

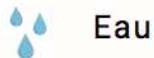
# PROJET CHARBONNIER

## Etat de l'art du charbon

Projet ingénieur étudiant



Porteur de projet



Eau



Matériaux



Energie



### CONTACT

[cultureailleurs@yahoo.fr](mailto:cultureailleurs@yahoo.fr)

### GRENOBLE

Septembre - Janvier 2021/2022

# Remerciements

Ce rapport est issu du travail de six étudiants du semestre [PISTE](#) (Pour une Ingénierie Sobre Techno et Éco-responsable) 2021-2022 de [Grenoble INP](#), en collaboration avec l'association [Culture Ailleurs](#).

Nous remercions tout d'abord Julien Lobbedez, Sébastien Perroud et Sabine Campredon de Culture Ailleurs de nous avoir permis de travailler sur un tel projet à leur côté.

Nous remercions ensuite toute l'équipe encadrante, Fanny Poinssotte, Martial Balland, Sacha Hodencq, Kévin Loesle, Aurélie Catel, Samuel Siedel, et Nicolas Ruty, de nous avoir suivi afin de nous éclairer face aux obstacles que nous avons pu rencontrer tout au long de ce semestre.

Nous remercions également David Houben, Enseignant - Chercheur agro-pédagogéochimiste à l'Institut Polytechnique UniLaSalle du campus de Beauvais, et Sébastien Cecillon, Ingénieur en Bioingénierie/Environnement et Chargé de partenariat recherche et innovation à l'école de Centrale Lyon, pour leur grande aide autour de la nature du charbon, de sa fabrication et de son utilisation.

Nous remercions ensuite Philippe Sechet, Maître de conférence au Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels de Grenoble, et Julien Némery, Enseignant chercheur hydro-biogéochimiste au sein de Grenoble INP, pour leur accompagnement dans nos processus de filtration de l'eau.

Un grand merci à Gwenn Morvezen, Doctorant dans l'équipe MDE du G2ELAB (site de l'ENSE3), qui nous a accompagné dans la réalisation des images du charbon végétal au microscope à balayage électronique, et à Nicolas Brefuel, Ingénieur d'étude et Responsable de la manipulation du microscope, qui nous a autorisé à effectuer ces mesures.

Merci à Isabelle Duisit, Potière chez Oyas, qui nous a permis de mieux comprendre la formation de la céramique et son rôle dans la filtration de l'eau, ainsi que pour les échantillons qu'elle a pu nous faire parvenir pour nos études.

Nous remercions ensuite Stéphane Dorino, Gérant de La ferme de la plaine en Isère, mais également le directeur du site Cerdys, une pépinière en Maine-et-Loire, Nicolas Ruty et Julien Lobbedez, pour leur temps passé afin de participer à nos entretiens de méthode centrée expérience utilisateur.

Enfin, nous remercions Matthieu Claus, Directeur de l'agence internationale au sein du groupe Ginger BURGEAP, pour son accompagnement précieux dans la mise en place de notre étude de bilan carbone.

# Sommaire :

---

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>La Pyrolyse</b>	<b>5</b>
<b>Adsorption, porosité et filtration de l'eau</b>	<b>8</b>
<b>Adsorption et fertilisation</b>	<b>10</b>
<b>Stockage du carbone</b>	<b>11</b>
<b>Comment choisir son charbon</b>	<b>12</b>

Le projet « Charbonniers du Trièves » est porté par l'association Culture Ailleurs, qui réalise des performances artistiques dans divers domaines. A la suite d'un appel à projet sur la forêt, les membres de l'association s'intéressent à une discipline ayant une forte histoire sur le territoire : le travail de charbonnier, initialement voué à alimenter les fours de métallurgie, puis les moteurs fonctionnant au gaz de charbon. Aujourd'hui, le métier exercé par les charbonniers de l'association consiste à réaliser la pyrolyse de bois récolté en forêt (issu des coupes d'entretien réalisées par l'Office National des Forêts) afin de produire du charbon végétal. L'association acquiert alors un four à pyrolyse, pour produire et vendre ce charbon végétal, tout en réalisant des performances artistiques sur cette thématique. Ce charbon a la particularité d'être doté de très nombreux pores : il agit alors comme un filtre, dépolluant l'eau et l'air, mais peut aussi être utilisé pour régénérer la vie des sols grâce à ses capacités de rétention d'eau, de nutriments, de bactéries.

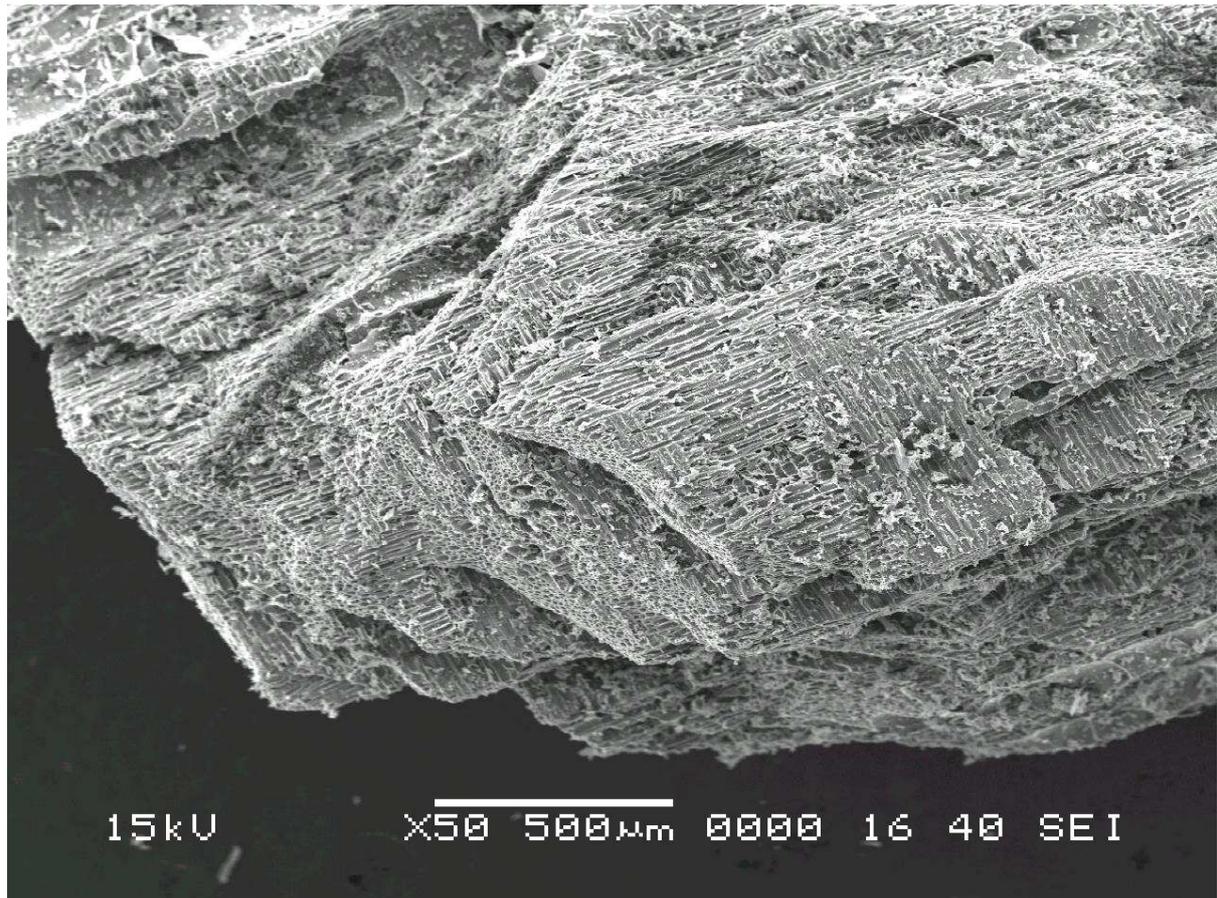
Notre travail d'étudiant-ingénieur se concentre sur : 1° L'utilisation du charbon actif pour filtrer l'eau ; 2° L'étude et la conception d'un modèle de four à pyrolyse de plus petite taille que le modèle *Exeter Retort* utilisé par les porteurs de projet; 3° La documentation du four *Exeter Retort*.

Nous allons étudier dans cette partie les principes de fabrication du charbon et de ses différents dérivés. Ceci nous permettra de mieux comprendre l'utilisation de ce dernier en tant que fertilisant, ou filtre à eau.

Pour commencer, nous pouvons définir le charbon végétal comme le produit brut résultant de la pyrolyse de matière organique (bois, plantes, déchets agricoles, etc...).



*Grains de charbon végétal (dimension : quelques millimètres)*



*Image du charbon au microscope électronique à balayage*

## La Pyrolyse

La pyrolyse est une augmentation importante de la température en absence d'oxygène, permettant d'obtenir de nouveaux produits (gaz et matière) tout en évitant l'oxydation (et donc la combustion), qui dégrade les éléments présents. Cette pyrolyse commence à des températures basses, environ  $200^{\circ}\text{C}$ , et se produit jusqu'à  $1000^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>.

Cette réaction permet d'évacuer de la matière organique tout élément autre que le squelette de carbone, et ainsi de former une structure composée uniquement d'atomes de carbone stables.

---

<sup>1</sup> Pyrolyse [modifiée le 21 janvier 2020 ; consultée le 12 Octobre 2021], dans Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>

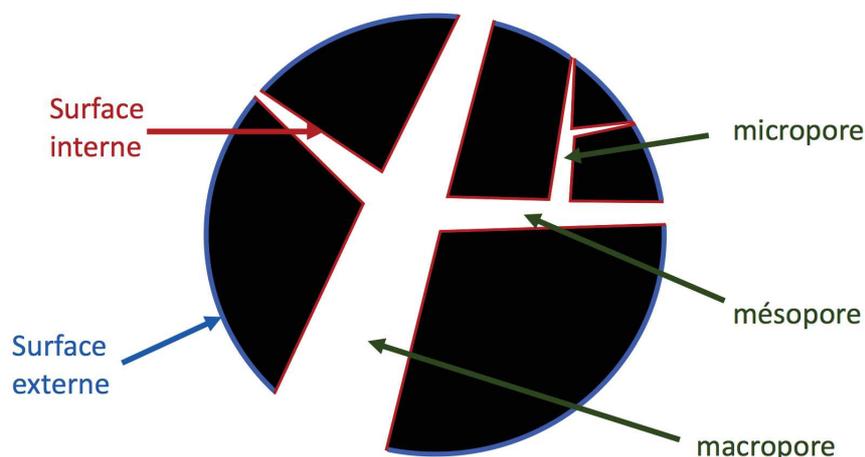
Nous distinguons alors trois types de charbon :

- le **charbon**, qui est le résultat d'une pyrolyse de matière végétale ou animale. Nous pouvons ainsi le différencier en charbon végétal ou charbon animal.
- Le **biochar**, qui est un charbon utilisé à des fins d'amendement du sol, et qui est alors mélangé à du fertilisant par exemple.
- Le **charbon actif**, qui suite au processus de pyrolyse subit une étape supplémentaire d'activation, qui peut s'obtenir de 2 manières :
  - Une *activation physique*, résultat d'une combustion comprise entre 900°C et 1000°C.
  - Une *activation chimique*, qui consiste à plonger le charbon dans un bain d'acide phosphorique compris entre 400°C et 500°C.

L'activation du charbon est un processus permettant d'augmenter la porosité de ce dernier. Une plus grande porosité du charbon signifie une augmentation de sa surface spécifique, qui correspond à la surface réelle d'échange avec une autre phase (contrairement à la surface apparente), et qui se mesure en m<sup>2</sup>/g.

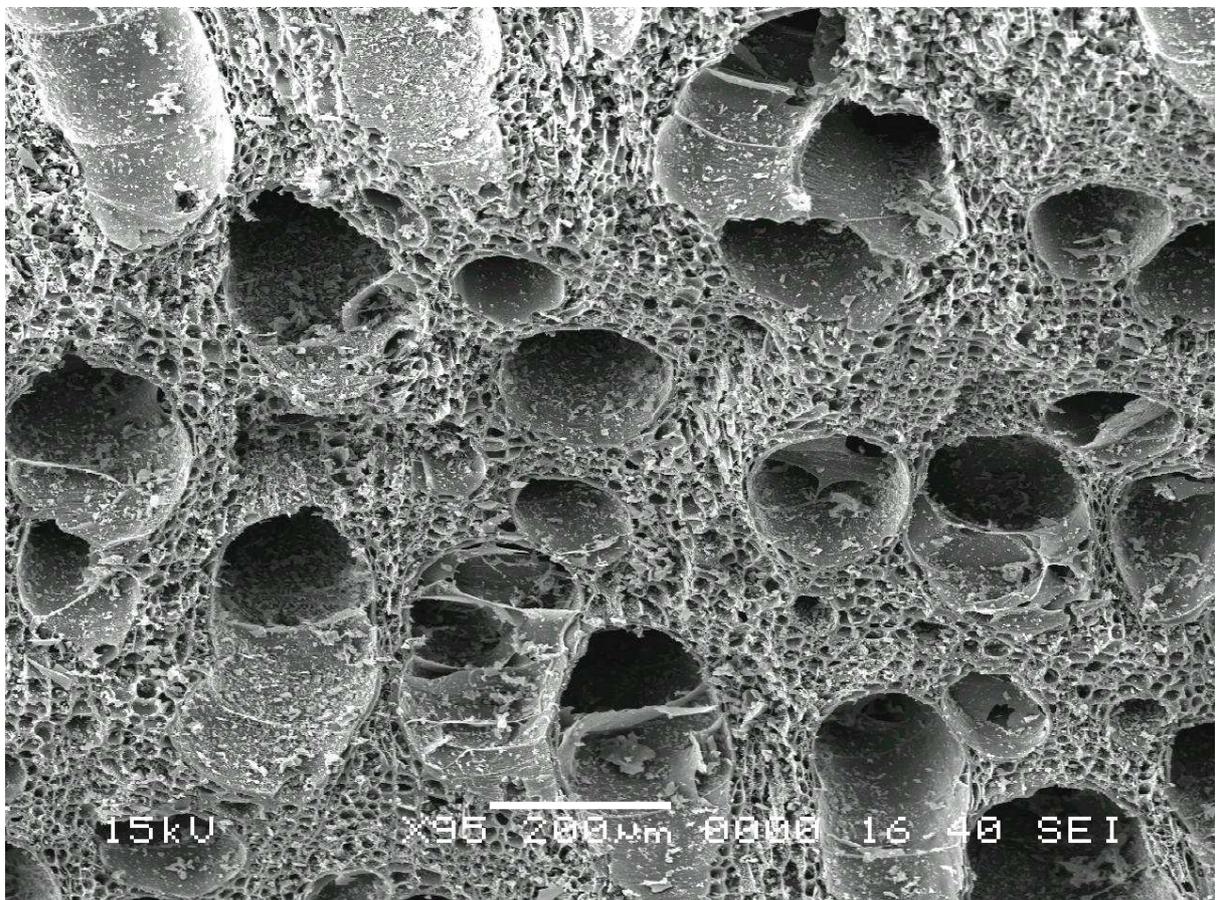
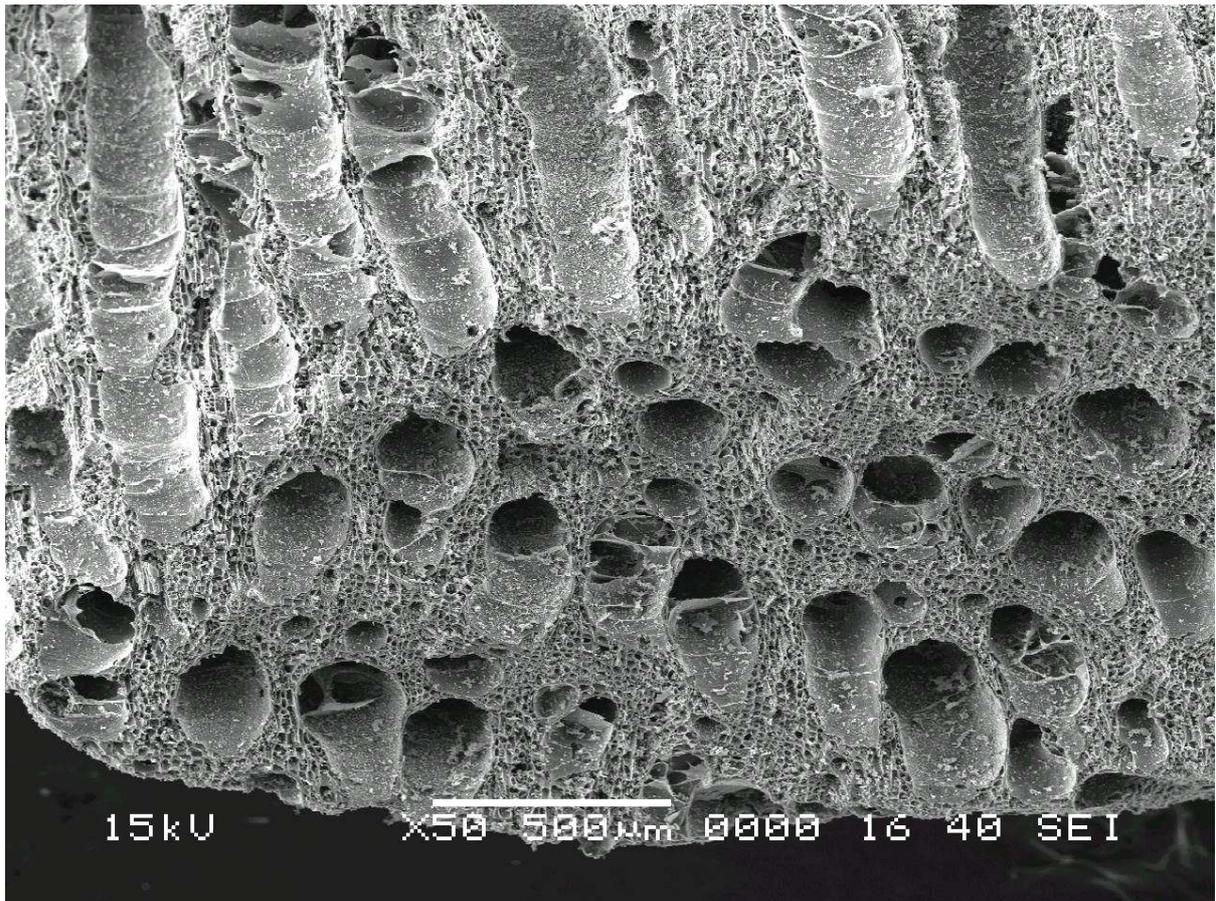
D'après les travaux de l'IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), nous pouvons distinguer différents types de pores au sein du charbon :

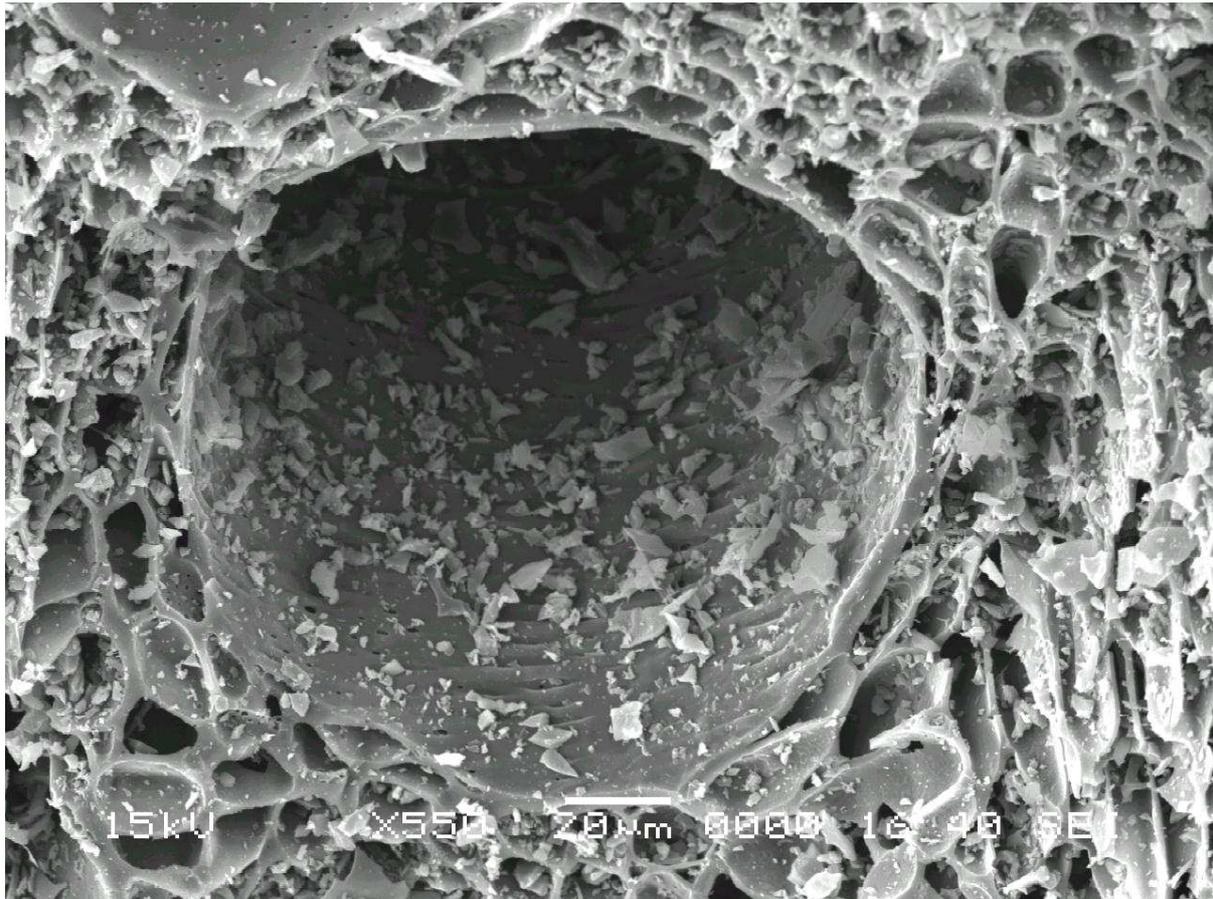
- les pores de taille supérieure à 50 nm appelés macropores.
- les pores de taille comprise entre 2 et 50 nm appelés mésopores.
- les pores de taille inférieure à 2 nm appelés micropores ou micropores.



$$\text{Surface interne} + \text{surface externe} = \text{surface spécifique}$$

De plus, augmenter la surface spécifique du charbon signifie augmenter son nombre de sites d'adsorption possibles. Or, nous allons voir par la suite que la capacité d'absorption du charbon est un paramètre très important pour son utilisation en tant que filtre ou fertilisant.





*Images du charbon au microscope électronique à balayage (grossissement respectif x50 (échelle 500 $\mu$ m) - x95 (200 $\mu$ m) - x550 (20 $\mu$ m))*

Nous pouvons ainsi observer grâce à ces images la multitude de pores dont est doté le charbon, et qui explique sa grande surface spécifique ainsi que sa capacité d'adsorption.

## Adsorption, porosité et filtration de l'eau

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant) depuis une phase gazeuse, liquide ou une solution solide.<sup>2</sup>

L'adsorption est donc très utilisée dans la séparation et la purification des liquides ou gaz, afin d'éliminer des polluants comme les pesticides, les métaux lourds, le chlore, etc...

---

<sup>2</sup> Adsorption [modifiée le 10 février 2021 ; consultée le 9 novembre 2021], dans Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Adsorption>

Nous pouvons distinguer 2 types d'adsorption :

- **L'adsorption physique**, qui est dûe aux forces de Van der Waals et aux interactions électrostatiques de polarisation.
- **L'adsorption chimique**, formant des liaisons chimiques entre les molécules de l'adsorbant et de l'adsorbant.

Cependant, il est considéré que l'adsorption reste majoritairement physique.

Un adsorbant peut être ensuite caractérisé par différents paramètres <sup>3</sup> :

- **La capacité** : la quantité d'adsorbant pouvant être adsorbée
- **La sélectivité** : la palette d'adsorbats pouvant être adsorbée
- **La régénérabilité** : la capacité de l'adsorbant à se vider des composants une fois adsorbés. Il déterminera la capacité utile de l'adsorbant
- **La cinétique** : vitesse à laquelle l'adsorbant peut adsorber des composants
- **La résistance mécanique, chimique et thermique**
- **Le coût de production**

Le choix de l'adsorbant dans un processus de filtration d'eau dépendra donc de ses caractéristiques, mais également du processus en lui-même.

Actuellement, les adsorbants utilisés en milieu industriel possèdent une surface spécifique minimale de 600m<sup>2</sup>/g, et des tailles de pores inférieures ou égales à 50nm (mésoporeux et microporeux).

Concernant les charbons actifs utilisés en industrie pour la purification en phase liquide, ils possèdent des mésopores compris entre 3 et 50nm. Ils ont de plus une surface essentiellement non polaire, et vont ainsi capter des composés organiques non ou faiblement polaires.<sup>4</sup>

Par ailleurs, l'adsorbant peut être utilisé sous forme de poudre ou de grains. Actuellement, ce sont les grains qui sont plutôt utilisés, permettant aux molécules de circuler dans les macropores formés par l'enchevêtrement des grains, afin d'accéder aux mésopores de ces derniers pour s'y fixer.

Ainsi, le charbon sous forme de grains, dû à sa porosité, sa bonne surface spécifique et à sa capacité d'adsorption est un bon adsorbant pour de la filtration en phase aqueuse. Le charbon actif sera de meilleure qualité, comparé au charbon qui possède une surface spécifique inférieure.

---

<sup>3</sup> Lian-Ming SUN, Francis MEUNIER, Gino BARON (2005), Adsorption - Procédés et applications, *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 2-3

<sup>4</sup> Lian-Ming SUN, Francis MEUNIER, Nicolas BRODU, Marie-Hélène MANERO (2020), Adsorption - Aspects théoriques, *Techniques de l'Ingénieur*, pp. 3-6

Nous avons vu auparavant qu'une des caractéristiques d'un adsorbant était sa régénéralité. En effet, une fois l'adsorbant chargé en polluant, il peut être réutilisé grâce à une phase de régénéralion.

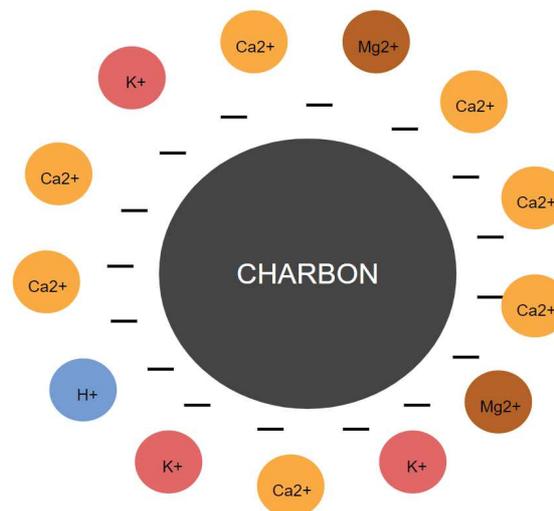
Il existe alors 3 méthodes :

- Une régénéralion par augmentation de température
- Une régénéralion par abaissement de la pression totale
- Une régénéralion par abaissement de la concentration

## Adsorption et fertilisation

En plus de pouvoir absorber des particules dans l'eau pour dépolluer, le charbon est connu pour être un bon vecteur de fertilisation du sol car il possède une Capacité d'Échange Cationique (CEC)<sup>5</sup>. Cette CEC peut être définie comme le potentiel du charbon à retenir des cations dans le sol, par des liaisons faibles de type électrostatique. Plus la CEC sera élevée, plus les cations seront susceptibles d'être stockées par le sol. Elle résulte des charges négatives situées à la surface du complexe adsorbant qu'est le charbon. Les cations se fixent de manière réversible sur sa surface, en équilibre avec la solution du sol.

Elle est également dépendante du pH du sol, plus le pH est élevé (basique) plus la CEC sera haute.



Cations se fixant au charbon

<sup>5</sup> Fertisol, avril 2020, Fiche 11 : La capacité d'échange cationique.

[https://agriressources.fr/fileadmin/user\\_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/177\\_Eve-agriressources/fertisol/Fiches\\_FERTISOLS/Fiche\\_II.09.pdf](https://agriressources.fr/fileadmin/user_upload/Auvergne-Rhone-Alpes/177_Eve-agriressources/fertisol/Fiches_FERTISOLS/Fiche_II.09.pdf)

Or, les nutriments utiles aux plantes sont majoritairement des cations, d'où l'importance du CEC du charbon pour la fertilisation des sols.

Ainsi, un charbon pourra devenir du biochar en le mélangeant à du fertilisant (chargé en cation), afin d'être ensuite répandu dans le sol pour servir d'engrais. Une fois que les cations sont assimilés par les plantes, le biochar servira à capter les nutriments du sol, afin d'éviter un appauvrissement ou un lavement des terrains, et ainsi améliorer les capacités d'une terre appauvrie. La quantité de biochar à mettre dans la terre dépendra alors de sa CEC.

Cependant, le filtrage de l'eau et la fertilisation du sol ne sont pas les seuls atouts du charbon. Nous allons voir par la suite les avantages à fabriquer du charbon pour le stockage de carbone.

## Stockage du carbone

La production de charbon permet, grâce à sa structure stable faite de carbone, de stocker ce dernier à long terme, et donc éviter le relâchement d'une partie des gaz à effets de serres du cycle naturel, dont plusieurs sont composés de carbone (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc...).

Par ailleurs, il a été estimé<sup>6</sup> que la demi-vie du biochar se trouve entre 75 et 145 ans (différence due au type de biochar, son altération et aux conditions environnementales). Ainsi, le biochar est un moyen efficace de stocker du carbone sur une période avoisinant le siècle, et donc une méthode intéressante pour diminuer la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Cependant, il ne faut pas oublier que ce processus s'inscrit dans le cycle de carbone vivant (issue de la matière organique vivante à la surface de la Terre), mais ne permettrait pas de résoudre les émissions de gaz à effet de serre dues à l'extraction et à l'utilisation d'énergies fossiles.

De plus, le stockage du carbone grâce au charbon produit par la pyrolyse de déchets agricoles, pourrait permettre, dans le cadre du marché carbone européen, l'achat de quotas carbone par les entreprises émettrices auprès des agriculteurs. Ainsi, nous pourrions avoir un déplacement de fonds financiers provenant de grands pollueurs vers le secteur agricole.

---

<sup>6</sup> Christophe NAISSE (2015), Potentiel de séquestration de carbone des biochars et hydrochars, et impact après plusieurs siècles sur le fonctionnement du sol, *HAL*, pp. 54-68

## Comment choisir son charbon

Nous avons pu voir précédemment qu'il existait différents types de charbon. Selon l'utilisation souhaitée, il faudra donc choisir les bonnes caractéristiques parmi les différentes possibilités.

La qualité de la pyrolyse impacte la porosité du charbon (pyrolyse plus ou moins contrôlée), et une activation physique ou chimique permet d'obtenir du charbon actif. Ces différences interviennent ainsi sur la surface spécifique, et la capacité d'adsorption.

Un charbon utilisé pour de la filtration devra donc avoir de bonnes performances au niveau de ces caractéristiques.

Par ailleurs, si le charbon est utilisé pour la fertilisation, il faudra le charger en nutriments (et deviendra alors du biochar) avant de le répandre dans le sol.

Cependant, il faut prendre en compte que chaque essence de bois possède des caractéristiques propres, qui impacteront aussi les propriétés finales du charbon. Ainsi, le résultat d'un processus fixe de pyrolyse peut produire du charbon aux propriétés variées, si le bois utilisé n'est pas identique.

Le but du producteur de charbon est donc de prendre en compte :

- les essences de bois locales qu'il pourrait charbonner et les propriétés de ces essences.
- les besoins identifiés par l'utilisateur du charbon.

Suite à cela, il peut alors mettre en place un protocole de pyrolyse permettant d'obtenir au mieux les propriétés désirées, en tenant compte des caractéristiques des essences.