

## Effets des conditions de pyrolyse sur les propriétés des boues d'épuration et du biochar et risques potentiels en fonction des teneurs en HAP\*

\*Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des constituants naturels du charbon et du pétrole, ou qui proviennent de la combustion incomplète de matières organiques telles que les carburants, le bois, le tabac.

### Points forts

Une température et une durée de pyrolyse plus élevées réduisent la teneur en HAP dans le biochar de boues d'épuration.

Les risques de cancer liés au biochar de boues d'épuration sont plus élevés chez les enfants que chez les adultes.

Les risques de cancer sont liés au chrysène, au benzo(a)pyrène et au dibenzo(a,h)anthracène.

L'exposition aux HAP provenant du biochar est inhalée chez les adultes et orale/cutanée chez les enfants.

### Abstract

La pyrolyse des boues d'épuration peut réduire considérablement les déchets industriels tout en produisant du biochar à haute valeur ajoutée pour l'amélioration des sols. Cette étude visait à évaluer la qualité et la sécurité du biochar issu des boues d'épuration dans différentes conditions de pyrolyse.

Les conditions optimales de carbonisation (700 °C, 60 min, 5 °C/min) ont été identifiées en analysant les propriétés physicochimiques, la composition élémentaire, les caractéristiques structurelles et la surface spécifique du biochar.

Les résultats montrent que la pyrolyse des boues résiduelles réduit la teneur totale en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) prioritaires de 48 %, de 6367 ng/g à 3317 ng/g, principalement en raison d'une réduction des composés de faible poids moléculaire.

La composition des polyarènes dans les biochars est représentée principalement par des composés de faible poids moléculaire, parmi lesquels prédominent le naphthalène et le phénanthrène.

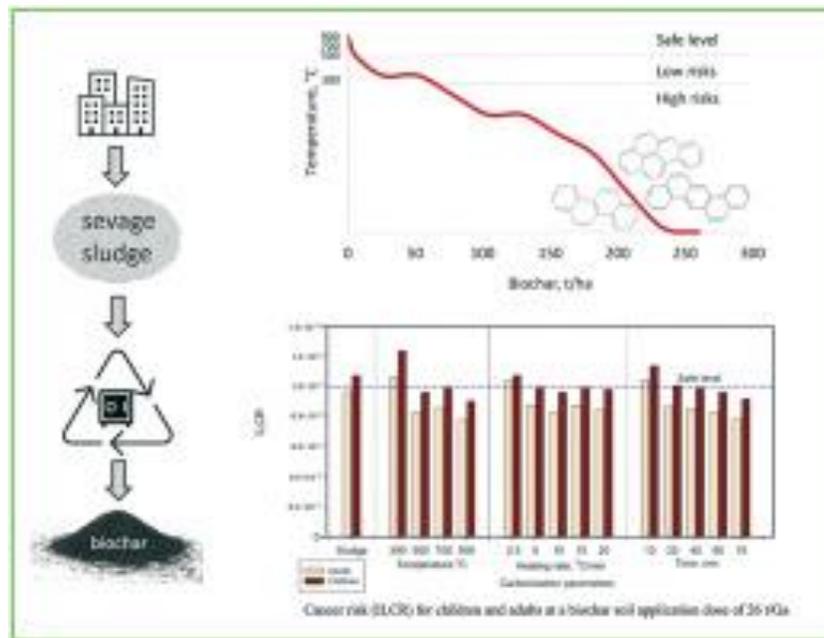
Dans le même temps, parmi les composés de haut poids moléculaire, le fluoranthène, le pyrène et le chrysène se démarquent, dominant significativement le tableau global. Selon le modèle de risque de cancer incrémentiel à vie, les risques cancérigènes associés à l'utilisation du biochar sont principalement dus à des composés dangereux tels que le chrysène, le benzo(a)pyrène et le dibenz(a,h)anthracène, évalués par des concentrations équivalentes toxiques.

Il a été constaté qu'en cas d'exposition orale ou cutanée à ces polluants, la probabilité de cancer chez les enfants est 1,1 à 1,4 fois plus élevée que chez les adultes. Dans le même temps, en cas d'inhalation, cette menace augmente de 1,5 fois pour les adultes par rapport aux enfants.

Cependant, avec l'augmentation de la température de pyrolyse, de la vitesse de chauffage et du temps de rétention des boues d'épuration, les risques cancérigènes du biochar diminuent.

Le biochar produit dans des conditions optimales contient des niveaux de HAP inférieurs aux normes de seuil toxique fixées par l'International Biochar Initiative. Le taux d'application sûr du biochar dans les sols Haplic Chernozem à une profondeur de 0 à 20 cm peut atteindre 26 t/ha.

## Résumé graphique



## Introduction

La dégradation des sols est devenue un problème mondial critique (Ferreira et al., 2022).

Les sols productifs des régions agricoles méritent une attention particulière, car la perte de ces sols menace la sécurité alimentaire mondiale.

De plus, les sols agricoles sont souvent situés à proximité des villes et des sites industriels, ce qui peut avoir un impact négatif sur la qualité des produits d'élevage et des cultures.

Les biochars, produits de la pyrolyse de matières riches en carbone, servent d'agents stabilisateurs qui empêchent la dégradation chimique et physique des sols (Schmidt et al., 2021).

Étant donné la proximité des zones urbaines et agricoles, il est raisonnable d'utiliser des biochars dérivés des boues d'épuration pour réduire les déchets et les appliquer aux sols agricoles, améliorant ainsi les propriétés physiques de l'eau et renforçant la capacité tampon contre un large éventail de polluants (Lehmann et al., 2021 ; Sohi et al., 2010).

Les boues d'épuration sont un sous-produit complexe du traitement des eaux usées industrielles et domestiques, qui, en plus des substances organiques, nutritives et biologiquement actives, contient également des micro-organismes pathogènes, des parasites, des métaux lourds et des polluants organiques et se caractérise par une teneur élevée en humidité et en cendres (Paz-Ferreiro et al., 2018).

Chaque année, 200 milliards de tonnes de boues d'épuration avec une teneur en humidité moyenne de 96 % sont générées dans les stations d'épuration du monde entier, dont plus de 100 millions de m<sup>3</sup> en Russie.

Elles deviennent un sujet de préoccupation si elles sont mal gérées, car leur élimination entraîne souvent une pollution secondaire et peut gravement nuire à la santé humaine (Gopinath et al., 2021).

Les méthodes traditionnelles d'élimination des boues d'épuration comprennent la digestion anaérobie, la mise en décharge et l'épandage au sol comme engrais (Piao et al., 2016).

La digestion anaérobie produit du biogaz et décompose les polluants organiques dans les boues (Amin et al., 2021), mais cette méthode ne permet pas une réduction suffisante du volume des boues.

La fertilisation et la mise en décharge nécessitent un minimum de main-d'œuvre, mais ne peuvent être mises en œuvre que dans les régions à grandes superficies et à boues à faible teneur en polluants (Teoh et Li, 2020).

Une solution pratique pour les boues d'épuration consiste à les convertir en matériaux hautement poreux et hautement fonctionnels en les carbonisant dans des conditions de manque d'oxygène (Agrafioti et al., 2013 ; Gopinath et al., 2021).

La pyrolyse produit du biochar, de la biohuile et du biogaz (Chai et al., 2024 ; Kravchenko et al., 2024b).

Les matières solides obtenues, le biochar, sont utilisées dans de nombreuses industries, principalement à des fins de production agricole (Panwar et Mathur, 2023 ; Wang et al., 2024).

L'amélioration de la qualité des sols, du rendement des cultures et du stockage du carbone à l'aide du biochar fait actuellement l'objet de recherches actives dans le monde entier (Wang et al., 2019 ; Xia et al., 2024).

La production de biochar à partir de boues d'épuration est limitée par la présence de divers polluants, notamment des contaminants inorganiques et organiques (Chan et Wang, 2016 ; Muhammad et al., 2021).

La concentration de polluants inorganiques (métaux lourds) dans le biochar dépend de leurs niveaux dans la matière première initiale et reste largement insensible aux paramètres de carbonisation des boues (Bauer et al., 2024).

Parmi les polluants organiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont les plus préoccupants.

Les HAP font référence aux polluants organiques qui contiennent deux ou plusieurs cycles benzéniques condensés dans leur structure et sont des cancérigènes et des tératogènes dangereux (Kravchenko et al., 2024a ; Marcińczyk et al., 2023). L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis répertorie 16 représentants des HAP comme polluants prioritaires (Keith, 2015).

À mesure que le nombre de cycles benzéniques dans la molécule de HAP augmente, leur toxicité et leur cancérigénicité augmentent.

D'une part, le processus de pyrolyse réduit la teneur initiale de nombreux polluants organiques dans les boues d'épuration en raison de la dégradation des composés organiques, y compris les HAP, dans des conditions de température élevée (McGrath et al., 2003 ; Sharma et Hajaligol, 2003).

D'autre part, le traitement thermique de la matière organique est la principale cause des HAP dans l'environnement. Dans ce cas, les conditions de combustion affectent également la teneur en HAP du biochar.

Par conséquent, les matières carbonées à base de boues d'épuration peuvent être formées à la fois par des augmentations et des diminutions de la teneur en polluants.

Le régime de température de carbonisation est le facteur clé régulant la teneur en HAP dans les sorbants. Deux voies principales de formation de HAP sont connues : à des températures de conversion plus basses, des réactions de Diels-Alder se produisent, impliquant des processus tels que la déshydrogénation, la polymérisation, la cyclisation et l'aromatisation des hydrocarbures, conduisant finalement à la formation de HAP (Sharma et Hajaligol, 2003).

À des températures supérieures à 400–500 °C, la voie pyrosynthétique consistant en une déméthylation et une déméthoxylation pour former des phénols, des alkylphénols et

des BTEC est une alternative (Sharma et Hajaligol, 2003). Ceci est suivi par une désoxygénation/déshydrogénation, un couplage de composés individuels et leur condensation en composés plus gros qui forment finalement des réseaux polyaromatiques (carbone pyrolytique ou HAP) d'hémicellulose et de cellulose de lignine, une déshydroxylation.

Le processus de pyrolyse forme initialement des composés à 2 et 3 cycles (McGrath et al., 2003).

Leur formation maximale se produit à une température de 300 °C. Compte tenu des concentrations initialement élevées de polyarènes dans les boues d'épuration initiales, leur carbonisation peut conduire à l'enrichissement du produit de pyrolyse final, les biochars, en polyarènes.

L'application de biochars à forte teneur en HAP aux sols agricoles peut entraîner une lixiviation des HAP des biochars avec une accumulation ultérieure dans les sols et les plantes cultivées (Wang et al., 2019). Lorsque des biochars contenant des HAP sont appliqués au sol pendant une longue période, cela entraînera le transfert des HAP dans le sol, ce qui présente un risque de toxicité pour l'homme (José et al., 2019). Par conséquent, l'évaluation de la sécurité de l'application possible des biochars est une tâche cruciale dans le développement de la technologie de carbonisation des boues d'épuration.

La pyrolyse des boues d'épuration peut être une stratégie prometteuse pour réduire considérablement les déchets dans les grandes industries avec un produit à haute valeur ajoutée pour l'amélioration des sols.

Cependant, lors du développement d'un matériau hautement fonctionnel, les conditions de carbonisation doivent être sélectionnées de manière à ce que les paramètres de qualité du sorbant standard tels que la surface spécifique, le pH et le rendement du produit final soient combinés avec sa sécurité environnementale.

La teneur en polluants du biochar limite son utilisation potentielle dans l'agriculture en raison du risque de contamination des sols.

À cet égard, l'étude visait à évaluer la qualité et la sécurité du biochar dérivé des boues d'épuration dans différentes conditions de pyrolyse lorsqu'il est utilisé comme additif pour certains des sols les plus fertiles du monde, les chernozems.