

PYROLYSE LENTE DU FUMIER DE VOLAILLE : PERFORMANCE DU PROCEDE ET POTENTIEL POUR LA FILIERE POULET DE CHAIR

Roffi Stéphane¹, Moreira Mariana², Thevenin Nicolas³

¹*Chambres d'agriculture de Bretagne - Antenne de Rennes, Rue Maurice le Lannou - 35042
Rennes,*

²*Chambres d'agriculture de Bretagne - Antenne de Plérin, 4 Avenue du Chalutier Sans Pitié
- 22190 Pléri*

³*RITTMO Agroenvironnement - 37 rue de Herrlisheim - 68000 Colmar*

stephane.roffi@bretagne.chambagri.fr

RÉSUMÉ

Le fumier de volaille est caractérisé par une forte teneur en minéraux (phosphore (P), potassium (K), azote (N)). La pyrolyse de ces effluents produit un charbon appelé biochar. La présente étude a eu pour objet de développer un process de pyrolyse mobile, d'évaluer sa performance en déterminant son rendement, le taux de conservation et la concentration des éléments minéraux (N, P, K, cuivre (Cu) et zinc (Zn)) dans le biochar. Enfin, les intérêts potentiels de la pyrolyse sur le plan énergétique et économique ont été étudiés à partir d'un cas-type d'exploitation avicole (élevage de poulet de chair de 2200 m²) selon 2 scénarios : (1) avec valorisation des gaz de pyrolyse en production de chaleur pour chauffer les poulaillers ; (2) avec valorisation totale des gaz en électricité, autoconsommée par la ferme. Le couple temps/température du procédé fournit par le constructeur a été adapté grâce à une analyse thermogravimétrique (ATG) sous flux d'azote et fixé à 20 min à 550 °C. Le bilan de masse entre la matière première et le biochar produit montre un bon taux de conservation du P et K (respectivement 58 % et 75 %). En revanche, une part importante de l'azote est perdue lors du process (-79.8 %). Pour le cas-type considéré, dans le premier scénario, en considérant les économies de gaz et la vente du biochar produit, l'économie totale pour l'exploitation s'élèverait à 26 423 €. Dans le second scénario, le gain issu des économies d'électricité et de la vente du biochar s'élèverait à 38 561 €.

ABSTRACT

Slow pyrolysis of poultry manure - Performance of the process and fertilising effect of biochar

Poultry manure is characterized by a high content of minerals (phosphorus (P), potassium (K), nitrogen (N)). Pyrolysis of this byproduct from poultry farming produces a coal named biochar. The aim of this study was first of all, to develop a mobile pyrolysis process, to assess its performance, determining the yield, preservation rate and concentration of minerals (N, P, K, Copper (Cu) and Zinc (Zn)) in the biochar. Finally, the potential advantages of pyrolysis from an energetic and economical point of view were studied by taking an example of an average poultry farm (2200 m²) according to 2 scenarios; (1) gases from pyrolysis are turned to heat to supply the poultry houses. (2) gases are turned to electricity, consumed by the farm. The time/temperature couple of the process given by the manufacturer was adapted thanks to thermogravimetric analysis (TGA) with a stream of nitrogen. This analysis revealed that the yield of the pyrolysis process in biochar and fixed carbon (CF) is similar whether it's a time/temperature couple of 20 min at 550°C or a couple of 20 min at 700°C. The mass balance between the raw matter and the biochar produced shows a good preservation rate of P and K (respectively 58 % and 75 %). On the other hand, an important part of nitrogen is lost during the process (-79.8 %). In the first scenario, taking into account gas savings and the sale of the biochar produced, the total saving for the average farm is 36 423 €. In the second scenario, the profit earned from electricity savings and biochar sale is 38 561€.

INTRODUCTION

Les effluents avicoles sont caractérisés par de fortes teneurs en azote et phosphore. Leur bonne gestion et valorisation permet de réaliser des économies et de diminuer leur impact environnemental. Aujourd'hui, il existe plusieurs voies de valorisation, comme le compostage, le séchage, la granulation des fientes et la méthanisation par voie sèche (Chambre d'agriculture d'Alsace, 2016). A un stade encore expérimental, la pyrolyse est un procédé qui chauffe les effluents à haute température en absence d'oxygène. Ce procédé peut en réalité traiter tout type de biomasse végétale ou animale et est déjà largement utilisé pour le bois (IBI, 2014). Bien qu'encore peu testée sur le terrain, la pyrolyse d'effluents de volailles pourrait présenter plusieurs avantages pour la filière avicole : sanitaire, via l'élimination des pathogènes des fumiers de lots de volailles contaminées, énergétique et économique, en récupérant la chaleur du procédé pour chauffer les poulaillers, réduisant ainsi la consommation de propane, notamment l'hiver ou en période de démarrage ainsi qu'en vendant le biochar obtenu (David Yarrow, 2015). Ce biochar est le produit solide, riche en carbone, obtenu en fin de pyrolyse. Son prix de vente moyen (ou espéré) est de 500 €/t (OFEV, 2023), la mise en marché du biochar en France, en tant que produit fertilisant, peut être réalisée par deux voies : l'autorisation de mise en marché (homologation) ou le règlement européen 2019/1009 en tant que catégorie de matière constitutive (CMC 14) et intégré ou conforme à une catégorie fonctionnelle de produit (PFC). Les fientes de volailles étant des sous-produits animaux (SPA) de catégorie 2, la réglementation européenne ne permet aujourd'hui pas leur transformation par pyrolyse s'ils n'ont pas atteint leur point final de transformation, c'est-à-dire ayant été au préalable compostés ou méthanisés, sortant avec un taux de matières sèches (MS) élevé.

Depuis quelques années, de nombreux travaux s'intéressent au potentiel agronomique et environnemental de ce produit, par son effet amendement (Muñoz et al., 2019), fertilisant (Glaser et al., 2015), de réduction des émissions de N_2O ou de lixiviation de nitrates (Borchard et al., 2019) et de séquestration du C (Paustian et al., 2016). Le biochar de fumier de volaille peut contenir des teneurs en nutriments (P et K) élevées. Ainsi, son usage en substitution partielle des engrais fossiles peut répondre à des enjeux d'approvisionnement de proximité et d'autonomie en engrais (Ginebra et al., 2022), notamment pour les fermes avicoles en situation d'excédent structurel (avec ou sans terres) qui pourraient vendre le biochar issu de la transformation du fumier non épandable. La présente étude a eu pour objet de développer un pilote mobile de pyrolyse de fumier de volaille, d'évaluer sa performance (bilan de masse et énergétique), et

d'étudier son intérêt potentiel pour la production avicole sur le plan énergétique et économique à partir de l'étude d'un cas-type d'exploitation de poulets de chair.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Description des équipements de pyrolyse

Le pilote de pyrolyse (fonctionnant uniquement à l'électricité) est composé de 4 éléments (sur roues) démontables afin de les transporter par camion jusqu'aux exploitations agricoles. La puissance électrique du four de pyrolyse est de 15 kW avec une capacité de traitement de 10 kg de matière brute (MB)/h. Il se compose de i) la cuve d'alimentation ; ii) le four de pyrolyse ; iii) la récupération du biochar ; iv) la torchère. Le réservoir d'alimentation est chargé de fumier de volaille préalablement séché au soleil pour obtenir un taux de MS supérieur à 80 % de MB. Le fumier est ensuite broyé en particules de moins de 25 mm pour être conforme à la capacité du pas de filetage de la vis sans fin permettant d'acheminer le substrat. Du diazote (N_2 à 15-20 NL/min) est envoyé dans le système pour chasser l'oxygène (O_2) et placer le processus de pyrolyse dans des conditions anaérobies ($O_2 < 2\%$ v/v). Une vis doseuse placée sous la cuve transporte la biomasse vers le four de pyrolyse. Sur le four horizontal, une pyrolyse lente à des températures comprises entre 550°C et 700°C a été réalisée avec un temps de séjour de 20 min. Le four se termine par une boîte dite de "désengagement", qui sépare le biochar d'une part, du gaz d'autre part. Ensuite, un dispositif de traçage électrique maintient une température minimale de 350°C afin d'éviter la condensation des gaz, permettant ainsi leur transfert vers la chambre de combustion : la torchère. Le biochar est récupéré sous la boîte de désengagement grâce à une vis sans fin refroidie à l'eau (double paroi) pour être stocké.

1.2. Détermination du couple temps/température

Dans ces travaux, deux couples temps/température ont été utilisés. Le premier a été déterminé par le constructeur de l'équipement avec une température de 700°C et un temps de séjour de 20 min. Le second est de 20 min à 550°C, fixé en collaboration avec l'institut de sciences des matériaux de Mulhouse en utilisant la thermogravimétrie sous flux d'azote. Pour cela, une thermobalance de marque METTLER TOLEDO a été utilisée (TGA/DSC 3+). Le principe de cette analyse est de suivre la perte de masse de l'échantillon en conditions de pyrolyse afin de mettre en évidence les phénomènes physiques et chimiques subis par l'échantillon pendant le processus. Le protocole expérimental consiste à porter l'échantillon de la température ambiante jusqu'à 900°C sous flux d'azote avec une rampe de température de 5°C/min,

puis de le laisser 10 min à cette température sous azote avant d'injecter de l'air. Cette mesure permet de déterminer les valeurs limites en MS, matières volatiles (MV), en carbone fixe (CF) et en cendres des fumiers de volailles.

1.3. Paramètres suivis en cours de traitement et bilan de masse de la pyrolyse

Les paramètres suivis en cours de traitements sont les températures (à l'entrée du four, dans le four, en sortie du four, dans la ligne d'évacuation des gaz, dans la vis de refroidissement, dans le fut de stockage du biochar et dans la torchère), les vitesses de chacune des vis d'acheminement de la biomasse et du biochar, le flux d'azote, la teneur en N₂ et O₂ dans le système. Des détecteurs de CO, de pressions et une garde hydraulique constituent les systèmes de prévention de dysfonctionnements. Les fumiers de volaille utilisés ont été séchés durant 3 à 5 jours pour atteindre un taux de MS supérieur à 80 %. Le bilan des masses avant et après pyrolyse entre le fumier de volaille, le biochar et les gaz produits a été effectué à partir d'un lot de 120 kg de fumier. Les concentrations des fumiers et biochars en C_{org}, N, P, K, S et métaux lourds (Cu et Zn) ont ensuite été analysées et comparées (**tableau 1**). Ces analyses ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyses et de Recherches de Laon (LDAR), laboratoire accrédité Cofrac pour le programme 108 relatif aux matières fertilisantes et aux supports de culture. La composition du fumier (avant pyrolyse) et du biochar (après pyrolyse) en éléments fertilisants (carbone organique (C_{org}) N, P, K et S) a été mesurée et la composition des gaz a été déduite par calcul (**tableau 2**).

1.4. Bilan énergétique du process

Afin de dresser un bilan énergétique du process, une estimation de la consommation du pilote a été réalisée en utilisant la puissance installée de chacun des équipements de ce dernier (exprimé en kW) et rapportée au temps de fonctionnement pour traiter une unité de masse (ex : 1 t) et en prenant en compte le taux de fonctionnement (ex : 10% de sa puissance). Le calcul détaillé est présenté en **tableau 3**.

1.6. Etude d'un cas type d'exploitation en poulet de chair (poulet lourd)

Afin d'évaluer les potentiels intérêts de la pyrolyse sur le plan énergétique et économique pour les élevages avicoles, une étude portant sur les coûts d'exploitations d'un cas type d'élevage de poulets de chair a été effectuée en 3 étapes :

- Un bilan de masse extrapolé à l'échelle de l'exploitation à partir des données obtenues sur 120 kg de fumier a permis d'estimer pour l'exploitation-type, la quantité totale de biochar pouvant être

produite et vendable sur le marché, ainsi que la quantité d'éléments associés (C_{org}, N, P, K et S).

- Dans un second temps, afin d'évaluer les gains énergétiques et économiques de la pyrolyse, 2 scénarios ont été élaborés. Dans le premier, la pyrolyse utilisée par l'exploitation type produit des gaz qui sont valorisés pour la production de chaleur par combustion. Dans ce scénario, la totalité de la chaleur est récupérée pour chauffer les 2200 m² de poulaillers.

Dans le second scénario, la totalité des gaz de pyrolyse est valorisée pour produire de l'électricité. Etant donné qu'il n'existe pas encore de tarif réglementé pour la vente d'électricité produite à partir des gaz de pyrolyse, l'électricité est autoconsommée dans ce scénario (le surplus d'électricité produit n'est pas pris en compte).

Pour chacun des scénarios, les potentiels d'économies d'énergie (gaz pour le scénario 1 et électricité pour le scénario 2) et le produit issu de la vente du biochar ont été calculés, en déduisant les charges associées aux consommations d'énergie supplémentaires du pyrolyseur.

1.7. Caractéristiques de l'exploitation-type et hypothèses retenues

L'exploitation-type est un élevage de poulet de chair (poulet lourd) moyen de 2200 m² (Dezat et al., 2021) produisant 192 kg/m²/an de fumier, soit 422 t/an sur toute l'exploitation (Dezat et al., 2020). Les consommations d'énergie retenues par unité de surface sont de 6,7 kg/m²/an pour le gaz et de 21 kWh/m²/an pour l'électricité (Amand et al., 2008) (bien qu'elles soient vieilles ces données, sont les plus récentes disponibles. Un travail (Etude URE-2030) est en cours pour remettre à jour ces chiffres. Les données de production d'électricité et de chaleur à partir des gaz de pyrolyse (non mesurées dans le cadre de l'étude), ont été calculées à partir de données issues de la bibliographie, en considérant un traitement thermique à 700°C. (Respectivement de 462 kWh/t d'effluent (Gonzales et al., 2020) et de 5183 kWh PCS/t de fumier (Baniasadi et al., 2016). Afin de pouvoir chiffrer des premiers éléments économiques sur l'exploitation-type, plusieurs hypothèses et simplifications ont été retenues :

- Le traitement des fumiers nécessite à minima un pyrolyseur de 53 kg/h (8000 h de fonctionnement et 760 h disponibles pour la maintenance). Nous avons admis que ce pyrolyseur de plus grande taille conservait les mêmes ratios de consommation électrique et de production de biochar que le pilote de pyrolyse étudié : 242 kWh/t et 220 kg/t de fumier. Le pyrolyseur est considéré fixe dans cette étude.

- L'ensemble du fumier sur l'élevage est transformé en biochar et vendu.

- le coût de transformation des fumiers (qui représente une contrainte forte) ne sera pas évalué dans cette

étude. (on considère ici simplement un fumier préalablement séché et non composté ou méthanisé).

- La consommation de fuel est négligeable et n'est donc pas prise en compte.

- La donnée de production d'électricité (462 kWh/t) sur laquelle se base le calcul du potentiel de production à l'échelle de la ferme est une donnée de la bibliographie déterminée à partir des gaz de pyrolyse de digestat solide de lisier de porcs avec un taux de MS de 90 %. Etant donné le taux de MS proche entre le digestat solide et le fumier (de 80 %) de cette étude, la production d'électricité est considérée égale.

Les coûts d'électricité et de gaz retenus sont respectivement de 13,75€/100 kWh et de 745€/t (Dezat et al., 2021). Nous n'avons pas pris en compte la chaleur résiduelle de la cogénération.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Détermination du couple temps/température

Les résultats de l'analyse thermogravimétrique (**Tableau 4**) ont montré que la température de 550°C et un temps de séjour de 20 min sont des paramètres suffisants pour obtenir un rendement de production de biochar similaire et la même teneur en CF que le traitement à 700°C/20 min (entre 51,4 % MB pour 550°C et 54,1% MB pour 700°C). Le biochar utilisé dans la présente étude provient de la transformation de fumier de volaille à 700 °C pendant 20 min.

2.2. Essais de production

2.2.1. Bilan de masse, pertes matières et qualité des biochars

Le tableau 5 présente le bilan de masse des éléments agronomiques majeurs. La pyrolyse génère une perte de masse de 78 %, soit une production de 220 kg de biochar par tonne de fumier de volaille brut. Une part importante du P et du K se conservent dans le biochar, respectivement à hauteur de 58 % et 75 % ; tandis qu'on mesure une perte importante du carbone organique et de l'azote qui sont transférés dans la phase gazeuse avec des taux respectifs de 76 % et 80 %. Il est important de noter que ces gaz peuvent être distingués en 2 catégories :

- Les gaz incondensables, constitués majoritairement de CO₂, de CO et de CH₄.
- Les gaz condensables pouvant conduire à la formation d'huile s'ils sont refroidis. Dans cette fraction, on retrouve principalement de l'eau, des acides gras, des stérols et du N majoritairement sous forme de NOx (Moloodi et al. 2012).

Le tableau 1 présente la concentration des éléments dans le fumier de volaille et le biochar. On observe globalement un maintien ou une concentration des éléments mesurés à l'exception de l'azote. Pour ce dernier, les formes minérales sont volatilisées, et seul

l'azote organique est conservé. Néanmoins, des essais de minéralisation de l'azote en conditions contrôlées (résultats non présentés) ont montré que cet azote n'est pas disponible pour les plantes. Concernant les éléments P et K, le facteur de concentration dans le biochar est de 2,4 fois et 3,3 fois respectivement, ce qui permet d'obtenir des concentrations intéressantes de 5,7 % de P₂O₅ et de 9,2 % de K₂O dans le biochar final par rapport au fumier de volaille. Cet effet concentrateur, s'il peut être intéressant pour les éléments fertilisants, peut s'avérer moins positif avec la présence de métaux lourds. En effet, on observe une concentration de Cu et de Zn respectivement 2,9 et 2,3 fois plus élevée (**Tableau 1**) dans le biochar que dans le fumier de volaille. C'est un paramètre à prendre en compte dans les réflexions autour de ce procédé car des effluents chargés en métaux peuvent se rapprocher des seuils réglementaires pour leur mise en marché. Les biochars produits ont ainsi une teneur en Zn de 897 mg/kg MS, se rapprochent du seuil de 1 000 mg/kg MS de la NF U 44-001-2 (Engrais - Dénominations et Spécifications - Partie 2 : engrais organiques) et qui dépassent celui du règlement européen 2019/1009 pour les engrais organiques, soit 800 mg/kg MS.

2.2.2. Bilan énergétique et économique

Les consommations d'électricité du pilote de pyrolyse (**Tableau 3**) sont de 242 kWh/t de fumier traitée, principalement dû à l'énergie nécessaire pour chauffer le fumier et refroidir le biochar, (environ 85 % des consommations).

Le tableau 5 présente le bilan de masse théorique de l'exploitation type. Avec un rendement (taux de conservation) de 22,2 %, la production de biochar s'élève à 93,4 t pour 422 t produites annuellement. Les productions de C_{orga}, N, P et K sont de 32,7 t, 2,36 t, 2,25 t et 7,17 t respectivement.

Le tableau 6 présente les bilans énergétiques et économiques selon les 2 scénarios (valorisation des gaz pour la production d'électricité ou de chaleur).

Dans le premier scénario, la production de chaleur à partir des gaz de pyrolyse s'élève à 2 189 205 kWh PCS. Cela couvre largement les besoins en chaleur de l'exploitation (203 928 kWh) et par conséquent permet de se passer à 100% du gaz. En considérant ces économies, la vente du biochar et les charges liées à l'énergie, l'économie annuelle réalisée par l'exploitation s'élève à 26 423 € sur une année. Dans ce scénario plus de 90 % de la chaleur produite n'est pas valorisée.

La consommation d'électricité moyenne du pyrolyseur est de l'ordre de 100 000 kWh, ce qui en fait une consommation très élevée, 2,2 fois supérieure à la celle de base nécessaire à la conduite de l'élevage (46 200 kWh). Néanmoins, il faut noter que la consommation d'électricité du pyrolyseur est sûrement surévaluée car une unité fixe fonctionnera

d'avantage en continue, limitant les pertes d'énergie pour lancer l'équipement.

Bien que la consommation d'électricité soit élevée, la valorisation de l'ensemble des gaz dans le scénario 2 pour la production d'électricité permet d'avoir un potentiel de production presque 2 fois supérieure (195 149 kWh) à l'énergie nécessaire au fonctionnement du pilote. En considérant les économies d'électricité réalisables, la vente du biochar et les charges liées à l'énergie, l'économie annuelle réalisée est estimée à 35 861 €. Dans ce scénario, la chaleur produite en plus de l'électricité n'est pas valorisée. Bien que ce dernier ne soit pas étudié, il semble conceptuellement possible de couvrir l'ensemble des besoins énergétiques du poulailler et du pyrolyseur.

CONCLUSION

Ce travail a permis de mettre en lumière des premiers éléments chiffrés sur les gains potentiels de la pyrolyse pour la filière avicole (substitution du gaz de chauffage, production d'électricité, vente de biochar) et les inconvénients (perte de l'azote, émissions de gaz à effet de serre et polluants atmosphériques (NO_x), concentration en métaux lourds dans le biochar).

Afin d'évaluer pleinement l'intérêt de ce process, la réalisation d'une étude économique plus complète sur l'utilisation de la pyrolyse à l'échelle d'une ferme avicole doit être menée en chiffrant l'ensemble des coûts d'investissement (pyrolyseur et son installation, dispositif pour diffuser la chaleur dans le scénario 1, cogénération dans le scénario 2), et ceux d'entretien et de maintenance de l'ensemble du process, ce qui permettrait d'estimer un temps de retour sur investissement. Le scénario 2 devra également être approfondi pour prendre en compte une possible récupération de chaleur sur la cogénération dans le but de chauffer les bâtiments ainsi que les gains associés à une revente d'électricité. Enfin, la possibilité d'utiliser l'énergie des gaz incondensables pour maintenir en température le four devra également être étudiée. Sur le plan environnemental, il conviendrait d'approfondir

la composition des pertes gazeuses propres à la pyrolyse de fumier de volaille (quantités et proportions des différentes formes chimiques libérées).

En complément à cette présente étude, un travail a été mené concernant les effets agronomiques du biochar en tant que fertilisant phosphaté. Les essais ont montré une capacité de remplacement de l'engrais minéral de synthèse de 50 % vérifié avec un apport de 200 kg de P_2O_5 /ha (Moreira et al. 2023).

BIBLIOGRAPHIE

- Amand G., Bonnouvrier A., Chevalier D., Dezat E., Nicolas C., Ponchant P., 2008. Les consommations d'énergie dans les bâtiments avicoles. Noyal-sur-Vilaine. pp25.
- Baniasadi M., Tugnoli A., Roberto C., Torri C., Fabbri D., Cozzani V., 2016. Waste to energy valorization of poultry litter by slow pyrolysis, Renewable Energy, (90) 458-468.
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., Park, Y.-K., 2016. Production and utilization of biochar. Journal of Industrial and Engineering Chemistry (40), 1-15.
- Crombie K., Mašek O., 2014. Investigating the potential for a self-sustaining slow pyrolysis system under varying operating conditions, Bioresource Technology, (162), 148–156.
- Dezat E., Goheir-Austerlitz D., 2020. Gestion des litières et du fumier chez les aviculteurs bretons, Chambres d'agriculture de Bretagne. 1-8.

Dezat E., Ruch M., Guillou G., Roffi S., Aulanier F., Serrurier F., Vannier S., 2021. Résultats de l'enquête avicole. Chambres d'agriculture de Bretagne, Rennes. pp40.

Equipe Eau et Agriculture, Chambre d'agriculture d'Alsace., 2016. Bien valoriser les effluents d'élevage, Guide technique, 1-48.

Gaunt JL., Lehmann L., 2008. Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production., Environ. Sci. Technol (42), 4152–4158.

Ginebra M., Muñoz C., Calvelo-Pereira R., Doussoulin M., Zagal E., 2022. Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment, (806), 150465.

Glaser B., Wiedner K., Seelig S., Schmidt H-P, Gerber H., 2015. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers, Agronomy for Sustainable Development, (35), 667-678.

Gonzalez R., Gonzalez J., Rosas JG., Smith R., Gomez X., 2020. Biochar and Energy Production: Valorizing Swine Manure through Coupling Co-digestion and Pyrolysis, Journal of carbon research, (6), 1-20.

Jirka S., Tomlinson T., 2015. State of the Biochar Industry, A Survey of Commercial Activity in the Biochar Sector, International Biochar Initiative, 1-77.

Lombaert V., 1992. Micro-cultures methode Chaminade, (5) 35-51.

Moloodi S., Tzanetakis T., Nguyen., Zarghami-Tehran B., Khan M., Thomson MJ., 2012. Fuel property effects on the combustion performance and emissions of hardwood-derived fast pyrolysis liquid-ethanol blends in a swirl burner, Energy Fuels (26) 5452-5461.

Moreira M., Roffi S., Blanchart PB., Preud'Homme M., Munier C., Thevenin N., 2023. Intérêts agronomiques du biochar issu de la pyrolyse lente de fumier de volaille, Assises Nationales des biochars, Rennes, communication orale.

Paustian K., Lehmann J., Ogle S., Reay D., Robertson G.P., Smith P., 2016. Climate-smart soils, Nature, (532), 49–57.

Rose TJ., Scheffe C., Weng Z., 2019. Phosphorus speciation and bioavailability in diverse biochars, Plant and Soil, (443), 233–244.

Schaffer S., Pröll T., Al Afif R., Pfeifer C., 2019. A mass- and energy balance-based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon storage, Biomass and Bioenergy, (120), 281–290.

Schwilch G., Röthlisberger R., Zimmermann M., Keusch R., 2023. Utilisation de charbon vegetal dans l'agriculture en Suisse, risques et opportunités pour les sols et le climat. Cercle Sol Agri, Office federal de l'environnement et Office federal de l'agriculture. pp15.

Yarrow D., 2015. Biochar in Poultry Farming unexpected uses for biocarbon. Carbon-smart tools for Midwest agriculture. Environmental Science, Agricultural and Food Sciences. 1-5.

Tableau 1. Concentrations des éléments avant et après pyrolyse.

Eléments	Unités	Fumiers de volailles	Biochars	Rapport Biochars/fumiers
MS	g/100 g de MB	81,58 ± 11,80 (n=5)	98,28 ± 1,91 (n=5)	1.2
MO		69,00 ± 9,76 (n=5)	62,02 ± 4,42 (n=5)	0.9
C total		36,09 ± 1,06 (n=3)	55,70 (n=4)	1.5
C orga		34,52 ± 4,86 (n=5)	35,00 ± 10,90 (n=5)	1.0
N total		3,04 ± 0,58 (n=5)	2,53 ± 0,42 (n=5)	0.8
N organique		2,64 ± 0,58 (n=4)	2,65 ± 0,39 (n=4)	1.0
N-NH4		0,32 ± 0,08 (n=5)	<0,1 (n=5)	
N-uréique		0,02 ± 0,01 (n=4)	<0,1 (n=4)	
N-NO3		<0,02 (n=4)	<0,02 (n=1)	
K2O		2,79 ± 0,25 (n=5)	9,24 ± 1,21 (n=5)	3.3
P2O5		2,37 ± 0,60 (n=5)	5,69 ± 0,53 (n=5)	2.4
Cu	mg/kg de MS	55,02 ± 32,29 (n=4)	157,43 ± 9,25 (n=4)	2.9
Zn		392,65 ± 72,88 (n=4)	897,64 ± 149,50 (n=4)	2.3

Tableau 2. Bilan de masse de la pyrolyse

	Masse (kg)	C orga (kg)	N (kg)	P (kg)	K (kg)	S (kg)
Fumiers de volailles	120 (n = 1)	38,90 ± 7,13 (n = 5)	3,29 ± 0,73 (n = 5)	1,1 ± 0,26 (n = 5)	2,72 ± 0,3 (n = 5)	0,31 ± 0,34 (n = 4)
Produits sortants						
Biochar	26,6 (n = 1)	9,31 ± 2,9 (n = 5)	0,67 ± 0,11 (n = 5)	0,64 ± 0,03 (n = 5)	2,04 ± 0,27 (n = 5)	0,19 ± 0,02 (n = 5)
Taux de conservation (%)	22,2 (n = 1)	23,9 (n = 5)	20,4 (n = 5)	58,2 (n = 5)	75,0 (n = 5)	61,3 (n = 5)
Gaz (calcul)	93,4 (n = 1)	29,59 ± 2,9 (n = 5)	2,62 ± 0,11 (n = 5)	0,46 ± 0,03 (n = 5)	0,68 ± 0,27 (n = 5)	0,12 ± 0,02 (n = 5)
Taux de pertes (%)	77,8 (n = 1)	76,1 (n = 5)	79,6 (n = 5)	41,8 (n = 5)	25,0 (n = 5)	38,7 (n = 5)

Tableau 3. Tableau de calcul de la consommation électrique pour traiter une tonne de fientes de volailles (pour la montée en température (1) + durant le traitement thermique (2) + total (3))

PYROLYSE	Puissance (en kW)		Taux de fonctionnement (1)	Taux de fonctionnement (2)	Energie consommée (en kWh/h) (1)	Energie consommée (en kWh/h) (2)	Energie consommée (en kWh/h) (3)
Homogénéisation/mélange du fumier	0,13		30 %	30 %	0,039	0,039	
Vis de dosage	0,13		50 %	50 %	0,065	0,065	
Vis de pyrolyse	0,09		50 %	50 %	0,045	0,045	
Fonctionnement du four de pyrolyse (montée en température)	15,00		100 %	0 %	15,000	0,000	
Fonctionnement du four de pyrolyse (durant le traitement thermique)	15,00		0 %	10 %	0,000	1,500	
Evacuation des gaz et de la chaleur de pyrolyse	0,07		100 %	100 %	0,068	0,068	
Vis de refroidissement et d'évacuation du biochar produit	0,55		100 %	100 %	0,550	0,550	
Temps de fonctionnement (h) :	1,00 (1)	100,00 (2)			15,767	226,700	242,467

Tableau 4. Résultats des analyses par ATG des biochars produits par pyrolyse lente.

Températures	Humidité (en %)	MV (en %)	CF (en %)	Cendres (en %)	Biochar (en % de la masse sèche initiale)
550°C	4,1	21,9	51,4	22,5	38,8
700°C	2,2	11,0	54,1	32,6	34,3

Tableau 5. Bilan de masse à l'échelle d'une exploitation type de production de poulet de chair (poulet lourd) sur 2200 m² (422 t de fumier/an)

	Masse (kg)	C orga (t)	N (t)	P (t)	K (t)	S (t)
Fumiers de volailles	422 (n = 1)	136,8 ± 25,07 (n = 5)	11,57 ± 2,57 (n = 5)	3,87 ± 0,91 (n = 5)	9,57 ± 1,06 (n = 5)	1,09 ± 1,30 (n = 4)
Produits sortants						
Biochar	93,5 (n = 1)	32,74 ± 10,20 (n = 5)	2,36 ± 0,39 (n = 5)	2,25 ± 0,11 (n = 5)	7,17 ± 0,95 (n = 5)	0,67 ± 0,07 (n = 5)
Taux de conservation (%)	22,2 (n = 1)	23,9 (n = 5)	20,4 (n = 5)	58,2 (n = 5)	75,0 (n = 5)	61,3 (n = 5)
Gaz (calcul)	328,5 (n = 1)	104,1 ± 10,20 (n = 5)	9,2 ± 0,39 (n = 5)	1,6 ± 0,11 (n = 5)	2,4 ± 0,95 (n = 5)	0,4 ± 0,07 (n = 5)
Taux de pertes (%)	77,8 (n = 1)	76,1 (n = 5)	79,6 (n = 5)	41,8 (n = 5)	25,0 (n = 5)	38,7 (n = 5)

Tableau 6. Bilan annuel énergétique et économique selon les 2 scénarios à l'échelle de l'exploitation type de production de poulet de chair (poulet lourd) sur 2200 m² (422 t de fumier/an)

Poste	Scénario 1 : Valorisation des gaz de pyrolyse en production de chaleur	Scénario 2 : Valorisation des gaz de pyrolyse en production d'électricité
Besoin en chaleur de l'exploitation (en kWh)	203 928	203 928
Consommation d'électricité (exploitation et pyrolyse) (en kWh)	148 505	148 505
Production de chaleur (en kWh PCS)	2 189 205	Non quantifié
Production d'électricité à partir des gaz (en kWh)	-	195 149
Charges en gaz (en €)	10 981	10 981
Charges en électricité (en €)	20 419	20 419
Economies de gaz réalisables (en €)	10 981	Non quantifié
Economies d'électricité réalisable (en €)	-	20 419
Produit de la vente du biochar (en €)	46 842	46 842
Economie réalisée par l'exploitation (en €)	26 423	35 861

