Digestion anaérobie par lots et semi-lots de bioplastiques poly(3-hydroxybutyrate- *co* -3-hydroxyhexanoate) (PHBH) : nouvelles perspectives cinétiques, structurales, microbiologiques et phytotoxicité du digestat

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178794Obtenez les droits et le contenu

Points forts

- La digestion anaérobie semi-par lots a permis d'obtenir 562 NmL de CH_4 /g de VS ajouté et 281 NmL de CH_4/Ld.

- Le bilan massique du carbone a montré une récupération de 96,09 %, dont 84,3 % convertis en biogaz.
- L'érosion de surface a été déterminée comme le principal mécanisme de biodégradation.

La dominance de *Methanosaeta* suggère une méthanogénèse acétoclastique.

Le digestat a présenté une phytotoxicité, suggérant la présence de composés inhibiteurs.

Résumé

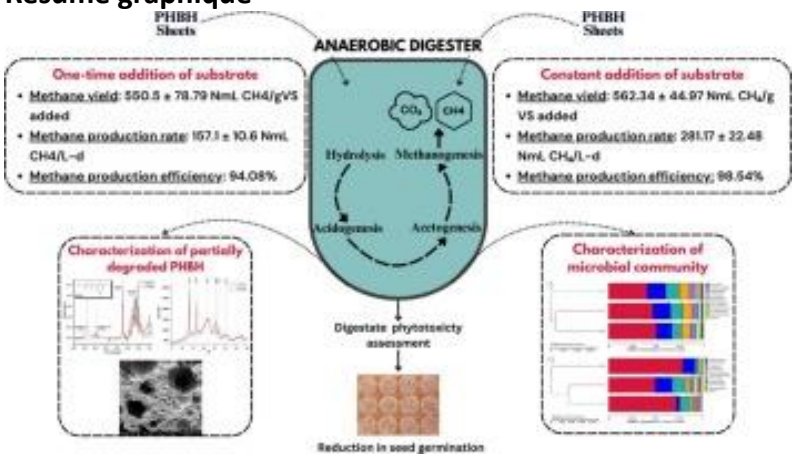
Cette étude a examiné la bioconversion du poly(3-hydroxybutyrate- *co* -3-hydroxyhexanoate) (PHBH) dans des systèmes de digestion anaérobie par lots et semi-lots, en se concentrant non seulement sur la production de méthane et la dynamique de la communauté microbienne, mais aussi sur les changements structurels qui se produisent pendant la dégradation et l'utilisation potentielle du digestat résultant comme amendement du sol.
Les deux systèmes fonctionnaient dans des conditions mésophiles (37 ± 2 °C) et un pH stable (7,9 ± 0,2).

Le système par lots a atteint un rendement en méthane de 550,5 ± 78,79 NmL CH_4/g VS ajouté sur 50 jours, avec un modèle de production de méthane sigmoïdal typique. Une analyse du bilan massique du carbone a indiqué une récupération de 96,09 %, avec 47,62 % du carbone converti en méthane.
Les analyses SEM, FTIR et XRD du matériau partiellement dégradé ont montré que la biodégradation anaérobie du PHBH était caractérisée par une érosion de surface et une perte de poids, avec des changements minimes de cristallinité. Inversement, l'adaptation de la communauté microbienne à 93 jours d'alimentation continue en PHBH a permis d'atteindre un rendement en méthane stable de 562,34 ± 44,97 NmL CH_4/g VS ajouté, ainsi qu'un taux de production volumétrique de méthane correspondant de 281,17 ± 22,48 NmL CH_4/Ld.

L'analyse de la communauté microbienne, à l'état pseudo-stationnaire, a révélé la dominance de *Methanosaeta* , *Anaerolineaceae* et *Thermovirga* dans la conduite de la digestion anaérobie du PHBH via la méthanogénèse acétoclastique.

Malgré une efficacité élevée de production de méthane, les tests de toxicité du digestat utilisant du ray-grass vivace ont indiqué des effets phytotoxiques sur la germination des graines, soulignant la nécessité de recherches plus approfondies pour caractériser les composés inhibiteurs et développer des stratégies d'atténuation.

Résumé graphique



Introduction :

La pollution plastique reste un problème mondial critique avec des conséquences importantes pour les écosystèmes environnementaux et la santé humaine. Des études ont montré que l'utilisation intensive de plastiques, en particulier d'articles à usage unique comme les sacs d'épicerie et les masques faciaux, pose des défis aux systèmes de gestion des déchets (Ahamed et al., 2021 ; Selvaranjan et al., 2021). En raison de la demande croissante de produits en plastique, il est essentiel d'explorer des stratégies pour mettre en œuvre des pratiques d'économie circulaire et améliorer la gestion des déchets plastiques afin d'atténuer leur impact environnemental (Ganguly et Chakraborty, 2024). Dans ce contexte, l'utilisation de bioplastiques est apparue comme une alternative durable aux plastiques conventionnels, offrant des avantages tels que la biodégradabilité, une dépendance réduite aux combustibles fossiles et un impact environnemental moindre. Le marché des bioplastiques peut être renforcé en développant des systèmes efficaces de gestion des déchets qui garantissent une collecte, un recyclage et un traitement de fin de vie appropriés, maximisant ainsi leurs avantages environnementaux et économiques (Atiwesh et al., 2021).
Parmi les différents bioplastiques, le polyhydroxybutyrate- *co* -3-hydroxyhexanoate (PHBH) a attiré l'attention pour sa biodégradabilité et ses propriétés mécaniques, le rendant adapté aux applications dans l'emballage, l'agriculture et les dispositifs médicaux (Eraslan et al., 2022).

La digestion anaérobie (DA) représente une méthode prometteuse pour gérer les déchets bioplastiques tout en produisant simultanément de la bioénergie (sous forme de biogaz) et du digestat qui a le potentiel d'être utilisé comme engrais (Cucina et al., 2021 ; Slepetiene et al., 2020).
Plusieurs études ont examiné l'efficacité de la DA dans la dégradation de différents bioplastiques dans diverses conditions (Cazaudehore et al., 2022 ; Cazaudehore et al., 2023a).

À ce jour, les recherches sur la dégradation anaérobie du PHBH se sont limitées exclusivement à des études de tests par lots (García-Depraect et al., 2024).

Bien que les systèmes par lots fournissent des informations initiales sur les taux de dégradation et le rendement en biogaz, il convient de noter que le mode par lots présente des limites pour simuler avec précision les systèmes de DA continus à grande échelle (Dolci et al., 2022).

De plus, les tests par lots ne parviennent pas à capturer les aspects clés de la dégradation anaérobie, tels que la stabilité du processus à long terme, la productivité du méthane, les taux de charge organique et les impacts de l'alimentation continue sur des facteurs tels que l'épuisement des nutriments, l'acclimatation microbienne et l'accumulation de substances toxiques (Koch et al., 2020). Récemment, l'acclimatation microbienne dans les digesteurs semi-continus a été signalée comme un facteur clé dans la promotion de l'enrichissement des micro-organismes capables de dégrader les bioplastiques, tels que les bioplastiques à base d'amidon (SBS) et l'acide polylactique (PLA) (Clagnan et al., 2023).

Dans ce contexte, il a été démontré que les bioplastiques façonnent la structure de la communauté microbienne pendant la digestion anaérobie (Bandini et al., 2022).
Cependant, la manière dont le PHBH peut influencer le microbiome à l'origine du processus de digestion anaérobie reste inconnue.

Dans ce contexte, une étude plus approfondie de la digestion anaérobie continue du PHBH, ainsi que de la composition spécifique du microbiome à l'origine du processus, est essentielle pour faire progresser la compréhension et optimiser les performances du processus.

La présente étude vise à étudier la méthanisation du PHBH dans des systèmes de digestion anaérobie par lots et semi-lots.
De plus, la transformation structurelle du PHBH pendant la dégradation a été analysée à l'aide de techniques analytiques, à savoir la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier - réflectance totale atténuée (FTIR-ATR).
De plus, la structure de la communauté microbienne enrichie pendant l'alimentation continue du PHBH a été caractérisée.
Enfin, cette étude a évalué le digestat dérivé de la digestion anaérobie par semi-lots du PHBH par le biais de tests de phytotoxicité, en utilisant le ray-grass vivace comme espèce de graine modèle.

Les nouvelles contributions de cette étude sont les suivantes :

i) elle fournit la première analyse comparative de la méthanisation du PHBH dans des systèmes opérationnels par lots et semi-lots, y compris une analyse taxonomique du microbiote impliqué ;
ii) elle étudie les changements structurels du PHBH pendant le processus de dégradation ; et
iii) il évalue le potentiel phytotoxique du digestat dérivé du PHBH comme étape préliminaire vers l'évaluation de sa viabilité en tant qu'amendement alternatif du sol sûr et efficace.

Extraits de section :

Dans cette étude, des feuilles de PHBH d'une épaisseur de 0,9 mm ont été utilisées comme substrat. Le PHBH, représenté par la formule chimique $[(C_4H_6O_2)_m(C_6H_{10}O_2)_n]$, a une composition copolymère de < 10 % en moles de 3-hydroxyhexanoate (3HH), le reste étant constitué de 3-hydroxybutyrate (3HB). L'analyse élémentaire par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDAX) a confirmé que la feuille de PHBH comprenait 68,51 % de carbone et 31,49 % d'oxygène (voir le matériel supplémentaire).

Boues d'épuration anaérobies, provenant de la production de biogaz :

Des différences notables dans la dynamique de la production de méthane ont été observées entre les systèmes de fonctionnement par lots et semi-par lots, indiquant des comportements distincts dans la cinétique de biodégradation du PHBH. En mode de fonctionnement par lots, la production de méthane a présenté un modèle sigmoïdal typique, caractérisé par une phase de latence initiale d'une durée d'environ 12 jours (Fig. 1). Comme l'inoculum utilisé n'était pas adapté au PHBH (comme seule source de carbone), la phase de latence observée reflète probablement le temps nécessaire à la biodégradation du PHBH.

Conclusions

Cette étude fournit une analyse complète de la DA du PHBH dans des conditions de lots et de semi-lots. Le système de lots a démontré l'efficacité de la DA du PHBH, atteignant un rendement cumulé en méthane de 550,5 NmL CH_4 /g VS ajouté et une récupération de carbone de 96,09 %, avec 84,3 % convertis en biogaz. Les analyses structurelles ont confirmé l'érosion de surface comme principal mécanisme de biodégradation. En revanche, le système de semi-lots avec alimentation continue de PHBH a permis une production de méthane stable, avec une moyenne de 100 %.

Déclaration de contribution d'auteur CRediT

Mohamed Shafana Farveen : Rédaction – ébauche originale, visualisation, méthodologie, investigation. **Raul Muñoz :** Rédaction – révision et édition, ressources, méthodologie. **Rajnish Narayanan :** Rédaction – révision et édition, supervision. **Octavio García-Depraect :** Rédaction – révision et édition, supervision, ressources, administration de projet, méthodologie, analyse formelle, conceptualisation.

Déclaration d'intérêts concurrents. Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun intérêt financier concurrent connu ni aucune relation personnelle qui aurait pu sembler influencer le travail rapporté dans cet article.

Reconnaissance

Ce travail a été soutenu par un financement du programme NextGeneration EU/PRTR de l'Union européenne et du MCIN/AEI / 10.13039/501100011033 dans le cadre de la subvention RYC2021-034559-I . Nous remercions le programme Erasmus+ KA171 pour avoir soutenu cette recherche par le biais d'une bourse de stage doctoral. Nous remercions également le gouvernement régional de Castille-et-León et le programme européen FEDER (CL-EI-2021–07 et UIC 379315). Les auteurs remercient chaleureusement Beatriz pour son soutien technique inestimable.

Références (61)

- A. Ahamed *et al.*

Analyse du cycle de vie des sacs d'épicerie en plastique et de leurs alternatives dans les villes dotées d'une structure de gestion des déchets confinée : une étude de cas à Singapour
J. Propre. Prod.
(2021)

- G. Atiwesh *et al.*

Impact environnemental de l'utilisation des bioplastiques : une revue
Hélios
(2021)

- RW Brown *et al.*

L'ajout de bioplastique (PHBV) au sol modifie la structure de la communauté microbienne et affecte négativement le fonctionnement métabolique microbien des plantes dans le maïs
J. Hazard. Mater.
(2023)

- G. Cazaudehore *et al.*

La digestion anaérobie peut-elle être un scénario de fin de vie adapté aux plastiques biodégradables ? Un examen critique de la situation actuelle, des obstacles et des défis
Biotechn. Adv.
(2022)

- G. Cazaudehore *et al.*

Simulation de co-digestion de biodéchets et de plastiques biodégradables en réacteurs semi-continus : performances et évaluation agronomique
Bioresour. Technol.
(2023)

- G. Cazaudehore *et al.*

Communautés microbiennes actives lors de la biodégradation des plastiques biodégradables par digestion anaérobie mésophile et thermophile
J. Hazard. Mater.
(2023)

- E. Clagnan *et al.*

L'acclimatation de la communauté microbienne améliore la biodégradation des bioplastiques et la production de biogaz dans le cadre de la digestion anaérobie thermophile
Bioresour. Technol.
(2023)

- M. Cucina *et al.*

Dégradation des bioplastiques dans les déchets organiques par digestion anaérobie mésophile, compostage et incubation dans le sol
Gestion des déchets
(2021)

- G. Dolci *et al.*

Evaluation de la dégradation anaérobie des sacs de collecte des déchets alimentaires en papier ou en bioplastique
J. Environ. Manag.
(2022)

- K. Eraslan *et al.*

Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBH) : synthèse, propriétés et applications - une revue
Eur. Polym. J.
(2022)