	USA	Illinois	<a href="http://www.chipenergy.com/">http://www.chipenergy.com/</a>
High Plains Biochar	USA	Wyoming	<a href="https://www.hpbiochar.com/">https://www.hpbiochar.com/</a>
Locoal	USA	Washington	<a href="https://locoal.com/">https://locoal.com/</a>
Proton Power	USA	Tennessee	<a href="http://www.protonpower.com/">http://www.protonpower.com/</a>
The Trollworks	USA	New Mexico	<a href="https://troll.works/">https://troll.works/</a>
V-Grid Energy Systems	USA	California	<a href="https://vgridenergy.com/">https://vgridenergy.com/</a>
Pyrocal Pty Ltd	Oceania	Australia	<a href="http://www.pyrocal.com.au/">http://www.pyrocal.com.au/</a>
Chardust	Afrique	Kenya	<a href="https://www.chardust.com/">https://www.chardust.com/</a>
Beston	Asie	Chine	<a href="https://bestongroup.com/">https://bestongroup.com/</a>