

Impact de l'ajout de cendres lors de la méthanisation en voie sèche thermophile de paille de blé



L. LEVAVASSEUR^{1,2,3}, F. MARTEL¹, H. GRASER¹, L. CHEVRIER⁴, S. DELAUNAY², G. HENRY³

¹ CRISTAL UNION, 51430 Bezannes, France

² Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, UMR 7274 Université de Lorraine, CNRS

³ Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA), Université de Lorraine

⁴ ODIGOS, 67400 ILLKIRCH-GRAFFENSTADEN, France



CRISTAL UNION

L'ajout de cendres issues de la combustion de biomasses végétales dans le milieu de digestion anaérobie a été étudié pour prévenir l'acidification, favoriser un consortium microbien équilibré et garantir ainsi la stabilité et l'efficacité du procédé. Bien que généralement considéré comme un déchet, ce matériau, abondant et disponible localement, représente une ressource potentielle pour améliorer les performances de la méthanisation (Perämäki *et al.*, 2025).

L'ajout contrôlé de cendres en méthanisation a montré divers effets bénéfiques, notamment une augmentation de la production de méthane pouvant dépasser 30 %. Cette amélioration résulte de trois mécanismes complémentaires : l'apport d'oligo-éléments essentiels (Fe, Zn, Co, Ni) nécessaires au métabolisme des archées méthanogènes (Yin *et al.*, 2018 ; Wang *et al.*, 2021 ; Qu *et al.*, 2023), l'effet alcalinisant des cendres permettant de stabiliser le pH et de limiter l'acidification (Qu *et al.*, 2023 ; Perämäki *et al.*, 2025 ; Shamurad *et al.*, 2020), ainsi que leur rôle potentiel dans la facilitation des échanges directs d'électrons entre bactéries et archées, stimulant la production de méthane (Başar *et al.*, 2022 ; Wang *et al.*, 2021).

Ces résultats positifs sont toutefois nuancés par l'observation de facteurs limitants. Un excès de cendres entraîne une accumulation toxique de métaux et la formation d'espèces réactives de l'oxygène, susceptibles d'endommager l'ADN et d'inactiver les microorganismes (Wang *et al.*, 2021). Enfin, la variabilité des cendres, liée à la biomasse et aux conditions de combustion, influence leur efficacité et impose une caractérisation préalable avant utilisation.

Dans le cadre d'une thèse sur la méthanisation en voie sèche thermophile de paille, l'ajout de cendres a été étudié car son utilisation dans des conditions thermophiles reste peu documentée et n'a pas encore été envisagée en voie sèche continue.

Approche méthodologique

1. Plan factoriel 3x3

Facteur 1 : ration

- 100 % paille de blé
- 100 % pulpes de betterave sucrière
- 70 % pulpes – 30 % paille

Facteur 2 : Concentration en cendres de bois

- 0 g/gMO_{substrat}
- 0,16 g/ gMO_{substrat}
- 0,67 g/ gMO_{substrat}

Facteur 3 : ratio inoculum/substrat (I/S)

- 0,2
- 0,4
- 0,8

Le ratio I/S théorique des unités voie sèche continue est autour de 0,2

2. Essais Batch



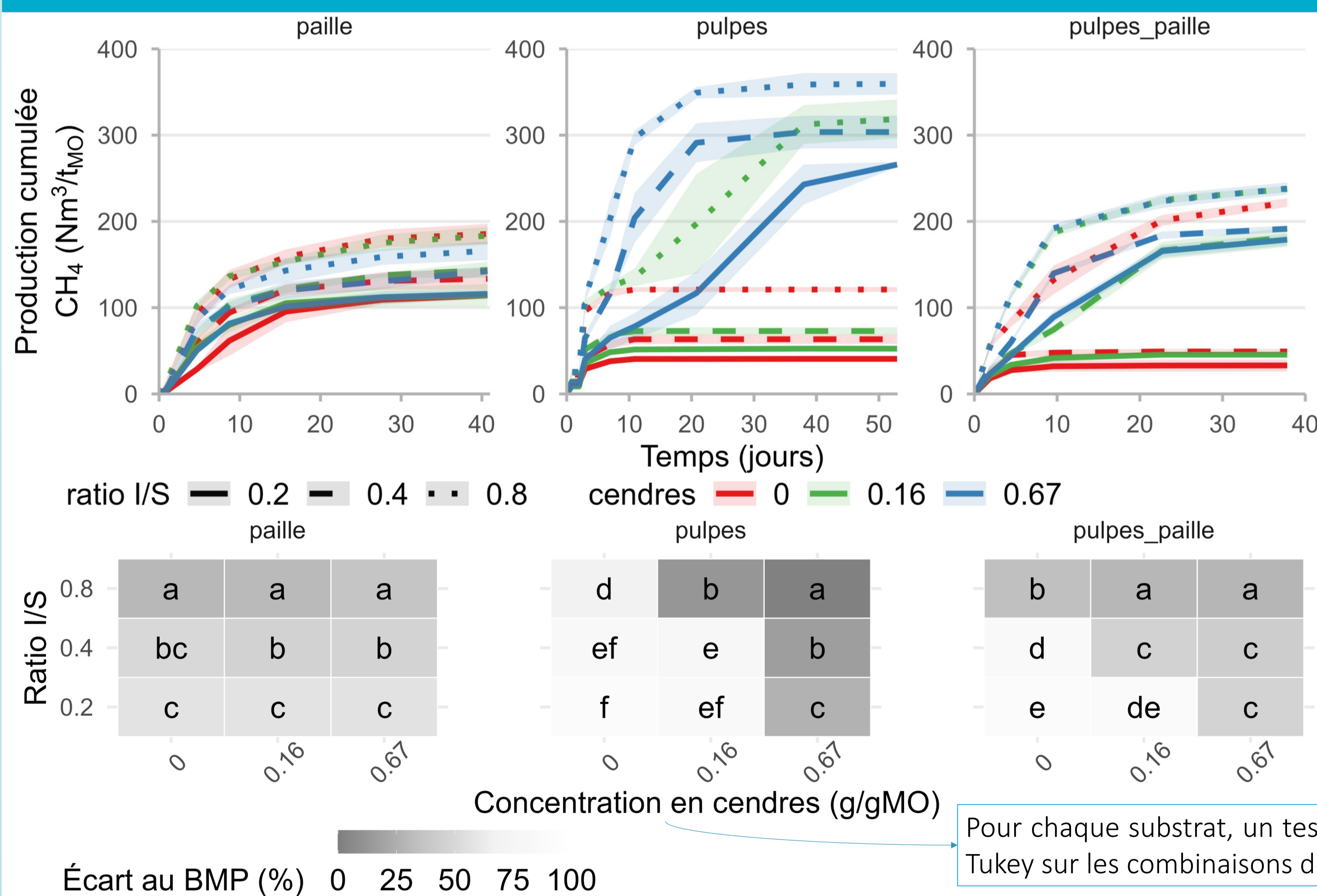
- Cendres : 0 ; 0,48 ou 2,01 g
- Eau distillée : équilibre le volume réactionnel
- Inoculum : quantité variable, selon ratio I/S (issu d'un digestat de méthaniseur thermophile)
- Substrat(s) : 3 g de matière organique (MO)

Incubation à 55 °C jusqu'à ce que la production résiduelle soit < 5 % de la production totale

3. Suivi des essais

- Suivi de la production de biogaz et du % de CH₄
- Analyse statistique des résultats (test de Tukey)
- Mesure du pH en fin d'essai
- Analyse HPLC des digestats

Résultats – Effet des cendres selon la ration, leur concentration et le ratio I/S



L'effet des cendres dépend des trois facteurs testés : à la fois du ratio I/S, de la concentration en cendres et de la composition de la ration.

Selon le type de substrat :

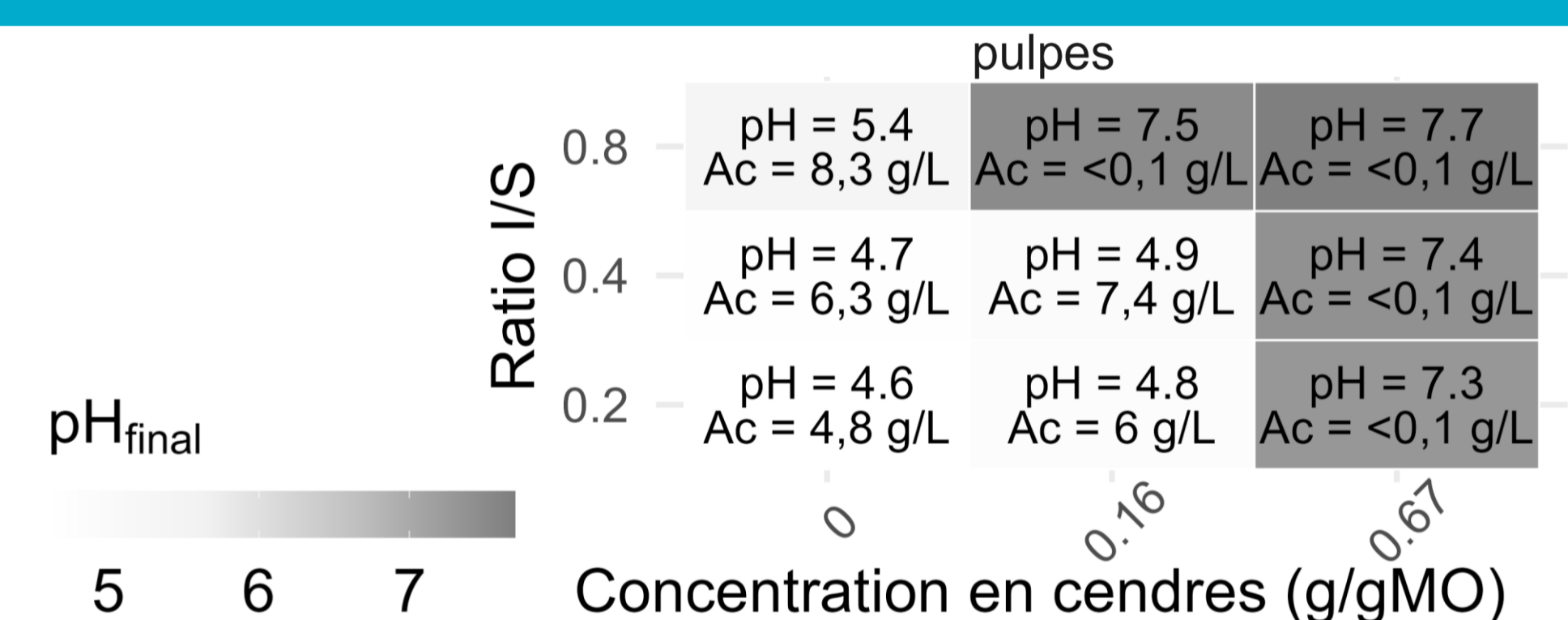
- Paille : les cendres ont peu d'effet, quel que soit le ratio I/S et la concentration en cendres.
- Pulpes de betterave : l'effet des cendres est marqué.
 - Plus le ratio I/S est faible, plus la concentration en cendres nécessaire pour approcher le potentiel méthanogène des pulpes est élevée.
- Mélange pulpes - paille :
 - A un ratio I/S de 0,8, les cendres influencent peu la production finale de méthane, mais modifient surtout la cinétique de production.
 - Pour les ratios I/S plus faibles, la production de méthane augmente avec la concentration en cendres.

Pour chaque substrat, un test de comparaisons multiples a été effectué avec un test de Tukey sur les combinaisons de ratio I/S x cendres

Résultats – Cendres : stabilisation du pH et prévention de l'acidose à faible ratio I/S

L'ajout de cendres permet de maintenir un pH de digestion proche de la neutralité et de limiter l'accumulation d'acide acétique (Ac), évitant ainsi l'inhibition du processus de digestion.

- Pour les pulpes, corrélativement à l'effet observé sur la production de méthane, plus le ratio I/S est faible, plus la concentration en cendres nécessaire pour maintenir un pH neutre est élevée.



Conclusions et perspectives

- ✓ L'effet des cendres varie selon la fermentescibilité du substrat : impact limité sur les substrats peu fermentescibles, mais marqué sur les substrats très fermentescibles.
- ✓ Prévention de l'acidose : les cendres maintiennent le pH proche de la neutralité et réduisent le risque d'acidose à faible ratio I/S.
- ✓ L'ajout de substrats peu fermentescibles dans la ration (ex. paille) contribue à la stabilité et permet de réduire la concentration optimale de cendres.
- ✓ Avantages pratiques : les cendres représentent une solution économique et facilement disponible pour stabiliser la digestion anaérobie de substrats très fermentescibles.
- ✓ Point de vigilance : risque d'accumulation d'éléments traces métalliques, notamment en procédé voie sèche.

Références

- Başar İ.A., Eskicioglu C., et Perendeci N.A., 2022. Biochar and wood ash amended anaerobic digestion of hydrothermally pretreated lignocellulosic biomass for biorefinery applications. *Waste Management*, 154, p. 350-360.
- Perämäki S., Haimi J., Kataja-aho S., Kuumola T., Pirje P., Larsson S., Vainio M., Pulkkinen H., et Rasi S., 2025. Fly ash addition into anaerobic digestion of biowaste: effects on biomethane production and fertilizing properties of the digestate. 203 (108259).
- Qu Y., Zhai Y., Ma C., Shi W., Zhao M., Huang Z., et Ruan W., 2023. Rapid start-up of anaerobic digestion reactor with rice-straw ash addition for treating high salinity organic wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 175, p. 806-813.
- Shamurad B., Gray N., Petropoulos E., Tabraiz S., et Sallis P., 2020. Improving the methane productivity of anaerobic digestion using aqueous extracts from municipal solid waste incinerator ash. *Journal of Environmental Management*, 260, p. 110160.
- Wang Y., Wei W., Huang Q.-S., et Ni B.-J., 2021. Methane production from algae in anaerobic digestion: Role of corncob ash supplementation. *Journal of Cleaner Production*, 327, p. 129485.
- Yin C., Shen Y., Zhu N., Huang Q., Lou Z., et Yuan H., 2018. Anaerobic digestion of waste activated sludge with incineration bottom ash: Enhanced methane production and CO₂ sequestration. *Applied Energy*, 215, p. 503-511.

Avec le soutien de

