inkoh Biochar and beyond

# Matières premières et impacts





Avec le soutien financier de la Fondation Leopold Bachmann

agridea

# Table des matières

Définition générale....3
Fonctionnement....3
Caractéristiques du charbon végétal....3
Biomasse– : la matière première....4
Composition....4
Substances volatiles vs Charbon végétal....4
Composition des matières volatiles....5
Propriétés des matières volatiles....5
Importance pour la pyrolyse....5
Facteurs influençant les matières volatiles....6
Une sélection de biomasses possibles....7
Facteurs importants pour l'aptitude à la pyrolyse....8
Propriétés de Charbon végétal....9
Aperçu des principales caractéristiques....9
Exemples de caractérisation du charbon végétal....11



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

ISO 9001
ISO 14001

zindel-united.swiss

# Définition générale

Le type de biomasse a une incidence sur le fonctionnement et les propriétés du charbon végétal. Outre l'analyse de la matière première, ces deux aspects doivent être pris en compte comme suit :

## Fonctionnement

- Exigences relatives au traitement préalable pour permettre la pyrolyse
- Exigences relatives à la conception de l'installation

## Propriétés du charbon végétal

- Propriétés et critères de qualité



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

ISO 9001
ISO 14001

zindel-united.swiss

# La biomasse – la matière première

## Composition

La composition de la biomasse est variée et dépend fortement de l'espèce concernée. On peut toutefois distinguer les composants principaux suivants :

| ***Composant*** | **Description** | **Présence** | **Importance pour la pyrolyse** |
|---|---|---|---|
| *Cellulose* | Substance de structure des parois cellulaires végétales, polymère de glucose | Bois, paille, fibres végétales | Principalement charbon végétal (CV), faibles quantités d'huile de pyrolyse |
| *Hémicellulose* | Composant des parois cellulaires végétales, moins stable que la cellulose, divers sucres | Bois, paille, fibres végétales | Huile et gaz de pyrolyse |
| *Amidon* | Substance de réserve dans les plantes, polymère issu du glucose | Céréales, pommes de terre, cultures | Huile et gaz de pyrolyse |
| *Sucre* | Glucides simples (glucose, fructose, saccharose) | Plantes, fruits | Huile et gaz de pyrolyse |
| *Lignine* | Polymère, responsable de la lignification du | Bois, parties lignifiées des plantes | Principalement du charbon végétal (CV), composés phénoliques dans l'huile de pyrolyse |
| *Graisses et huiles* | Lipides | Graines oléagineuses, graisses animales | Principalement de l'huile de pyrolyse |
| *Protéines* | Biomolécules issues d'acides aminés, contiennent azote | Plantes, animaux | Composés azotés dans les produits de pyrolyse |
| *Cendres* | Composants inorganiques composants (minéraux, oxydes métalliques) | Toutes les biomasses | Peut nuire au processus de pyrolyse |
| *Substances extractibles* | Divers composés organiques (résines, terpènes, alcaloïdes, phénols) | En faibles quantités dans toutes les biomasses | Influencent la composition des produits de pyrolyse |
| *Eau* | $H_2O$ | Toutes les biomasses | Influence les besoins énergétiques pour le séchage et le processus de pyrolyse |

Connaître la composition de la biomasse est déterminant pour l'optimisation des procédés de pyrolyse, car les différents composants présentent des propriétés thermiques variées et influencent ainsi la composition des produits de pyrolyse.

## Matières volatiles vs. Charbon végétal

Les matières volatiles présentes dans la biomasse sont des composés organiques qui, lorsqu'ils sont



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

chauffés, se transforment en gaz sans se carboniser au préalable. Elles constituent une composante importante de la biomasse et jouent un rôle déterminant dans les processus de transformation thermochimiques tels que la pyrolyse, la gazéification et la combustion.

Leur composition et leur quantité influencent considérablement la qualité et les possibilités d'utilisation des produits finaux. La connaissance de leurs propriétés et de leur comportement est donc indispensable pour l'optimisation de procédés tels que la pyrolyse et le développement de nouvelles technologies d'exploitation de la biomasse.

## Composition des composés volatils :

- **Hydrocarbures :** une multitude d'hydrocarbures aliphatiques (à chaîne linéaire) et aromatiques (cycliques), tels que le méthane ($CH_4$), l'éthane ($C_2H_6$), le propane ($C_3H_8$), le butane
  ($C_4H_{10}$), le benzène ($C_6H_6$), le toluène ($C_7H_8$) et le xylène ($C_8H_{10}$).
- **Composés oxygénés :** alcools (par exemple, méthanol, éthanol), aldéhydes (par exemple, formaldéhyde), cétones (par exemple, acétone), acides carboxyliques (par exemple, acide acétique), éthers et esters.
- **Composés azotés :** amines, amides et nitriles. Ceux-ci sont présents en quantités plus faibles, mais jouent un rôle dans la formation d'oxydes d'azote (NOx) lors de la combustion.
- **Composés soufrés :** thiols et sulfures (en très faibles quantités). Ceux-ci peuvent contribuer à la formation d'oxydes de soufre (SOx) lors de la combustion.

## Propriétés des substances volatiles :

- **Inflammables :** la plupart sont inflammables et contribuent au rendement énergétique lors de la combustion et de la gazéification.
- **Réactifs :** ils sont réactifs et peuvent être transformés au cours de divers procédés chimiques (par exemple, le craquage, le reformage).
- **Condensables :** certaines substances volatiles (à poids moléculaire élevé) peuvent être condensées par refroidissement et former des produits liquides tels que l'huile de pyrolyse ou le goudron.
- **Modifiables :** leur composition et leur quantité peuvent être influencées par les conditions du procédé (température, vitesse de chauffage, temps de séjour, pression).

## Importance pour la pyrolyse :

Lors de la pyrolyse, les composés volatils sont libérés par chauffage de la biomasse en l'absence d'oxygène. Ils constituent le principal composant du gaz de pyrolyse et contribuent à la formation de l'huile de pyrolyse. Leur composition influe sur la qualité et les possibilités d'utilisation des produits de pyrolyse :

- **Gaz de pyrolyse :** il contient des gaz combustibles tels que l'hydrogène ($H_2$), le méthane ($CH_4$) et le monoxyde de carbone (CO), qui sont utilisés pour la production d'énergie (combustion, moteurs à gaz, piles à combustible). Il contient également des gaz non combustibles tels que le dioxyde de carbone ($CO_2$) et la vapeur d'eau ($H_2O$).

- **Huile de pyrolyse (bio-huile) :** elle contient des substances volatiles condensables, un mélange complexe d'hydrocarbures et de composés oxygénés. Elle peut être utilisée comme combustible ou, après un traitement supplémentaire (par exemple par catalyse) pour la fabrication de produits chimiques ou de carburants.



Inkoh AG
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

ISO 9001
ISO 14001

zindel-united.swiss

## Facteurs influençant les composés volatils :

- **Type de biomasse :** le bois contient plus de lignine et moins d'azote que la biomasse herbacée, ce qui influence la composition des composés volatils (plus de composés phénoliques dans le bois).
- **Température :** des températures plus élevées entraînent une libération plus importante et une augmentation de la proportion d'hydrocarbures plus légers dans le gaz. À des températures très élevées, cela peut entraîner une formation accrue de carbone (charbon).
- **Vitesse de chauffage :** une vitesse de chauffage élevée favorise la formation de composés volatils et peut maximiser le rendement en huile (pyrolyse rapide).
- **Temps de séjour :** un temps de séjour plus long peut entraîner des réactions secondaires des composés volatils (réactions secondaires), telles que le craquage (division de molécules plus grosses en molécules plus petites) ou la polymérisation (l'association de petites molécules pour en former de plus grandes).



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

## Une sélection de biomasses possibles

Différents types de biomasse présentant une forte teneur en matière organique se prêtent à la pyrolyse. Le choix dépend de la disponibilité, des coûts et des produits finaux recherchés (par exemple, le biochar, l'huile de pyrolyse, le gaz de synthèse). Voici les principales catégories et quelques exemples :

| ***Type de biomasse*** | **Avantages** | **Inconvénients** | **Comportement à la pyrolyse** |
|---|---|---|---|
| *Copeaux de bois* | Homogène, facilement disponibles, faible teneur en humidité | Peut contenir des impuretés | Convient adapté, bon rendement |
| *Sciure/copeaux de bois* | Rendement surface, bonne réactivité | Peut entraîner des obstructions , formation de poussière | Particulièrement adapté à la pyrolyse rapide |
| *déchets forestiers* | Grande disponibilité, faibles coûts | Hétérogène, forte teneur en écorce, peut contenir des impuretés | Peut entraîner des problèmes, rendements plus faibles |
| *Bois usagé* | Grande disponibilité, recyclage | Peut contenir des polluants | Varie selon le traitement |
| *paille* | Grande disponibilité, faibles coûts | Disponibilité saisonnière, forte teneur en cendres, formation de scories | Convient, bon rendement en biochar |
| *Cultures énergétiques* | Rendements élevés rendements en biomasse, | Surface de culture nécessaire, saisonnier | Bien adaptées, bons rendements |
| *Résidus agricoles* | Grande disponibilité, faible coût | Hétérogène, peut contenir des impuretés | Varie selon sa composition |
| *Déchets verts* | Haute disponibilité, valorisation des déchets | Hétérogène, fort taux d'humidité, peut contenir des impuretés | Peut entraîner des problèmes, et des rendements plus faibles |
| *Déchets biogènes* | Grande disponibilité, valorisation des déchets | Hétérogènes, fort taux d'humidité, peuvent contenir des impuretés, hygiène | Varie selon la composition |
| *Boues d'épuration* | Haute disponibilité, valorisation des déchets | Teneur en humidité élevée, peut contenir des substances nocives, prétraitement complexe et épuration des gaz d'échappement nécessaire | Peut entraîner des problèmes,<br>Les produits peuvent être contaminés par des substances nocives |



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

## Facteurs importants pour l'aptitude à la pyrolyse

1. **Teneur en humidité** : les matières premières présentant une teneur en eau inférieure à 20 % sont idéales (un préséchage est nécessaire pour les matériaux humides).
2. **Teneur en carbone** : plus la teneur en carbone est élevée, meilleurs sont les résultats pour la production de biochar et l'utilisation énergétique.
3. **Teneur en cendres** : les matières présentant une faible teneur en cendres permettent d'obtenir des produits de meilleure qualité.
4. **Taille des particules** : Une taille des particules améliore le transfert de chaleur et la décomposition.
5. **Fluidité** : s'agit-il d'un matériau en vrac classique présentant une bonne fluidité ou nécessite-t-il un traitement préalable (broyage, compactage) ?

Cette vaste sélection montre que presque toute substance organique peut être utilisée pour la pyrolyse si elle est préparée en conséquence. Le choix du matériau dépend du type de produit souhaité (charbon végétal, huile de pyrolyse, gaz de synthèse) et des conditions locales.



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

# Propriétés du charbon végétal

## Aperçu des principales propriétés

| ***Propriétés physiques*** | **Description** | **Signification/Application** |
|---|---|---|
| *Surface spécifique (BET)* | Surface interne du charbon végétal constituée de pores et de cavités ($m^2/g$). Plus elle est élevée, meilleures sont la rétention d'eau et de nutriments, ainsi que la colonisation par les micro-organismes. | Important pour la rétention d'eau et de nutriments, l'adsorption des polluants et la création d'un habitat pour les micro-organismes. |
| *Répartition granulométrique des pores* | Répartition des pores en fonction de leur diamètre : micropores (< 2 nm), mésopores (2-50 nm), macropores (> 50 nm). | Influence la capacité d'adsorption de différentes substances, la rétention d'eau et l'aération. |
| *Densité apparente* | Masse de charbon végétal par unité de volume ($kg/m^3$ ou $g/cm^3$). | Influence la manipulation, le transport, le stockage et le dosage. |
| *Taille et forme des particules* | Taille et forme des particules de charbon végétal (par ex. mm, µm, sphériques, anguleuses). | Influence la rétention d'eau, l'aération, la manipulation, le mouillage. |
| *Capacité de rétention d'eau (WHC)* | Capacité du charbon végétal à stocker l'eau (g d'eau/g de charbon végétal ou % en volume). | Important pour une utilisation dans les zones arides, amélioration du régime hydrique du sol. |
| *Couleur et brillance* | Indicateurs visuels du degré de carbonisation. | De foncé à noir, brillant en cas de bonne carbonisation. |
| ***Propriétés chimiques*** | | |
| *Carbone fixe (CF)* | Teneur de carbone pur (%). Important pour le stockage du carbone. | Critère de qualité du stockage du carbone, indicateur du degré de carbonisation. |
| *Teneur en cendres* | Proportion de composants inorganiques (minéraux, oxydes métalliques) (%). | Influence les propriétés du charbon végétal; selon l'application, peut avoir des effets positifs (nutriments) ou négatifs (encrassement, dépôts). |
| *Valeur du pH* | Mesure de l'acidité ou de l'alcalinité. | Influence la disponibilité des nutriments dans le sol et peut influencer le pH du sol. |
| *Analyse élémentaire (C, H, O, N, S)* | Composition élémentaire (%). Rapport C/N important pour l'activité microbienne. | Fournit des informations sur la composition; le rapport C/N influence l'activité microbienne et le cycle des nutriments dans le sol. |



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

| | | |
|---|---|---|
| *HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques)* | Composés potentiellement cancérigènes (µg/kg). | Critère de qualité, respecter les valeurs limites (par ex. EBC). |
| *Métaux lourds* | Teneur en métaux lourds (par ex. cadmium, plomb, chrome) (mg/kg). | Critère de qualité, respecter les valeurs limites (en fonction de l'utilisation et de la législation). |
| *Capacité d'échange cationique (CEC)* | Capacité à fixer des ions chargés positivement (cation) tels que les nutriments (cmol/kg ou meq/100 g). | Important pour le stockage et la disponibilité des nutriments dans le sol. |
| *Groupes fonctionnels* | Identification des groupes fonctionnels à la surface (par exemple, groupes carboxyle, hydroxyle, carbonyle). | Ils fournissent des informations sur la réactivité et la capacité d'adsorption du charbon végétal. |
| ***Propriétés biologiques*** | | |
| *Colonisation par micro-organismes* | Étude de la colonisation par des micro-organismes (par exemple bactéries, champignons). | Indicateur de l'activité biologique et des potentiels effets positifs dans le sol. |
| *Essais de croissance* | Essais directs sur des plantes en présence de charbon végétal. | Démonstration directe de l'effet sur la croissance des plantes. |



**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

## Exemples de caractérisation du charbon végétal

Selon l'application, différentes propriétés peuvent être déterminantes. Souvent, ce sont des combinaisons de propriétés qui permettent d'atteindre les valeurs cibles grâce au choix approprié de la matière première (éventuellement un mélange) et à des temps de séjour et des températures adaptés lors de la pyrolyse.

### 1. Applications au sol

- **Les propriétés les plus importantes** sont la *surface spécifique (BET), la capacité de rétention d'eau (WHC), la capacité d'échange cationique (CEC)* et les *teneurs en HAP*
  - **La surface spécifique BET** est une grandeur fondamentale pour le stockage de l'eau et des nutriments
  - **La WHC** est liée à la surface spécifique BET, mais aussi à la taille des pores et à leur répartition
    - Matière première : le type de biomasse à partir duquel le charbon végétal est produit influence la structure poreuse et donc la capacité de rétention d'eau. Ainsi,
      par exemple, le charbon végétal issu du bois a tendance à présenter une structure poreuse différente de celle du charbon végétal issu de la paille ou des déchets verts.
    - Conditions de pyrolyse : la température de pyrolyse et le temps de séjour influencent le développement de la structure poreuse. Des températures plus élevées conduisent
      souvent à une plus grande surface spécifique et à une capacité de rétention d'eau (WHC) plus élevée, mais peuvent également modifier la structure poreuse et, dans certaines circonstances, réduire la WHC.
    - Taille des particules : les particules plus fines présentent généralement une plus grande surface par unité de volume et peuvent donc stocker davantage d'eau.
    - Répartition granulométrique des pores : la répartition des pores de différentes tailles est déterminante. Les micropores (< 2 nm) retiennent fortement l'eau, mais sont difficilement accessibles aux racines des plantes. Les mésopores (2-50 nm) et les macropores (> 50 nm) sont importants pour le stockage de l'eau disponible pour les plantes et pour l'aération.
  - **La CEC** est un paramètre important pour évaluer la fertilité du sol et les propriétés du charbon végétal. Une CEC élevée permet le stockage et la disponibilité des nutriments et contribue à l'amélioration du sol. Lors de l'utilisation de charbon végétal, il convient de veiller à ce que la CEC soit la plus élevée possible afin de maximiser les effets positifs sur la croissance des plantes.
  - **Les valeurs de HAP** constituent un critère rédhibitoire : si les limites ne sont pas respectées, le charbon végétal est considéré comme toxique et son utilisation dans le sol est interdite. Il convient en outre de tenir compte de la liste positive de l'EBC, qui définit les matières premières autorisées.

- **Procédure de production**
  - On utilise généralement des copeaux de bois comme matière première ; pour des des considérations économiques, on peut également y ajouter des résidus d'élagage ou du bois issu de l'entretien des espaces naturels, mais aussi d'autres sous-produits agricoles. La paille ou les déchets verts, par exemple, sont bénéfiques pour obtenir une



Inkoh AG
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

valeur CEC élevée. Les fractions d'écorce (y compris celles qui adhèrent aux résidus végétaux) apportent des minéraux supplémentaires qui peuvent être bénéfiques pour le sol.

- Il est important d'assurer un fonctionnement continu et régulier. Pour cela, il faut disposer d'une bonne matière première (copeaux de bois) et d'une teneur en eau constante d'environ 15 %. Cela influe sur les températures critiques, qui se situent généralement entre 550 et 650 °C

- Dès que la matière première contient une proportion supérieure à la moyenne de feuilles, de tiges et de particules fines, il est nécessaire d'opter pour la méthode de séchage appropriée. Dans ce cas, un séchage en continu est requis (séchoir à tambour, à bande ou à fond mouvant). Le séchage en caisses est difficile et coûteux, car la hauteur de remplissage ne doit être que faible (1 m maximum) et le séchage n'est pas uniforme.

- La fluidité diminue lorsque l'on utilise des matières broyées (plutôt que hachées). Une forte proportion de particules fines a également un impact négatif, tout comme les feuilles, la biomasse de type paille ainsi que les sous-produits tels que le marc. C'est pourquoi il faut déterminer dès la conception de l'installation quelles matières premières seront utilisées et choisir en conséquence, par exemple, le système de convoyage adapté. Il s'agit là de l'élément le plus important, outre le mode de séchage, pour garantir un fonctionnement fiable du processus.



*Bois haché*



*Bois broyé*

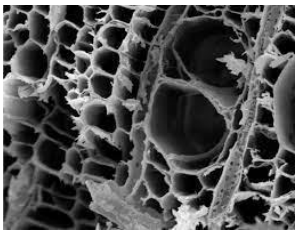
- Pour une utilisation dans le secteur agricole, une certification *EBCAgro* est au minimum requise

## 2. Charbon fourrager

- **Le principales propriétés** sont les *propriétés surface (BET), la distribution de la taille des pores, la taille des particules* et les *teneurs en HAP*

  - **La surface spécifique BET** a une influence significative sur la capacité d'adsorption. Dans ce contexte, il est également important de prendre en compte la proportion de *substances volatiles*. Celle-ci est notamment liée à l'accessibilité (performance) des pores.

  - **La distribution de la taille des pores** revêt une importance similaire à celle de la surface BET. Grâce à des tailles appropriées et à une disposition optimale des pores, le charbon devient plus apte à l'adsorption. Cela permet de fixer les polluants et les bactéries dans l'estomac.





**Inkoh AG**
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss

- Toxines : mycotoxines (toxines fongiques), toxines bactériennes et autres substances nocives
- Gaz : ammoniac et autres gaz peuvent être adsorbés dans l'étable et dans le tube digestif, ce qui permet de réduire les nuisances olfactives et la sollicitation des voies respiratoires.
- Amélioration de la flore intestinale : le charbon végétal peut favoriser la colonisation de l'intestin par des micro-organismes bénéfiques et contribuer ainsi à une flore intestinale saine.
- Régulation de la digestion : Le charbon végétal peut soulager les troubles digestifs tels que la diarrhée ou les ballonnements, en fixant l'excès d'eau et régule le transit intestinal.
- Fixation des nutriments : le charbon végétal peut fixer certains nutriments et les protéger ainsi contre le lessivage dans le tube digestif. Cela peut jouer un rôle notamment dans l'assimilation de l'azote.

- **Les teneurs en HAP** constituent un critère rédhibitoire : si les valeurs limites ne sont pas respectées, le charbon végétal est considéré comme toxique et son utilisation dans l'alimentation animale est interdite. Il convient en outre de tenir compte de la liste positive de l'EBC, qui définit les matières premières autorisées.

- **Taille des particules :** après pyrolyse, le charbon végétal doit être broyé à une granulométrie comprise entre 0 et 3 mm.

- **Procédure de production**
  - La procédure est similaire à celle utilisée pour la production de charbon végétal destinée aux applications dans le sol.
  - Il convient d'accorder encore plus d'attention aux corps étrangers présents dans la matière première et de surveiller de plus près les paramètres du procédé (température et temps de séjour).
  - Les valeurs limites fixées par EBC Feed doivent être respectées.
  - Enregistrement auprès d'Agroscope
  - La teneur en eau de 30 % dans le charbon doit être respectée autant que possible
  - Le concassage du charbon génère de la poussière, ce qui impose des exigences spécifiques à l'installation (Atex) et peut également avoir des implications en matière de protection des personnes.



Inkoh AG
Sägenstrasse 8
7302 Landquart
T +41 81 555 80 00
F +41 81 555 80 00
www.inkoh.swiss
info@inkoh.swiss