Les propriétés antioxydantes (polyphénols, flavonoids, activité de piégeage de radicaux) des feuilles de chanvre fertilisé au digestat diminuent :

https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5

Effet du digestat agricole sur les propriétés antioxydantes et l'activité antimicrobienne des feuilles de chanvre (*Cannabis sativa*)

Résumé

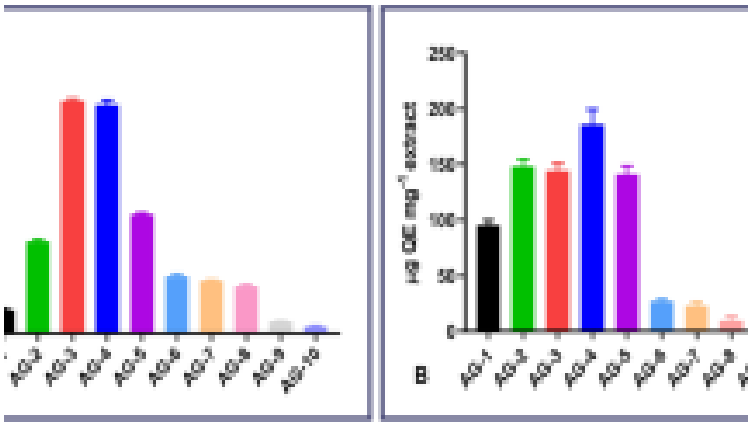
La présente étude visait à étudier l'influence de l'engrais appliqué (digestat agricole) sur les propriétés antioxydantes et l'activité antimicrobienne des feuilles du cultivar de chanvre 'Futura75', précieux dans le processus nutritionnel. Une tentative a également été faite pour établir des corrélations entre les propriétés antioxydantes et l'activité antimicrobienne des feuilles et les doses d'engrais.

La teneur totale en polyphénols (TPC) et l'activité de piégeage des radicaux libres ont été déterminées au moyen de la méthode spectrophotométrique, tandis que le profil polyphénolique a été identifié par chromatographie liquide à haute performance (HPLC).

Des analyses microbiologiques ont été réalisées en utilisant les souches d'essai suivantes : *Staphylococcus aureus* , *Pseudomonas aeruginosa* , *Candida albicans* et *Aspergillus niger* .

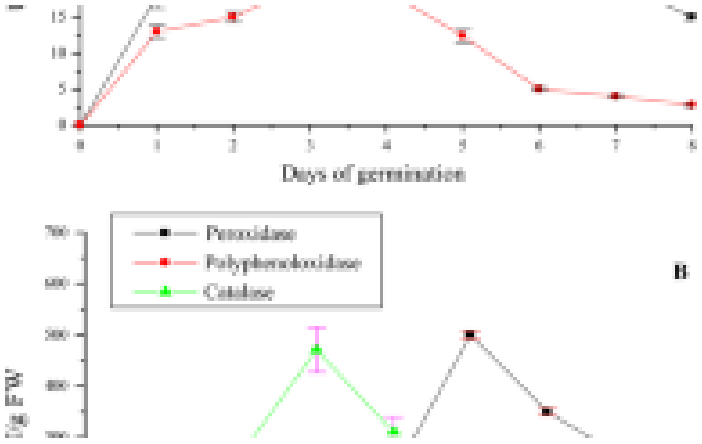
Les teneurs les plus élevées en polyphénols et en flavonoïdes et la plus forte activité de piégeage des radicaux DPPH ont été déterminées dans les feuilles de chanvre au début de la phase de croissance (date de récolte I) après application du digestat à une dose de 30 L (soit 35,84 mg·GAE·g $^{-1}$ DW, 59,30 mg QE·g $^{-1}$ DW et 78,36 mmol Trolox·kg $^{-1}$, respectivement).

Le digestat appliqué a également affecté l'activité antimicrobienne des feuilles de chanvre lorsqu'il a été appliqué à des doses de 30 L [18–37 %] et 50 L [15–30 %], provoquant une augmentation tangible des zones d'inhibition de la croissance, en particulier, de *Candida albicans* dans les feuilles récoltées aux termes I, II et III.



Études in vitro antioxydantes, anticancéreuses et in silico de l'extrait de feuille enrichi en polyphénols d' *Asystasia gangetica*

Article en libre accès17 novembre 2024



Amélioration du profil phénolique et des activités biologiques des pousses de moutarde sauvage

Article en libre accès08 mai 2024

Introduction

Une procédure de plus en plus courante déployée dans toute l'Europe dans le secteur agricole est l'utilisation de produits de fermentation comme engrais organiques précieux, car ils réduisent efficacement les pertes d'azote par rapport aux engrais minéraux, lorsqu'ils sont appliqués aux mêmes doses 1 .

On suppose que la restitution des composants accumulés dans la matière de l'usine de biogaz au sol est nécessaire non seulement d'un point de vue économique, mais aussi du point de vue du maintien et de la restauration de l'homéostasie écologique 2 .

L'utilisation de tels engrais peut exercer des effets multiformes sur les changements dans la mobilité des nutriments dans le sol et la capacité des plantes à les absorber à partir de l'environnement 3 .

Un substrat correctement préparé pour la culture des plantes fournira les nutriments nécessaires ainsi que les macroéléments et les microéléments, affectant le taux de développement des plantes et la taille du rendement des cultures.

Un facteur clé pour assurer une croissance saine, une floraison abondante et une excellente qualité du produit final – le chanvre – est d'assurer des conditions de croissance équilibrées grâce à une fertilisation adaptée.

Ces dernières années, la superficie consacrée à la culture du chanvre dans l'UE a augmenté de manière significative, passant de 20 540 hectares (ha) en 2015 à 33 020 ha en 2022. Au cours de la même période, la production de chanvre est passée de 97 130 tonnes à 179 020 tonnes (soit une augmentation de 84,3 %).

Ces dernières années, on a également constaté un intérêt croissant pour la recherche sur l'utilisation potentielle du chanvre industriel dans l'alimentation et les nutraceutiques 4 . Le chanvre industriel est défini comme une herbe annuelle du genre Cannabis 5 , dont les fleurs,

les graines, les tiges, les feuilles et les racines contiennent moins de 0,2 à 0,3 % de tétrahydrocannabinol (THC).

Ce niveau de THC a conduit à une gamme diversifiée de produits qui peuvent être produits légalement à partir de cette plante et enregistrés 6 .

Les feuilles, les graines et l'huile de chanvre sont utilisées dans l'industrie pour leur teneur en substances bioactives, qui présentent de multiples propriétés biologiques 7 , telles que des activités antioxydantes et phytochimiques.

Les principaux facteurs influençant l'activité antioxydante sont la présence de composés phénoliques ou polyphénoliques, dont la stabilité dépend des conditions de transformation. Les polyphénols et les flavonoïdes du chanvre présentent de nombreux bienfaits pour la santé, ce qui rend cette plante encore plus précieuse en médecine naturelle.

Outre leur pigmentation et leur influence sur l'arôme et le goût, ils sont également impliqués dans des effets protecteurs contre des maladies telles que le diabète, le cancer et l'ostéoporose 8 , 9 .

De plus, certains d'entre eux peuvent être efficaces dans la prévention des hépatites virales, du paludisme, des maladies auto-immunes et des maladies inflammatoires en inhibant la kinase 8 .

L'activité antioxydante des composés polyphénoliques est déterminée par leur capacité à piéger les radicaux libres et leur potentiel réducteur de fer.

Les polyphénols représentent l'un des groupes de composés les plus importants présents dans *C. sativa* , comme les flavonoïdes, les phénolamides et les lignanamides, qui sont des métabolites spécifiques de cette plante.

De plus, ils jouent divers rôles dans les mécanismes de défense des plantes, notamment par leur action antioxydante, qui empêche la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ERO) 10 , 11 .

Chez l'homme, les polyphénols présentent des bienfaits pour la santé grâce à leurs effets cardioprotecteurs et chimioprotecteurs 12 , 13 , ainsi que des propriétés sédatives, antispasmodiques, analgésiques et bien d'autres, notamment la prévention des migraines, de l'asthme et des hémorroïdes, et la lutte contre les symptômes de la photophobie 10 , 14 .

De plus, la présence de nombreux composants actifs dans la plante de chanvre peut augmenter le rythme cardiaque, réduire la pression artérielle et stimuler l'appétit 14 .

Selon les données de la littérature, les feuilles de chanvre industriel contiennent 89 g kg^{-1} d'extrait d'éthanol (EE), 212 g kg^{-1} de cendres et 447 g kg^{-1} de fibres alimentaires neutres (NDF) 15 , 16 .

Comme l'ont affirmé Brugman et al. 17 , la surutilisation de xénobiotiques dans les cultures agricoles, observée parallèlement à l'émergence de souches résistantes aux antibiotiques et aux pesticides en agriculture et en médecine, peut affecter la capacité de l'hôte à interagir correctement avec le microbiote. Selon Langezaal et al., 18 , un rapport cannabidiol/tétrahydrocannabidiol plus élevé entraîne un effet antimicrobien plus fort. Comparé au nombre d'études sur le microbiote humain, il existe un manque de recherches portant sur la culture agricole du chanvre. Cela peut, vraisemblablement, être dû au fait que le microbiote des

micro-organismes agricoles (champignons, bactéries) est influencé par les espèces et les génotypes des plantes, les stades de développement des plantes, le type de sol et les conditions environnementales.

Leurs interactions avec les plantes en tant qu'hôtes peuvent entraîner des effets bénéfiques, neutres ou néfastes sur la composition chimique des plantes 19 .

Les champignons présents dans les tissus du chanvre sous forme d'entités de surface (épiphytes) ou d'endophytes internes sont capables de produire des métabolites secondaires toxiques (mycotoxines), dont plusieurs sont pathogènes pour l'homme.

La situation actuelle et le manque d'études systématiques sur les propriétés multidimensionnelles des feuilles de chanvre nous ont incités à étudier l'effet de l'utilisation d'engrais naturels (digestat agricole) sur leurs propriétés chimiques (antioxydantes) et microbiologiques. L'étude a également impliqué la détermination de la composition chimique immédiate (protéines, cendres, eau) ; des teneurs en acides aminés et en composés phytochimiques ; de la composition en polyphénols et flavonoïdes totaux ainsi que de l'activité antioxydante globale (DPPH $^{\bullet}$) des feuilles de chanvre.

Dans la phase finale de l'étude, l'activité antimicrobienne des extraits de feuilles de chanvre a été examinée en fonction de la dose de digestat appliquée afin de déterminer leur effet sur les bactéries du groupe de *Staphylococcus aureus* , *Pseudomonas aeruginosa* , *Candida albicans* et *Aspergillus niger* .

Matériels et méthodes

Matériel végétal

Le matériel étudié était constitué de feuilles de *Cannabis sativa* L. du cultivar « Futura75 ». Les graines de ce cultivar ont été achetées auprès de la société Polishemp Sp. z oo par la station expérimentale de Czesławice, rattachée à l'Université des sciences de la vie de Lublin, en Pologne (51.304595 22.252620 - DMS : 51º 18' 16.542" N 22º 15' 9.432" E). Les caractéristiques du cultivar étaient les suivantes : type – monoïque, période de croissance – 140 jours, hauteur – 250–350 cm, teneur en huile – 28–30 %, teneur en fibres – 30–35 %, rendement en graines par 1 ha – 700–900 kg, biomasse par 1 ha – 10-12 t et poids de 1 000 graines – 16–18 g, comme déclaré par le producteur sur l'étiquette.

Les graines ont été semées durant la première décade de mai et récoltées durant la troisième décade de septembre 2022. Des échantillons de feuilles (n = 7 en trois répétitions) ont été prélevés sur chaque parcelle où quatre variantes de fertilisation ont été appliquées. Les échantillons ont été collectés au cours des quatre derniers mois de croissance du chanvre, le premier échantillon étant prélevé à la mi-juin (BBCH 5), le deuxième à la mi-juillet (BBCH 6), le troisième à la mi-août (BBCH 7) et le quatrième à la mi-septembre (BBCH 8).

Schéma de l'expérience sur le terrain

L'expérience sur le terrain comportait 4 variantes différant par la dose de digestat :

- Variante I – dose totale de digestat de 25 000 Lha $^{-1}$ (dose I – 12 500 Lha $^{-1}$, II – 12 500 Lha $^{-1}$);

- Variante II – dose totale de digestat 37 500 Lha $^{-1}$ (dose I – 18 750 Lha $^{-1}$, II – 18 750 Lha $^{-1}$) ;
- Variante III – dose totale de digestat 50 000 Lha $^{-1}$ (dose I – 25 000 Lha $^{-1}$, II – 25 000 Lha $^{-1}$) ;
- Variante IV – parcelle témoin non fertilisée avec le digestat.

Les doses de digestat ci-dessus ont été établies sur la base de l'analyse d'échantillons de sol. Afin de faciliter la description des résultats, les différentes variantes expérimentales ont été désignées comme suit : témoin – pour la variante témoin, 20 L pour une dose de digestat de 25 000 Lha $^{-1}$; 30 L pour une dose de digestat de 37 500 Lha $^{-1}$; et 50 L pour une dose de digestat de 50 000 Lha $^{-1}$.

La fertilisation avec le digestat a été réalisée au printemps à deux stades de développement foliaire :

- la première dose au stade BBCH 15 (la cinquième paire de feuilles – feuilles pliées),
- la deuxième dose au stade BBCH 19 (la neuvième paire de feuilles – feuilles pliées).

Le digestat provient d'une usine de production de biogaz située à Piaski (province de Lublin, Pologne). Il est composé des composants suivants : ensilage de maïs (70 %), pulpe de betterave sucrière (15 %), marc de fruits (5 %), déchets laitiers (5 %) et fumier (5 %).

Avant utilisation, le digestat a été analysé pour déterminer sa concentration en macroéléments et en métaux lourds (tableau 1). Le pH du digestat utilisé pour la culture du chanvre variait de 6,5 à 7,00 et était similaire à celui du lisier de bovins (pH = 7,90). Nous avons utilisé du fumier bovin naturel.

Analyse du digestat

Les concentrations de macroéléments, de métaux lourds, d'azote et de pH dans le digestat ont été analysées selon la norme polonaise PN-EN ISO/IEC 17,025: 2005 20 , et les résultats respectifs sont présentés dans les tableaux 1 et 2 .

Tableau 1 Concentrations de macroéléments et de métaux lourds sélectionnés dans le digestat.

Table pleine grandeur : https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/1

Tableau 2 Acidité et teneurs en macroéléments dans le sol traité avec des doses de digestat de 25 000 L, 37 500 L et 50 000 L·ha $^{-1}$.

Table pleine grandeur : https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/2

Composition approximative des feuilles de chanvre

Les teneurs en eau, cendres, protéines, matières grasses brutes et fibres brutes des feuilles de chanvre ont été déterminées selon les méthodes standard de l'AOAC 21 . Les valeurs moyennes de trois déterminations ont été converties en % de la teneur en matière sèche.

Détermination de la teneur en phénols non flavonoïdes (NFE)

La teneur en polyphénols totaux (TP) a été déterminée à l'aide du réactif de Folin-Ciocalteu (FC) selon la méthodologie proposée par Singleton & Rossi 22 et exprimée en mg d'équivalents d'acide gallique (GAE) par g de matière sèche (MS). À son tour, la teneur en phénols non flavonoïdes (NFE) a été déterminée à l'aide du réactif FC après élimination des phénols flavonoïdes (FP) au moyen de formaldéhyde, selon la méthode de Kramling & Singleton 23 et exprimée en µg GAE·g^{-1} MS. La teneur en FP a été calculée comme la différence entre les teneurs en TP et en NFP et exprimée en µg GAE·g^{-1} MS.

Extraction de polyphénols

L'extraction des polyphénols a été réalisée selon la procédure décrite par Calzolari et al., 24 avec quelques modifications mineures. Un échantillon de feuilles de chanvre (100 mg) a été versé avec 15 mL de méthanol, et le mélange a été vortexé pendant 5 min, puis soniqué dans l'obscurité à une température de 4 °C pendant 30 min. Ensuite, le mélange a été centrifugé à 4 000 × *g* à 4 °C pendant 10 min, à l'aide d'une centrifugeuse OHAUS FC5513 Frontier Micro (OHAUS Europe GmbH, Suisse). Les surnageants résultants ont été combinés, filtrés à travers un filtre seringue de 0,2 µm (26 mm, membrane RC, Phenomenex, CastelMaggiore, Italie), et versés dans un flacon chromatographique.

Détermination du profil polyphénolique par la méthode HPLC

L'analyse des composés polyphénoliques a été réalisée selon la méthode décrite par Wang et al. 25 avec quelques modifications mineures. Les polyphénols ont été séparés au moyen d'un chromatographe Flexar avec un détecteur UV-Vis (Perkin-Elmer, USA), en utilisant une colonne Synergi Fusion RP-80 A 200 × 4,6 mm (4 µm) Phenomenex (Torrance, USA), thermostatée à une température de 30 ºC.

Une solution à 80 % d'acétonitrile dans 4,5 % d'acide formique (réactif A) et 2,5 % d'acide acétique (réactif B) a été utilisée comme éluant, à un débit de 1 mL min^{-1} , selon le gradient suivant : la concentration en réactif A a été augmentée linéairement de 0 à 15 % de la minute 0 à la minute 7, puis à 20 % de la minute 8 à la minute 15, et jusqu'à 100 % de la minute 16 jusqu'à la fin de l'analyse.

Après 10 min d'élution de la colonne à 100 % de concentration de réactif A et 0 % de concentration de réactif B, la concentration de la solution A a été réduite à 0 % afin de stabiliser la colonne en 10 min, jusqu'à l'injection successive de l'échantillon. Pendant l'analyse, les solutions ont été dégazées dans un appareil Merc.

L'absorbance des échantillons a été enregistrée à : λ = 320 nm pour les acides phénoliques, λ = 340 nm pour les flavones, λ = 360 nm pour les flavonols et λ = 520 nm pour les anthocyanes. Les composés ont été identifiés grâce à leurs spectres compris entre 200 et 600 nm et à la comparaison de leurs temps de rétention avec ceux des étalons respectifs. Les résultats sont exprimés en mg100 g^{-1} échantillon de matière sèche.

Détermination de la teneur totale en phénol

La teneur totale en phénol a été déterminée selon la méthode de Folin-Ciocalteu décrite par Singleton et Rossi 22 , avec quelques modifications mineures. Une partie de l'extrait (125 µL) a été mélangée à 500 µL d'eau déionisée, puis 125 µL du réactif de Folin-Ciocalteu ont été ajoutés

au mélange, qui a ensuite été incubé à température ambiante pendant 6 min. Ensuite, 1,25 ml d'une solution de carbonate de sodium à 7,5 % et 1 ml d'eau déionisée ont été ajoutés au mélange, qui a ensuite été incubé dans l'obscurité pendant 90 min. Ensuite, l'absorbance de l'échantillon a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-2600i (Shimadzu, Japon). Les résultats des déterminations sont exprimés en mg GAE·g^{-1} échantillon.

Détermination de la teneur totale en flavonoïdes

La teneur totale en flavonoïdes dans les extraits a été déterminée selon la procédure décrite par Zhishen et al., 26 , avec quelques modifications mineures. Une portion d'extrait (1 ml) a été mélangée avec 4 ml d'eau distillée et 0,3 ml d'une solution de $NaNO_2$ à 5 % . Après 5 min, 0,3 ml d'une solution d'$AlCl_3$ H_2O à 10 % a été ajoutée au mélange, suivie de 2 ml de NaOH 1 M et de 2,4 ml d'eau distillée ajoutés après 1 min. Le mélange résultant a été soigneusement mélangé et l'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 510 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV2600i (Shimadzu, Japon). Les résultats des déterminations sont exprimés en mg QE·g^{-1} .

Détermination des propriétés antioxydantes dans le dosage DPPH

L'activité de piégeage des radicaux libres a été déterminée dans l'extrait de feuille avec la méthode de Brand-Williams et al., 27 , après quelques modifications mineures. Afin d'obtenir une solution mère du radical DPPH, un étalon DPPH (4 mg dans 10 ml) a été dilué avec du méthanol jusqu'à ce que son absorbance mesurée à une longueur d'onde de 517 nm atteigne 0,90 (± 0,01). Ensuite, 200 µL de l'extrait de feuille de chanvre ont été ajoutés à 1 ml d'une solution mère de DPPH .

L'échantillon résultant a été soigneusement mélangé et la chute d'absorbance a été mesurée après 10 min à une longueur d'onde de 517 nm, à l'aide d'un spectrophotomètre UV-2600i (Shimadzu, Japon). Les résultats des déterminations sont exprimés en mmol d'équivalents Trolox kg^{-1} échantillon.

Analyse des acides aminés

La teneur en acides aminés des feuilles de chanvre a été déterminée à l'aide d'un analyseur d'acides aminés AAA-500 (INGOS, Tchéquie). La procédure analytique était conforme aux recommandations du fabricant de l'appareil. L'échantillon a été hydrolysé dans du HCl 6 M à une température de 110 °C pendant 24 h.

Après refroidissement, filtration et rinçage, l'hydrolysat a été évaporé sous vide et le résidu sec a été dissous dans un tampon (pH = 2,2). L'échantillon préparé a été utilisé pour l'analyse par la méthode à la ninhydrine, avec des tampons de pH 2,6, 3,0, 4,25 et 7,9. La solution de ninhydrine a été tamponnée avec un tampon de pH 5,5. Les analyses ont été réalisées sur une colonne de 370 mm de long remplie d'Ostion ANB INGOS ionex (Tchéquie).

La température de la colonne était de 55 à 74 °C et celle du réacteur de 120 °C. Pour déterminer les acides aminés soufrés, la méthionine et la cystéine, une hydrolyse oxydative a été réalisée à l'aide d'un mélange d'acide formique et de peroxyde d'hydrogène (9:1), à une température de 110 °C, pendant 24 h.

L'échantillon a été refroidi et manipulé comme lors de l'hydrolyse acide, dans les conditions suivantes : tampons à pH 2,6 et 3,0, température de la colonne de 60 °C et température du réacteur de 120 °C. Les acides aminés ont été analysés en trois répétitions.

Activité antimicrobienne des extraits de feuilles de chanvre

Les souches suivantes ont été utilisées comme micro-organismes d'essai : *Staphylococcus aureus* ATCC ® 33,591, *Pseudomonas aeruginosa* WDCM 00024 ATCC ® 10,145, *Candida albicans* ATCC ® 2091 et *Aspergillus niger* ATCC ® 6275. Toutes les souches ont été achetées auprès de la société Pol-Aura Odczynniki Chemiczne (Pologne). L'activité antibactérienne des extraits a été déterminée par la méthode de diffusion sur disque [28, 29] .

Les souches bactériennes issues d'une culture de 24 heures, à raison de $1{,}0 \cdot 10^{5}$ cfu·mL $^{-1}$, ont été ensemencées à raison de 0,1 ml sur des boîtes de Petri pour une culture submergée et versées avec un milieu de culture Mueller-Hinton. Les champignons ont été cultivés à 25 °C sur gélose dextrose de pomme de terre (PDA) (OXOID, Hampshire, Angleterre). Le milieu inoculé a été incubé à 25 °C pendant 24 h pour les levures et pendant trois à cinq jours pour *Aspergillus niger* .

Une fois le milieu solidifié, des disques stériles (6 mm de diamètre) ont été placés à sa surface. Des disques de papier filtre contenant 5 mg de gentamicine ont servi de témoins positifs. Ensuite, 20 µL de chaque extrait de feuille de chanvre ont été injectés sur les disques, et de l'eau distillée a été injectée sur un disque comme témoin.

Les boîtes ont été incubées à 37 ± 1 °C pendant 24 h (bactéries) ou 5 jours (champignons). Les zones d'inhibition de croissance ont été mesurées à l'aide d'un pied à coulisse Verniera. Les résultats sont fournis, après soustraction du diamètre du disque et de la zone d'inhibition de croissance pour les échantillons témoins, en millimètres. Les déterminations ont été réalisées en 3 répétitions.

Analyse statistique

L'analyse statistique visait à déterminer l'effet de deux facteurs, à savoir la date de récolte des feuilles de chanvre et la dose de biofertilisant, sur les teneurs en polyphénols totaux, flavonoïdes, DPPH et fractions de polyphénols, ainsi que sur l'activité antimicrobienne de l'extrait de feuilles de chanvre.

Les résultats de l'étude ont été analysés à l'aide du logiciel Statistica 13 de StatSoft.

Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été réalisée afin de déterminer la significativité de l'impact des facteurs respectifs sur les valeurs analysées. La significativité des différences entre les valeurs moyennes a été établie par le test de Tukey.

Le seuil de signification adopté était $\alpha = 0{,}05$. Tous les tests et analyses ont été réalisés en 5 réplications. De plus, une analyse de corrélation de Pearson a été réalisée pour vérifier les corrélations entre les teneurs des variables analysées.

Résultats et discussion

Analyse chimique immédiate

Les feuilles de chanvre fraîches constituent une excellente source de nutriments, notamment de puissants antioxydants, de protéines, de fibres brutes et de cendres. Le tableau 3 présente les

résultats de l'analyse chimique immédiate des feuilles de chanvre, notamment leur teneur en protéines brutes, fibres, cendres, eau et phénols totaux (NFE).

Dans le cas des échantillons témoins, la teneur en protéines des feuilles de chanvre a montré une tendance à la hausse, c'est-à-dire qu'elle a augmenté aux dates de récolte suivantes (II, III, IV) par rapport à la date de récolte I (22,80 %) de 4,72 % (23,88 %), 6,60 % (24,30 %) et 7,85 % (24,59 %), respectivement.

Les feuilles de la première date de récolte avaient une teneur en protéines plus élevée dans toutes les variantes de traitement du digestat par rapport à l'échantillon témoin. Dans le cas des dates de récolte II, III et IV, la teneur en protéines des feuilles avait tendance à diminuer à chaque dose de digestat appliquée par rapport au témoin respectif.

La teneur en fibres brutes déterminée pour les feuilles témoins à partir de la première date de récolte était de 18,89 %. À chaque date de récolte suivante, sa valeur a augmenté à la fois dans les échantillons témoins et dans les échantillons de toutes les variantes d'application du digestat. La teneur en fibres des feuilles témoins a augmenté de 1,19, 0,38 et 2,82 %. Après amendement du sol avec le digestat, les teneurs en fibres déterminées différaient selon la dose de digestat, la plus forte augmentation étant observée dans les feuilles à partir de la date de récolte II, atteignant 1,62 % pour une dose de digestat de 20 L, 2,97 % pour la dose de 30 L et 3,62 % pour la dose de 50 L, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur moyenne en phénol total (NFE) des feuilles de chanvre des variantes témoins variait de 19,17 à 19,30 % et présentait une tendance à la baisse par rapport à la première date de récolte (-2,44 %, -1,81 % et − 1,16 %). Dans les variantes expérimentales avec application de digestat à différentes doses, les plus fortes diminutions de la teneur en NFE ont été déterminées dans les feuilles récoltées aux dates III et IV. Considérant des doses particulières de digestat, la teneur en phénol total des feuilles de la date de récolte III était inférieure de 0,46 % (20 L), 0,42 % (30 L) et 0,41 % (50 L) par rapport à la teneur en NFE des feuilles témoins. Dans le cas de la date de récolte IV, les diminutions respectives étaient de 0,41, 0,62 et 0,62 %.

La teneur en cendres brutes (tableau 3) des feuilles de chanvre témoins variait de 11,06 à 11,72 % et, par rapport aux échantillons témoins de la date de récolte I, a montré une tendance à la baisse aux dates de récolte suivantes. À la date de récolte II, une diminution de la teneur en fibres brutes des feuilles a atteint 4,60 % par rapport à l'échantillon témoin récolté au terme I. Dans les feuilles des dates de récolte suivantes (III et IV), la teneur en fibres brutes a diminué de 5,26 et 5,60 %, respectivement. Des diminutions ont également été notées dans la teneur en cendres des feuilles récoltées au terme I après application du digestat à des doses de 30 L (-3,86 %) et 50 L (-4,26 %).

Parallèlement au développement des plants de chanvre, on a observé une diminution de la teneur en eau (tableau 3) de leurs feuilles. Pour les quatre dates de récolte des variantes témoins, elle variait de 6,67 à 6,83 %, et diminuait de 0,97, 0,19 et 3,56 % pour les feuilles récoltées aux dates II, III et IV, par rapport à celles récoltées à la date I.

Dans le cas de variantes expérimentales avec différentes doses de digestat, la teneur en eau des feuilles a augmenté lors de l'application du digestat à des doses de 20 L et 30 L pour les feuilles de la date de récolte II ainsi que lors de l'application du digestat à une dose de 30 L pour les feuilles récoltées au terme IV, par rapport à l'échantillon témoin, soit de 2,21 et 1,72 % (date de récolte II) et de 1,45 % (date de récolte IV).

L'analyse de corrélation de Pearson a démontré de fortes corrélations positives entre la date de récolte et la dose de digestat pour la teneur en protéines brutes (0,657) et la teneur en phénols totaux (NFE) (0,774). Une corrélation similaire a été trouvée pour la teneur en eau des feuilles de chanvre (0,533). De leur côté, la date de récolte et la dose de digestat ont été faiblement corrigées par la teneur en fibres brutes (0,347) et la teneur en cendres brutes (0,386) des feuilles de chanvre.

Tableau 3 Résultats de l'analyse de la composition chimique immédiate des feuilles de chanvre.

Table pleine grandeur https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/3

Analyse de la teneur en acides aminés des feuilles de chanvre

Le tableau 4 présente les résultats de la détermination de la teneur en acides aminés dans les feuilles de chanvre. La teneur en alanine des feuilles témoins variait de 3,90 à 3,97 (g 100 g^{-1} de protéines), sa teneur la plus élevée étant déterminée dans les feuilles témoins récoltées à la date I. Dans les feuilles des autres dates de récolte, la teneur en cet acide aminé était inférieure de 1,93, 1,43 et 1,51 %. Après l'application du digestat, la teneur en alanine a augmenté dans les feuilles de chanvre avec la croissance de la plante (dans les feuilles des dates de récolte suivantes), par rapport à la variante témoin, à l'exception des feuilles de la variante avec 50 L de digestat récoltées aux termes I et III, dans lesquelles cette teneur en acides aminés était inférieure de 0,67 et 3,32 % à celle des feuilles témoins.

La teneur en acide aspartique (tableau 4) déterminée dans les échantillons témoins a atteint 8,30, 8,37, 8,42 et 8,54 (g 100 g^{-1} protéine).

Ces résultats montrent une augmentation de sa teneur aux dates de récolte ultérieures des feuilles, soit de 0,76, 2,06 et 2,89 %, par rapport à celle déterminée dans les feuilles à partir de la date de récolte I.

L'amendement du sol avec du digestat a entraîné une diminution de la teneur en acide aspartique des feuilles récoltées aux termes II (1,71, 0,12, 1,79 %) et IV (3,71, 2,50, 4,17 %) pour chaque variante de dose. Aux dates de récolte I et III, une diminution de la teneur en cet acide aminé a été constatée dans les feuilles des variantes expérimentales avec application de 20 et 50 L de digestat, à savoir de 0,12 et 0,40 % ainsi que de 3,21 et 0,87 %, respectivement.

La teneur en arginine dans les feuilles témoins récoltées dans les termes suivants a atteint 4,21, 4,27, 4,30 et 4,31 (g 100 g^{-1} protéine) (Tableau 4). Ces résultats indiquent que la teneur en arginine a augmenté (+ 1,27, + 2,06, + 2,26 %) avec le développement de la plante. Après l'application du digestat, sa teneur a diminué dans les feuilles récoltées dans tous les termes analysés des variantes avec 20 et 50 L de digestat, c'est-à-dire de 0,79 et 0,63 % (date de récolte I), de 1,48 et 3,05 % (date de récolte II), de 0,47 et 4,19 % (date de récolte III) et de 1,31 et 7,73 % (date de récolte IV), par rapport au témoin.

La teneur en cystine dans les feuilles de chanvre témoins (tableau 4) variait de 0,75 à 0,79 (g 100 g^{-1} protéine), avec des valeurs supérieures de 4,41 et 1,32 % déterminées dans les feuilles récoltées aux termes III et IV, par rapport aux feuilles témoins récoltées au terme I. L'application de digestat pendant la croissance des plantes a contribué à une diminution de sa teneur de 0,88 % dans les feuilles de la variante 50 L récoltées au terme I.

À la date de récolte II, une diminution de la teneur en cystine a été notée dans les feuilles des variantes avec application de digestat à des doses de 30 et 50 L, soit de 4,87 et 2,65 %, par rapport aux feuilles témoins.

À son tour, dans le cas des feuilles récoltées au terme IV, l'application de digestat a entraîné une diminution de la teneur en cystine dans toutes les variantes expérimentales de 5,22, 9,57 et 3,48 % par rapport au témoin.

La teneur en acide glutamique variait dans les échantillons témoins entre 10,04 et 10,52 (g 100 g^{-1} de protéines) (Tableau 4). Les résultats obtenus indiquent que sa teneur a augmenté aux dates de récolte suivantes de 1,30, 1,56 et 4,78 %.

L'application de digestat a contribué à la diminution de sa teneur dans les feuilles récoltées aux termes suivants. Dans celles des dates de récolte II et III, sa teneur a diminué de 1,34 et 2,20 % et de 0,85 et 3,14 % dans les variantes expérimentales avec des doses de digestat de 20 et 50 L, par rapport à l'échantillon témoin, tandis que dans celles de la date de récolte IV, elle a diminué lors de l'amendement du sol avec toutes les doses de digestat, c'est-à-dire de 1,17, 0,10 et 9,10 %, par rapport au témoin.

La teneur en glycine (tableau 4) dans les feuilles témoins récoltées variait de 2,81 à 2,92 (g 100 g^{-1} protéine). Les résultats obtenus montrent que sa teneur a augmenté de 3,92, 3,56 et 3,44 % par rapport à l'échantillon témoin à partir de la date de récolte I. Après l'application du digestat, la teneur en glycine n'a augmenté que dans les feuilles récoltées au terme I.

Aux dates de récolte restantes, sa teneur a diminué après l'application du digestat à des doses de 20, 30 et 50 L de 0,34, 2,51 et 3,20 % dans les feuilles à partir de la date de récolte II ; de 1,15, 5,62 et 7,45 % dans celles à partir de la date de récolte III ainsi que de 1,95, 9,59 et 13,66 % dans les feuilles à partir de la date de récolte IV, respectivement.

La teneur en histidine dans les feuilles de chanvre témoins variait de 2,25 à 2,42 (g 100 g^{-1} protéine) (Tableau 4). Les résultats obtenus montrent que sa teneur augmente aux dates de récolte consécutives de 2,96, 3,11 et 7,25 % par rapport à la date de récolte I de l'échantillon témoin.

L'application de digestat a entraîné une diminution de la teneur en cet acide aminé dans les feuilles de toutes les variantes expérimentales (20, 30 et 50 L), à l'exception des feuilles de la variante de digestat de 30 L récoltées au terme III, dans lesquelles la teneur en histidine a légèrement augmenté (de 0,57 %) par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en isoleucine déterminée dans les feuilles témoins variait entre 3,27 et 3,47 (g 100 g^{-1} de protéines) et a été observée comme augmentant dans les feuilles des dates de récolte suivantes de 1,43, 5,91 et 4,07 % par rapport aux feuilles de la variante témoin récoltées au terme I.

L'amendement du sol avec les trois doses testées du digestat (20, 30, 50 L) a contribué à une augmentation de la teneur en cet acide aminé dans les feuilles récoltées au terme I, tandis que le traitement au digestat à 20 L dans les feuilles des termes de récolte consécutifs (II, III, IV). Les teneurs en isoleucine étaient plus élevées de 1,32 % (20, 30 L) et 2,14 % (50 L) ainsi que de 0,80 % et 1,15 % dans les feuilles de la date de récolte III et de 2,74 % dans celles de la date de récolte IV, par rapport au témoin.

La teneur en leucine dans les feuilles témoins variait de 7,15 à 7,31 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) et a été observée en diminution de 0,28 % dans les feuilles témoins à partir de la date de récolte II par rapport aux feuilles témoins à partir de la date de récolte I.

Dans les termes de récolte successifs, sa teneur a augmenté de 0,46 et 2,00 %, respectivement. Les résultats obtenus pour les variantes de traitement du digestat individuel ont montré, dans la plupart des cas, une diminution de la teneur en leucine, à l'exception des feuilles de la variante de digestat de 20 L récoltées aux termes II, III et IV, dans lesquelles la teneur en leucine était supérieure de 0,23, 0,83 et 0,73 %, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en lysine des feuilles témoins variait de 3,79 à 3,98 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) (tableau 4) et on a observé qu'elle augmentait avec le développement de la plante, avec des valeurs ultimes supérieures de 0,70, 3,35 et 5,11 % à celles des feuilles témoins récoltées au cours du terme I. Dans la plupart des cas, l'application de digestat a contribué à une augmentation de la teneur en cet acide aminé dans les feuilles de chanvre, à l'exception d'une dose de digestat de 50 L qui a réduit la teneur en lysine des feuilles récoltées aux termes II, III et IV de 1,22, 1,36 et 6,62 %, respectivement, par rapport aux échantillons témoins.

La teneur en méthionine dans les échantillons témoins était de 0,83, 0,84, 0,88 et 0,91 (g 100 g $^{-1}$ de protéines), et a montré une tendance à la hausse, augmentant de 2,02, 6,05 et 9,68 % par rapport aux feuilles témoins récoltées au terme I.

L'application de digestat à des doses de 20 et 50 L a entraîné une diminution de la teneur en méthionine dans les feuilles récoltées au terme I, soit de 2,82 et 3,23 %, respectivement, par rapport à l'échantillon témoin.

À la date de récolte II, une teneur plus faible de cet acide aminé a été déterminée dans les feuilles des variantes de digestat de 30 à 50 L (de 4,35 et 10,28 %, respectivement). À la date de récolte III, une diminution de la teneur en méthionine des feuilles a été notée uniquement lors de l'amendement du sol avec une dose de 50 L de digestat (de 8,37 % par rapport au témoin). Dans les feuilles du dernier trimestre de récolte, la teneur en méthionine a diminué de 0,37 et 11,03 % dans les variantes avec des doses de 30 et 50 L de digestat, par rapport aux échantillons témoins.

La teneur en proline dans les feuilles témoins a atteint 2,90 (dates de récolte I et II), 3,10 (date de récolte III) et 3,25 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) (date de récolte IV), ce qui signifie une augmentation de 6,79 et 12,07 % dans les feuilles témoins par rapport aux deux dernières périodes de récolte. Après l'application du digestat, la teneur en proline a diminué dans les feuilles de toutes les variantes expérimentales et de toutes les dates de récolte, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en phénylalanine dans les échantillons témoins ultérieurs a atteint 3,90, 3,92, 3,90 et 3,95 (g 100 g $^{-1}$ protéine). Après l'application du digestat pendant la croissance des plantes, la teneur en cet acide aminé a diminué dans la plupart des échantillons de feuilles, à l'exception de celles récoltées au terme I. La plus forte diminution de sa teneur a été observée pour les feuilles à partir de la date de récolte IV. Les valeurs obtenues étaient inférieures de 3,54, 5,06 et 7,17 %, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en sérine dans les échantillons témoins de feuilles de chanvre variait de 3,19 à 3,12 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) et montrait une tendance à la hausse avec la croissance de la plante. Après l'application du digestat aux doses analysées, sa teneur a augmenté dans les feuilles de

la plupart des variants, à l'exception de celles du variant 50 L récolté aux termes II, III et IV, dans lesquelles elle a diminué respectivement de 3,39, 0 L,85 et 6,96 %, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en thréonine dans les feuilles de chanvre témoins variait de 2,29 à 2,52 (g 100 g $^{-1}$ de protéines), et s'est avérée augmenter aux dates de récolte suivantes, de 3,05, 3,92 et 9,74 %. L'amendement du sol avec du digestat a contribué à la fois à une augmentation et à une diminution de la teneur en cet acide aminé dans les feuilles récoltées. Dans les feuilles récoltées au terme I, sa teneur a augmenté de 1,89, 0,58 et 0,44 % dans chaque variante de dose de digestat, respectivement ; dans celles du terme de récolte II, elle a augmenté de 2,26 et 0,14 % dans les feuilles des variantes de digestat de 20 à 30 L et a diminué de 4,23 % dans celles de la variante de digestat de 50 L, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en tyrosine dans les feuilles de chanvre témoins variait de 3,11 à 3,21 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) et présentait une tendance ascendante (0,21, 2,68 et 3,11 %) aux dates de récolte suivantes (tableau 4).

Après l'application du digestat aux doses analysées, on a observé une augmentation et une diminution de la teneur en tyrosine dans les feuilles de chanvre. Sa diminution de 0,21 % a été notée dans les feuilles de la date de récolte I et de la variante de digestat de 50 L. Dans les feuilles de la date de récolte II, sa diminution a été déterminée dans les variantes de digestat de 30 et 50 L (0,53 et 3,21 %), dans celles de la date de récolte III - dans la variante de digestat de 50 L (0,21 %), et dans celles récoltées au terme IV - dans les variantes de digestat de 30 et 50 L (0,10 et 2,18 %).

La teneur en valine variait de 3,95 dans les feuilles de chanvre témoins récoltées aux termes I et II à 4,15 (g 100 g $^{-1}$ de protéines) dans celles de la date de récolte IV (tableau 4). Elle était supérieure par rapport aux feuilles de la date de récolte I de 0,17 % dans les feuilles de la date de récolte II, de 2,96 % dans celles de la date de récolte III et de 5,07 % dans celles du dernier terme de récolte (IV). Après l'application du digestat, la teneur en valine a diminué dans les feuilles des variantes 30 et 50 L récoltées aux trois termes suivants (II, III, IV). Les valeurs déterminées étaient inférieures de 2,36 et 0,42 % (date de récolte II), de 3,45 et 2,79 % (date de récolte III) ainsi que de 6,11 et 5,55 % (date de récolte IV), par rapport à l'échantillon témoin.

L'analyse de corrélation de Pearson n'a montré aucune corrélation forte entre le contenu des acides aminés individuels et les dates de récolte des feuilles et les doses de digestat.

Tableau 4 Teneur en acides aminés des feuilles de chanvre.

Table pleine grandeur https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/4

Analyse des teneurs en polyphénols et en flavonoïdes et du potentiel de piégeage des radicaux DPPH dans les feuilles de chanvre

Le manque de travaux de littérature fournissant la composition complète des fractions polyphénoliques des feuilles de chanvre a incité à analyser leur contenu en fonction de l'amendement du sol avec différentes doses de digestat.

Il est à noter que les plantes de chanvre contiennent un grand nombre de composés bioactifs, comme par exemple les polyphénols, présentant des propriétés antioxydantes.

Parmi les nombreux composés, ces plantes contiennent également quelques antioxydants, comme les acides phénoliques et les flavonoïdes, ainsi que des protéines, qui représentent des composants précieux pour être utilisés comme additifs d'enrichissement alimentaire 30 . Les propriétés antioxydantes (PP) peuvent protéger les cellules humaines des dommages oxydatifs induits par les espèces réactives de l'oxygène (ROS) 31 · 32 .

Les mécanismes antioxydants contribuent également à l'induction d'autres activités biologiques, comme les activités anti-inflammatoires, anti-cancérigènes, antidiabétiques et antivirales 33 . Les flavonoïdes, et en particulier ceux du chanvre, peuvent jouer un rôle de marqueur géographique, indiquant que les feuilles provenant de diverses régions peuvent différer dans leur teneur en composés phytochimiques 34 .

La teneur totale en flavonoïdes des feuilles et des fleurs de chanvre peut représenter 2,5 % de leur matière sèche, alors qu'ils sont pratiquement absents dans les graines et les racines de chanvre 35 .

Le tableau 5 montre la teneur en polyphénols et en flavonoïdes ainsi que l'activité de piégeage des radicaux DPPH des feuilles de chanvre. La teneur en polyphénols des feuilles de chanvre témoins a diminué avec la croissance de la plante (tableau 5), de 15,06, 9,76 et 19,87 % dans les feuilles des dates de récolte II, III et IV par rapport aux feuilles témoins récoltées au terme I [33,51 mg(GAE)g $^{-1}$ DW]. Une tendance à la baisse a également été observée après un traitement au digestat de 50 L dans les feuilles récoltées aux termes I, II, III et IV, lorsque leur teneur en polyphénols a diminué de 10,11, 18,87, 1,78 et 4,54 %, par rapport à l'échantillon témoin. Les pertes les plus importantes en polyphénols ont été observées dans les feuilles récoltées au terme II dans toutes les variantes de traitement au digestat.

Ces valeurs déterminées pour les doses de digestat ultérieures étaient inférieures de 14,06, 11,77 et 18,87 % par rapport à l'échantillon témoin respectif.

La teneur en flavonoïdes dans les feuilles de chanvre témoins (tableau 5) a également été observée comme diminuant avec la croissance de la plante. Comparée à l'échantillon témoin de la date de récolte I, elle a diminué de 1,72 % dans les feuilles de la date de récolte II, de 0,68 % dans celles de la date de récolte III et de 3,68 % dans les feuilles récoltées au terme IV. Des teneurs diminuées en flavonoïdes ont également été déterminées après un traitement au digestat de 50 L dans les feuilles récoltées aux termes II, III et IV, soit de 0,71, 0,82 et 0,13 % par rapport à l'échantillon témoin.

Des observations similaires ont été faites pour l'activité antioxydante des extraits de feuilles de chanvre déterminée dans le test DPPH (Tableau 5). Une diminution significative a été notée dans les propriétés antioxydantes des échantillons témoins ainsi que la croissance des plantes (68,99, 61,34, 63,38 et 59,41 mmol Trolox kg $^{-1}$). Dans le cas du traitement au digestat de 50 L, le potentiel antioxydant des feuilles récoltées aux deuxième, troisième et quatrième termes était inférieur de 1,55, 1,28 et 0,22 % par rapport aux échantillons témoins respectifs. Les autres variantes de traitement par engrais ont entraîné une augmentation des propriétés antioxydantes des feuilles de chanvre.

L'analyse de corrélation de Pearson a montré une corrélation positive modérée entre la date de récolte et la dose de digestat et les propriétés antioxydantes et le potentiel de piégeage des radicaux DPPH des feuilles de chanvre (0,576).

Tableau 5 Teneur en polyphénols et flavonoïdes, et activité de piégeage des radicaux DPPH des feuilles de chanvre.

Table pleine grandeur https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/5

Le tableau 6 présente la teneur en polyphénols dans les échantillons de Cannabis sativa analysés. Les flavones les plus souvent détectées comprennent la cannflavine A (CVA), la cannflavine B (CVB), la lutéoline-7-O-glucoside, la lutéoline et l'apigénine. La cannflavine est un mélange de deux dérivés prénylés de la cannflavine A et B. La présence de cannflavines A et B (CVA et CVB) dans les feuilles de chanvre est impliquée dans leurs propriétés anti-inflammatoires et dans leur potentiel à fournir des acides gras oméga-3 dans les produits alimentaires ou cosmétiques 36, 37 .

L'application de produits présentant des propriétés anti-inflammatoires qui préviennent les maladies auto-immunes, les maladies cardiovasculaires et les néoplasmes est essentielle au maintien de la santé humaine 38 .

Les teneurs en flavonoïdes cannflavine A et cannflavine B dans le chanvre diffèrent selon les parties morphologiques des plantes. Pollastro et al. 11 ont démontré leurs teneurs à 6,0 et 0,8 mg kg^{-1} , respectivement, dans les feuilles de chanvre, tandis qu'Izzo et al. 13 à 61,8 et 84,5 mg kg^{-1} , respectivement, dans les inflorescences de chanvre.

Dans la présente étude, les teneurs en cannflavine A (CVA) et B (CVB) déterminées dans les feuilles témoins récoltées au terme I ont atteint 69,96 et 61,21 mg·kg^{-1} , respectivement (tableau 6), et ont augmenté dans les feuilles témoins à partir des dates de récolte suivantes de 4,78, 6,05 et 8,81 % dans le cas de la cannflavine A et de 6,95, 9,27 et 5,49 % dans le cas de la cannflavine B, respectivement.

Après l'application d'engrais, leurs teneurs ont diminué dans les feuilles de toutes les variantes de traitement du digestat et à toutes les dates de récolte.

Les feuilles de chanvre sont également de riches sources d'antioxydants bioactifs, comme la lutéoline et le lutéoline-7-O-glucoside. Selon Ahmada-Qasema et al. 39 , ce dernier est le polyphénol le plus stable lors de la digestion in vitro, ce qui en fait l'un des facteurs responsables de la bioactivité de la plupart des extraits de feuilles, y compris les feuilles de chanvre.

Les teneurs en lutéoline et en lutéoline-7-O-glucoside déterminées dans les feuilles de chanvre témoins récoltées au cours du terme I ont atteint respectivement 9,82 et 7,19 mg·kg^{-1} (tableau 6) et étaient similaires aux valeurs rapportées par McPartland et al. 40 . La teneur en lutéoline des échantillons témoins a suivi une tendance à la baisse et était inférieure de 0,14, 0,88 et 3,36 % dans les feuilles des dates de récolte II, III et IV par rapport à celles récoltées au cours du terme I.

Les résultats obtenus après l'application du digestat ont montré une diminution de la teneur en lutéoline des feuilles récoltées des variantes de 30 à 50 L au cours du terme I de 0,07 et 1,76 %, par rapport à l'échantillon témoin. Une observation similaire a été faite pour les feuilles récoltées au terme II à partir des mêmes variantes de traitement du digestat (30 et 50 L), c'est-à-dire que leur teneur en lutéoline était de 0,68 et 1,56 % inférieure à celle des feuilles témoins de la date de récolte I.

La teneur en lutéoline-7-O-glucoside déterminée dans les feuilles de chanvre témoins a augmenté entre les dates de récolte I et II, puis a suivi une tendance à la baisse dans les échantillons des dates de récolte III et IV (-0,32 et − 0,88 %, respectivement). Après l'application du digestat, la teneur en ce flavonoïde a augmenté dans les feuilles de pratiquement toutes les dates de récolte par rapport aux échantillons témoins, quelle que soit la dose d'engrais. Une exception a été observée dans la variante de digestat de 50 L, où la teneur en lutéoline-7-O-glucoside a diminué de 0,64 % dans les feuilles de la date de récolte II et de 0,19 % dans celles de la date de récolte IV, par rapport à l'échantillon témoin respectif.

Les flavonoïdes de type quercétine (IQue) sont abondants dans les plantes médicinales et diététiques et présentent des activités biologiques à multiples facettes 41 . Les auteurs cités ont montré que l'IQue présentait des effets antiviraux sur la grippe, le Zika, l'herpès, Ebola, la dengue, la varicelle et le zona 42 , 43 . Les O-glycosides appartenant au groupe des aglycones présents dans le chanvre comprennent la quercétine, la quercétine-3-glucoside, la rutine et l'apigénine. Ils sont tous considérés comme des flavonoïdes puissants présents dans divers extraits de chanvre. Leurs concentrations dépendent de la partie morphologique de la plante de chanvre transformée (graines ou tiges).

Selon Aloo et al. 44 , les teneurs en rutine et en quercétine étaient plus élevées dans l'extrait de graines de chanvre que dans celui des tiges de chanvre.

Leur consommation quotidienne pourrait avoir des effets bénéfiques sur la santé, notamment un potentiel antioxydant accru, une prévention de l'obésité ainsi que des effets anti-inflammatoires et antidiabétiques.

Les différences de teneur en ces métabolites seraient l'une des causes des différences observées dans l'activité biologique des graines de chanvre et de l'extrait de tige de chanvre 44 , 45 .

Les résultats obtenus concernant la quercétine dans les feuilles de chanvre témoins ont montré que sa teneur variait entre 11,65 et 11,82 mg kg^{-1} (tableau 6), et augmentait dans les feuilles des dates de récolte II et III de 0,23 et 0,90 %, respectivement, par rapport aux feuilles témoins de la date de récolte I.

À son tour, une diminution de 1,22 % de la teneur en quercétine a été notée dans les feuilles récoltées au terme IV, par rapport à celles du terme I. Dans le cas de l'application de digestat, une tendance à la hausse a été notée dans toutes les variantes par rapport aux échantillons témoins respectifs.

Dans les feuilles récoltées au terme I, la plus forte augmentation de la teneur en quercétine a été déterminée après un traitement de digestat de 20 L, et la valeur obtenue était supérieure de 7,63 % par rapport à l'échantillon témoin.

Dans les feuilles du deuxième terme de récolte, la teneur en quercétine a augmenté lors des traitements de digestat à des doses de 20 et 30 L de 9,03 et 7,62 %, respectivement, par rapport à l'échantillon témoin.

Dans les feuilles de la date de récolte III, la teneur en quercétine était la plus élevée dans la variante de digestat de 30 L, soit 7,51 % de plus que dans l'échantillon témoin. Dans les feuilles de la dernière date de récolte, une augmentation de 6,95 % de la teneur en quercétine a été observée dans la variante de digestat de 30 L, par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en quercétine-3-glucoside des feuilles de chanvre a diminué avec la croissance de la plante (tableau 6). Ses valeurs déterminées dans les échantillons témoins variaient de 33,19 à 33,64 mg kg^{-1} .

Une augmentation de la teneur en ce composé a été notée dans les feuilles à partir de la date de récolte II ; cependant, elle était faible et supérieure de seulement 0,03 % par rapport à l'échantillon témoin à partir de la date de récolte I.

Après l'application du digestat, la teneur en quercétine-3-glucoside a diminué dans les feuilles de chanvre dans la plupart des variantes expérimentales analysées.

L'efficacité pharmacologique de la rutine, associée à ses diverses propriétés, comme l'activité anti-inflammatoire et antioxydante, est devenue extrêmement importante pour l'industrie pharmaceutique, ce qui a conduit à l'enregistrement de nombreux médicaments dans le monde entier qui contiennent ce précieux composé 46 , 47 .

Une étude menée par Kaur & Muthuraman 48 , a montré des résultats positifs de l'administration de rutine dans le traitement de l'hypertension rénovasculaire causée par l'ischémie rénale. À la connaissance des auteurs, il n'y a eu aucun rapport à ce jour sur la teneur en rutine des feuilles de chanvre.

Dans la présente étude, la teneur en rutine déterminée dans les feuilles de chanvre témoins a été observée comme augmentant de manière insignifiante quelle que soit la date de récolte des feuilles (15,69-15,94 mg kg^{-1}). La teneur en ce métabolite dans les feuilles des termes de récolte suivants était de 0,65, 1,57 et 0,47 % supérieure à celle des feuilles témoins de la date de récolte I.

L'application d'engrais pendant la croissance des plants de chanvre a contribué, dans la plupart des cas, à l'augmentation de la teneur en rutine dans les feuilles, à l'exception des feuilles de la variante de digestat de 50 L récoltées aux termes II, III et IV, qui contenaient respectivement 1,10, 0,04 et 1,08 % de rutine en moins que leurs homologues témoins.

La teneur en aglycone sous forme d'apigénine dans le chanvre en fait l'une des plantes les plus importantes avec de fortes propriétés antifongiques, antiparasitaires, antioxydantes, ainsi que des propriétés anxiolytiques, dépressives et analgésiques.

Ce composé est également utilisé dans la lutte contre le cancer et la maladie d'Alzheimer. Une étude de 2019 sur le potentiel thérapeutique de l'apigénine a révélé qu'elle avait des propriétés antioxydantes plus fortes que les autres flavonoïdes 49 .

De son côté, une expérience sur des rats réalisée par Huang et al. 50 a démontré que l'apigénine inhibait le stress oxydatif en régulant des voies sélectionnées dans le foie. Les doses optimales d'apigénine et d'autres flavonoïdes dans une supplémentation quotidienne sont supposées se situer entre 50 mg et 600 mg.

Une étude menée par Jin et al. 51 sur différentes parties morphologiques de plantes de chanvre a montré les teneurs les plus élevées en flavonoïdes dans les feuilles (0,34–0,44 %) et l'absence de ces composés dans les racines.

La teneur totale en flavonoïdes dans les feuilles de cannabis a été estimée à environ 1 % 40 . La teneur en apigénine dans les échantillons analysés par McPartland et al. 40 variait de 0,03 à 0,07 % dans les feuilles et de 0,004 à 0,01 % dans les inflorescences. Dans notre étude, les

feuilles témoins de chanvre cultivées avec différentes doses appliquées du digestat contenaient de 2,71 (date de récolte IV) à 2,82 mg kg $^{-1}$ (date de récolte III) d'apigénine (tableau 6). Ces résultats indiquent une teneur décroissante de ce flavonoïde dans les échantillons témoins des feuilles.

Une augmentation tangible de la teneur en apigénine a été notée dans les feuilles récoltées au terme III, soit de 2,92 % par rapport aux échantillons témoins de la date de récolte I. Dans toutes les variantes expérimentales d'application du digestat, la teneur en apigénine a diminué dans les feuilles de la date de récolte I de 0,12, 4,87 et 7,06 % par rapport à l'échantillon témoin. Dans les feuilles récoltées aux termes II et III, une diminution n'a été notée qu'après un traitement au digestat de 50 L lorsque la teneur en apigénine était de 2,24 et 0,59 % inférieure à celle des échantillons témoins.

La présence de composés de kaempférol dans les feuilles de chanvre augmente leur potentiel pharmacologique, notamment leurs effets anti-inflammatoires, anti-cancérigènes, neuroprotecteurs et cardioprotecteurs 52 , 53 .

La teneur en kaempférol dans les échantillons témoins de feuilles de chanvre variait de 1,59 (date de récolte IV) à 2,10 mg kg $^{-1}$ (date de récolte II) (tableau 6). Des teneurs en kaempférol plus faibles ont été déterminées dans les feuilles témoins récoltées aux termes III et IV, c'est-à-dire de 2,40 et 18,01 %, respectivement, que dans celles du terme I, tandis que dans les feuilles témoins de la date de récolte II, sa teneur a augmenté de 8,23 %. À son tour, l'application de digestat n'a provoqué aucune tendance à la baisse de la teneur en ce composé dans aucune des variantes expérimentales.

Les plus fortes augmentations de la teneur en kaempférol ont été observées dans les feuilles des variantes de digestat de 30 L et ont atteint 13,72 % dans les feuilles de la date de récolte I, 17,27 % dans les feuilles de la date de récolte II, 17,40 % dans les feuilles de la date de récolte III et 19,04 % dans les feuilles de la date de récolte IV, par rapport au témoin.

Selon Kim et al. 54 , la présence de kaempférol-3-O-glucoside dans les feuilles de chanvre augmente leurs propriétés thérapeutiques connues. Sa teneur dans les feuilles de chanvre témoins analysées dans notre étude variait de 3,04 à 3,20 mg kg $^{-1}$, et on a observé qu'elle diminuait avec la croissance de la plante, à l'exception des feuilles témoins récoltées au terme I (+ 1,59 %) (tableau 6).

Les résultats obtenus pour les feuilles des dates de récolte II et III étaient inférieurs de 1,27 et 3,49 % à ceux déterminés dans les feuilles témoins de la date de récolte I. Après l'application du digestat à une dose de 50 L, la teneur en kaempférol-3-O-glucoside a diminué dans les feuilles de toutes les dates de récolte de 1,59, 2,29, 0,54 et 1,31 % par rapport aux échantillons témoins respectifs.

D'autres composés présentant des propriétés antioxydantes et appartenant au groupe des acides phénoliques comprennent l'acide tannique du café, appelé acide chlorogénique (CGA), l'acide p-coumarique et l'acide férulique.

L'acide tannique du café est un composé hydrosoluble synthétisé lors de l'oxydation aérobie des plantes dans la voie de l'acide shikimique.

Il présente une activité biologique élevée qui se manifeste principalement par ses propriétés antioxydantes, hépatoprotectrices, antibactériennes, anticancéreuses, régulatrices du

métabolisme glucidique et lipidique, anti-inflammatoires et protectrices du système nerveux 25 . En raison de sa teneur en substances physiologiquement actives bénéfiques pour la santé humaine, il joue les rôles suivants : régulation de la pression artérielle, effet antiseptique, résistance aux néoplasmes, effet anti-inflammatoire, effet antioxydant, etc. 55 .

Généralement, le CGA peut former un complexe protéine-polyphénolique par liaisons hydrogène avec les protéines, créant ainsi une couche intermédiaire plus épaisse, inhibant la diffusion des radicaux libres et augmentant la capacité antioxydante 56 .

Dans l'industrie cosmétique, il est utilisé pour le blanchiment de la peau, l'hydratation, la protection solaire et les soins capillaires car il peut prévenir les dommages au collagène causés par les espèces réactives de l'oxygène et protéger la peau humaine des rayons ultraviolets 57 . Ces composés dérivés des feuilles de chanvre représentent une excellente alternative pour l'industrie actuelle car les résidus végétaux sont, dans la plupart des cas, traités comme des déchets de récolte.

Comme le montrent les données de la littérature, leur teneur varie selon les parties morphologiques d'une plante, par exemple, Izzo et al. 13 ont démontré sa teneur entre 1,2 et 4,3 mg kg^{-1} dans les inflorescences de divers cultivars *de C. sativa* .

Dans la présente étude (tableau 6), la teneur en acide caféique des feuilles de chanvre témoins variait de 1,55 à 1,65 mg kg^{-1} . Sa valeur la plus basse a été déterminée pour les échantillons témoins de la date de récolte III (1,55 mg kg^{-1}), soit 4,52 % de moins que les feuilles témoins de la date de récolte I.

L'analyse des échantillons des variantes expérimentales avec application de digestat a démontré que, dans la plupart des cas, la teneur en cet acide a augmenté par rapport aux échantillons témoins. Une diminution de sa teneur a été notée uniquement dans les feuilles de la variante avec 50 L de digestat, soit de 1,23 % dans celles de la date de récolte I, de 3,29 % dans celles de la date de récolte II et de 2,42 % dans celles récoltées au terme IV.

La teneur en acide chlorogénique dans les feuilles témoins de chanvre industriel variait entre 16,44 et 16,94 mk kg^{-1} . Une diminution de sa teneur a été déterminée pour les feuilles témoins récoltées au terme IV (2,66 %).

Dans les variantes expérimentales avec l'engrais, la teneur en cet acide a augmenté dans la plupart des cas, quelle que soit la dose de digestat, à l'exception des feuilles issues du traitement au digestat de 50 L récoltées aux termes I et II, dans lesquelles la teneur en acide chlorogénique était respectivement de 1,76 et 0,02 % inférieure à celle des échantillons témoins respectifs.

Outre ceux mentionnés ci-dessus, il convient également de noter quelques acides hydroxycinnamiques, comme l'acide p-coumarique et l'acide férulique.

L'acide p-coumarique est un composé phénylpropanoïde représentatif omniprésent dans le règne végétal 58 . Il a été démontré que cet acide et ses dérivés présentent des activités antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires 58 , 59 . Leur présence dans les aliments peut atténuer l'hépatotoxicité de l'alcool et protéger la peau contre les rayons UV 59 , 60 .

L'acide p-coumarique a de multiples applications, par exemple, comme composant actif des cosmétiques 61 . Sa teneur dans les feuilles de cannabis s'est avérée relativement élevée par

rapport aux racines ou aux fleurs de cette plante 13 . Les résultats obtenus dans la présente étude permettent de conclure que sa teneur était plus élevée que dans les racines de cannabis analysées par Oh et al. 62 .

Dans les échantillons témoins de feuilles de chanvre, sa teneur variait de 8,08 à 8,24 mg kg^{-1} , les valeurs les plus faibles étant observées pour les feuilles des dates de récolte III et IV dans lesquelles elle était inférieure de 0,37 et 1,5 % à celles des feuilles récoltées au terme I (tableau 6).

Une augmentation insignifiante de la teneur en acide p-coumarique (de 0,45 %) a été déterminée dans les feuilles récoltées au terme II.

L'application de digestat a contribué à une augmentation de cette teneur en acide dans presque tous les cas. Sa teneur la plus élevée a été déterminée dans les feuilles des variantes de traitement du digestat de 30 et 50 L récoltées aux termes II et IV et, c'est-à-dire, de 3,20 et 3,28 % dans les feuilles récoltées au terme II et de 2,39 et 2,85 % dans celles récoltées au terme IV, respectivement.

Les teneurs en acide férulique déterminées dans les feuilles de chanvre analysées dans la présente étude sont comparables à celles déterminées dans les fleurs de ces plantes 13 .

Dans notre étude (tableau 6), la teneur en acide férulique dans les feuilles témoins variait de 21,20 à 21,31 mg kg^{-1} .

Par rapport au premier échantillon témoin (feuilles de la date de récolte I), une diminution de 0,5 % de sa teneur a été notée dans les feuilles récoltées au terme IV.

Après l'application du digestat, la teneur en acide férulique a augmenté dans la plupart des cas, à l'exception des feuilles récoltées au terme I à partir de la variante de digestat de 50 L dans lesquelles elle était inférieure de 0,58 %.

La teneur en catéchines dans les feuilles de chanvre témoins variait entre 97,64 et 98,17 mg kg^{-1} et était supérieure aux valeurs de 40,9 à 85,3 mg kg^{-1} rapportées par Izzo et al., 13 pour divers cultivars de cannabis. Les teneurs en catéchines déterminées pour les feuilles témoins récoltées aux termes II et IV étaient inférieures de 0,28 et 0,01 %, respectivement, par rapport aux feuilles témoins de la date de récolte I.

L'application de digestat à une dose de 50 L a contribué à une diminution de la teneur en catéchines dans les feuilles récoltées aux termes I et III de 0,45, 0,01 et 0,36 % par rapport à l'échantillon témoin.

La teneur en épicatéchines dans les feuilles témoins de chanvre analysées variait de 39,13 à 39,81 mg kg^{-1} (tableau 6). Ses valeurs déterminées pour les feuilles des dates de récolte II, III et IV étaient supérieures de 0,18, 1,74 et 0,73 %, respectivement, à celles des feuilles témoins récoltées au terme I. L'application d'engrais à toutes les doses testées n'a pas diminué la teneur en épicatéchine des feuilles. La plus forte augmentation, de 6,68 et 6,41 % par rapport à l'échantillon témoin, a été notée dans les feuilles récoltées au terme II dans les variantes avec 20 et 30 L de digestat.

La teneur en un autre flavonoïde, la naringénine, dans les feuilles de chanvre témoins variait de 0,43 à 0,52 mg kg^{-1} (tableau 6). Sa teneur n'a diminué ni dans les feuilles témoins ni dans celles des variantes de traitement du digestat. Dans l'étude menée par Izzo et al., 13 , la teneur

en naringénine variait de 0,5 à 2,00 mg kg^{-1} selon le cultivar de cannabis et était comparable aux résultats rapportés dans la présente étude.

L'analyse de corrélation de Pearson a démontré une corrélation positive modérée entre la date de récolte et la dose de digestat et la teneur en quercétine-3-glucoside (0,694) dans les feuilles de chanvre analysées.

Tableau 6 Teneur en polyphénols dans les échantillons *de Cannabis sativa* analysés .

Table pleine grandeur https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/6

Analyse microbiologique des feuilles de chanvre

Les communautés de bactéries et de champignons colonisant les racines, les feuilles, les fleurs et la rhizosphère des cultivars *de C. sativa* ont été étudiées et décrites dans de rares ouvrages 63 , 64 . Cependant, diverses données sur le potentiel antibactérien de ces plantes sont restées non confirmées bien qu'elles proviennent de la recherche scientifique. Compte tenu du manque d'études portant sur la microflore des feuilles *de C. sativa* , celle-ci a été analysée dans la présente étude. L'intérêt croissant pour les agents bactéricides naturels, en particulier ceux d'origine végétale, a incité des études visant à les rechercher également dans des plantes telles que le chanvre industriel. Les extraits de plantes obtenus offrent des solutions prometteuses et saines à la résistance croissante aux antibiotiques et peuvent représenter une alternative aux composés synthétiques visant à inhiber le développement des bactéries 65 . Selon une étude menée par Fu et al. 66 , un extrait de feuilles de chanvre industriel exerce un fort effet bactériostatique sur les bactéries *E. coli* et *S. aureus* .

Le tableau 7 présente une analyse de l'activité antimicrobienne des feuilles de chanvre. Les extraits de feuilles de chanvre préparés dans notre étude ont été testés à l'aide de souches bactériennes et fongiques sélectionnées, ce qui a permis d'établir leurs activités antibactériennes et antifongiques. Les résultats des analyses microbiologiques indiquent des zones d'inhibition de la croissance des bactéries et des champignons induites par des extraits éthanoliques de feuilles de chanvre (20 mg mL^{-1}).

L'extrait éthanolique de feuilles de chanvre a montré une activité contre tous les micro-organismes utilisés dans l'étude (tableau 7). Une activité distincte a été déterminée contre les champignons, mais principalement contre *Staphylococcus aureus* , *Pseudomonas aeruginosa* et *Candida albicans* .

Les valeurs d'activité obtenues à toutes les dates de récolte différaient de celles des échantillons témoins. Cependant, la date de récolte elle-même n'a pas eu d'effet significatif sur l'activité antibactérienne et antifongique des extraits.

Dans le cas des variantes expérimentales avec application d'engrais, l'activité antimicrobienne accrue a été observée lors de l'amendement du sol avec des doses de digestat de 30 et 50 L.

Ces doses d'engrais ont entraîné un élargissement significatif des zones d'inhibition de la croissance, en particulier pour *C. albicans* dans le cas des extraits de feuilles de chanvre récoltées aux termes I, II et III (85, 50 % - date de récolte I, 50 % - date de récolte II et 20 % - date de récolte III), par rapport aux échantillons témoins respectifs. Dans le cas des feuilles récoltées au terme IV, l'augmentation de l'activité antimicrobienne de l'extrait était supérieure de

80 et 100 % pour *S. aureus* aux trois concentrations de digestat et de 100 % pour *P. aeruginosa* à une dose de digestat de 50 L, par rapport à l'échantillon témoin (tableau 7).

Les coefficients de corrélation linéaire de Pearson ont atteint *0,23* (*S.* aureus), 0,003 *(P. aerugini* osa), *0,14 (C. albicans*) et *0,07 (A. niger*) , indiquant *une* faible corrélation entre l'activité antimicrobienne des extraits et la date de récolte des feuilles et la dose de digestat. À notre connaissance, les effets antimicrobiens ne sont peut-être pas directement dus à la capacité antioxydante des polyphénols ou des extraits, mais les micro-organismes peuvent influencer les propriétés antioxydantes, par exemple :

Production d'antioxydants : certains micro-organismes synthétisent des antioxydants naturels tels que des enzymes, des vitamines ou des composés phénoliques.

Biotransformation : les micro-organismes peuvent modifier des composés chimiques en formes dotées de propriétés antioxydantes plus puissantes.

Tableau 7 Activité antimicrobienne des feuilles de chanvre.

Table pleine grandeur https://www.nature.com/articles/s41598-025-04565-5/tables/7

Conclusions

L'étude menée et l'analyse des principaux composants des feuilles de chanvre ont démontré que l'application de digestat a contribué à une diminution de la teneur totale en polyphénols (−15,06, −9,76, −19,87 %), de la teneur en flavonoïdes (−1,72, −0,68, −3,68 %) et de la capacité antioxydante mesurée dans le test DPPH (−11,08, −8,13, −13,87 %) dans les feuilles en fonction de la date de récolte de l'échantillon témoin et de la dose de digestat.

Des observations similaires ont été faites pour les teneurs en NFE (−2,44, −1,81, −3,16 %) et en cendres (−4,60, −5,26, −5,60 %) dans les feuilles.

Un effet positif de l'expérience prévue a été observé dans la teneur en fibres brutes (+ 0,19, + 0,38, + 2,82 %) des feuilles de toutes les variantes.

Une augmentation a également été notée dans la teneur en protéines brutes des feuilles témoins (+ 4,72, + 6,59, + 7,85 %) et dans les teneurs en acides aminés individuels, ce qui confirme l'applicabilité des feuilles de chanvre comme additifs riches en protéines d'origine végétale dans de nombreuses branches industrielles.

Les extraits de feuilles de chanvre exposés à des souches bactériennes et fongiques ont démontré une activité antibactérienne et antifongique positive contre les souches *de S. aureus* , *P. aeruginosa* et *C. albicans* dans la plupart des variantes expérimentales, en particulier après amendement du sol avec les doses testées du digestat.

Disponibilité des données

Les ensembles de données utilisés et/ou analysés au cours de l'étude actuelle sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

Références

1. Insam, H., Gómez-Brandón, M. & Ascher, J. Résidus de fermentation du biogaz à base de fumier : amis ou ennemis de la fertilité des sols ? *Soil Biol. Biochem.* **84** , 1–14. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.006 (2015).

Article **CAS** **Google Scholar**

2. Verdi, L. et al. L'utilisation de digestat pour remplacer les engrais minéraux entraîne-t-elle moins d'émissions de N_2O et de NH_3 ? *Agric. Pour. Meteorol.* **269–270** , 112–118. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.004 (2019).

Article **PUBLICITÉS** **Google Scholar**

3. Berthrong, ST, Buckley, DH & Drinkwater, LE La gestion agricole et les ajouts de carbone labile affectent la structure de la communauté microbienne du sol et interagissent avec le cycle du carbone et de l'azote. *Microb. Ecol.* **66** , 158–170. https://doi.org/10.1007/s00248-013-0225-0 (2013).

Article **PUBLICITÉS** **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

4. CE. Agriculture et développement rural. https://agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_en (2023).

5. Russo, EB Histoire du cannabis et de ses préparations dans la saga, la science et le sobriquet. *Chem. Biodivers.* **4** , 1614–1648. https://doi.org/10.1002/cbdv.200790144 (2007).

Article **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

6. Adesina, IS Besoins nutritionnels du sol et implications biologiques sur la santé du sol de la culture du chanvre en Caroline du Nord (Thèse de doctorat North Carolina Agricultural and Technical State University, 2021).

7. Cushnie, TT & Lamb, AJ Activité antimicrobienne des flavonoïdes. *Int. J. Antimicrob. Agents* . **26** , 343–356. https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2005.09.002 (2005).

Article **CAS** **PubMed** **PubMed Central** **Google Scholar**

8. Wach, A., Pyrzyńska, K. & Biesaga, M. Teneur en quercétine dans certains échantillons d'aliments et de plantes. *Food Chem.* **100** (2), 699–704. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.028 (2007).

Article **CAS** **Google Scholar**

9. Kakudidi, E., Tugume, P., Asiimwe, S. & Anywar, G. Utilisations traditionnelles et modernes du Cannabis sativa L. En Afrique et son profil phytochimique et pharmacologique. *Cannabis Marijuana Santé.* 189-210. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8822-5_10 (2022).

10. Mkpenie, V., Essien, E. & Udoh, I. Effet des conditions d'extraction sur les teneurs totales en polyphénols, les activités antioxydantes et antimicrobiennes de *Cannabis sativa* L. Electron. *J. Environ. Agricultural Food Chem.* **11** , 300–307 (2012).

CAS **Google Scholar**

11. Pollastro, F., Minassi, A. & Fresu, LG Cannabis phénoliques et leurs bioactivités. *Curr. Méd. Chimique.* **25** (10), 1160-1185 (2018).

Article **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

12. Castaldo, L. et al. Consommation de vin rouge. Molécules de santé cardiovasculaire. **24** (19), 3626 https://doi.org/10.3390/molecules24193626 (2019).

Article CAS Google Scholar

13. Izzo, L. et al. Analyse des composés phénoliques dans les inflorescences commerciales *de Cannabis sativa* L. à l'aide de l'UHPLC-Q-Orbitrap HRMS. *Molécules* **25** , 631. https://doi.org/10.3390/molecules25030631 (2020).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

14. Farinon, B., Molinari, R., Costantini, L. & Merendino, N. La graine de chanvre industriel (Cannabis sativa L.) : qualité nutritionnelle et fonctionnalité potentielle pour la santé et la nutrition humaines. *Nutrients* **12** (7), 1935. https://doi.org/10.3390/nu12071935 (2020).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

15. Karlsson, L., Finell, M. et Martinsson, K. Effets de l'augmentation de la quantité de tourteaux de chanvre dans l'alimentation des vaches laitières sur la production et la composition du lait. *Animal* **4** , 1854–1860. https://doi.org/10.1017/S1751731110001254 (2010).

Article CAS PubMed Google Scholar

16. Kleinhenz, MD et al. Concentrations en nutriments, digestibilité et concentrations en cannabinoïdes des composants du chanvre industriel. *Appl. Anim. Sci.* **36** (4), 489–494. https://doi.org/10.15232/aas.2020-02018 (2020).

Article Google Scholar

17. Brugman, S. et al. HM Une revue comparative sur la manipulation du microbiote : leçons tirées de la recherche sur les poissons, les plantes, le bétail et les humains. *Front. Nutr.* **5** , 80 (2018).

Article PubMed PubMed Central Google Scholar

18. Langezaal, CR, Chandra, A. & Scheffer, JJC Criblage antimicrobien d'huiles essentielles et d'extraits de certains cultivars d'Humulus lupulus L. *Pharm. World Sci.* **14** (6), 353–356. https://doi.org/10.1007/BF01970171 (1992).

Article CAS Google Scholar

19. Ranjith, A., Srilatha, CM, Lekshmi, PC & Rameshbabu, N. Potentiel antiaflatoxigénique des huiles essentielles d'épices — une revue. *World Mycotoxin J.* **14** , 463–475. https://doi.org/10.3920/WMJ2020.2636 (2021).

Article CAS Google Scholar

20. PN-EN ISO & /IEC 17025. Exigences générales relatives à la compétence des laboratoires d'essais et d'étalonnages (en Pologne). (2005).

21. AOAC (Association des chimistes analytiques officiels). *Méthodes officielles d'analyse de l'Association de chimie analytique officielle* . 13e édition (éd.) Horwitz, W. 1141 (AOAC, 1980).

22. Singleton, VL & Rossi, JA Colorimétrie des composés phénoliques totaux avec des réactifs à base d'acide phosphomolybdique-phosphotungstique. *Am. J. Enol. Viticult.* **16** , 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144 (1965).

Article **CAS** **Google Scholar**

23. Kramling, TE & Singleton, VL Une estimation des phénols non flavonoïdes dans les vins. *Am. Journal Enol. Viticulture* . **20** , 86–92 (1969).

Article **CAS** **Google Scholar**

24. Calzolari, D. et al. Composés à haute valeur ajoutée issus des résidus de battage du cannabis. *Ind. Crops Prod.* **108** , 558–563 (2017).

Article **CAS** **Google Scholar**

25. Wang, L. et al. Peng C. Le mécanisme d'activité biologique de l'acide chlorogénique et ses applications dans l'industrie alimentaire. *Revue - Front. Nutr.* **9** , 943911. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.943911 (2022).

Article **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

26. Zhishen, J., Mengcheng, T. & Jianming, W. Détermination des teneurs en flavonoïdes dans le mûrier et leurs effets piégeurs sur les radicaux superoxydes. *Food Chem.* **64** (4), 555–559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2 (1999).

Article **CAS** **Google Scholar**

27. Brand-Williams, W., Cuvelier, ME & Berset, C. Utilisation d'une méthode de radicaux libres pour évaluer l'activité antioxydante. *LWT-Food Sci. Technol.* **28** , 25–30 (1995).

Article **CAS** **Google Scholar**

28. Bauer, AW, Kirby, WMM, Sherries, JC & Turck, M. Test de sensibilité aux antibiotiques par la méthode du disque unique 22. *Am. J. Clin. Pathol.* **45** , 493–496 (1966).

Article **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

29. Collins, CH, Patricia, ML, Microbiologique et méthodes. 441–446 (1994).

30. Pojić, M. et al. Caractérisation des sous-produits issus de la transformation de l'huile de chanvre. *J. Sci. Food Agricultural* . **62** , 12436–12442. https://doi.org/10.1021/jf5044426 (2014).

Article **CAS** **Google Scholar**

31. Guzzetti, L. et al. Évaluation des composés phénoliques bioactifs alimentaires et de la durabilité agricole d'un légume-feuille africain *Corchorus Olitorius* L. *Front. Nutrition* . **8** , 667812 (2021).

Article **Google Scholar**

32. Bosso, H., Barbalho, SM, Goulart, RDA & Otoboni, AMMB Café vert : pertinence économique et revue systématique des effets sur la santé humaine. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **61** , 1–17.

33. Cheng, D. et al. L'acide chlorogénique protège contre la toxicité de l'aluminium via la voie de signalisation mapk/akt dans les macrophages murins RAW264.7. *J. Inorg. Biochem.* **190** , 113–120. https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2018.11.001 (2019).

Article **CAS** **Google Scholar**

34. Li, CR et al. La métabolomique non ciblée basée sur la LC-MS révèle des différences chimiques des feuilles *de cannabis* de différentes régions de Chine. *Ind. Crops Prod.* **176** , 114411. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114411 (2022).

Article **CAS** **Google Scholar**

35. Cui, Q., Li, J. & Yu, C. Extraction et purification des flavonoïdes totaux des fibres de Cannabis sativa et leur évaluation des activités antioxydantes et antibactériennes. *Texte. Res. J.* **93** (1–2), 56–69. https://doi.org/10.1177/00405175221114929 (2023).

Article **CAS** **Google Scholar**

36. Minassi, A., Giana, A., Ech-Chahad, A. & Appendino, G. Une synthèse régiodivergente de C-prénylflavones du cycle A. *Org. Lett.* **10** , 2267–2270 (2008).

Article **CAS** **PubMed** **Google Scholar**

37. Barnett, SE et al. Évaluation du microbiome du chanvre. *Phytobiomes J.* **4** , 351–363 (2020).

Article **Google Scholar**

38. Furman, D. et al. L'inflammation chronique dans l'étiologie des maladies tout au long de la vie. *Nat. Med.* **25** , 1822–1832 (2019).

Article **CAS** **PubMed** **PubMed Central** **Google Scholar**

39. Ahmad-Qasem, MH et al. JV Influence du traitement des feuilles d'olivier sur la bioaccessibilité des polyphénols bioactifs. *J. Agric. Food Chem.* **62** , 6190–6198 (2014).

40. McPartland, JM & Russo, EB Cannabis et extraits de cannabis : plus que la somme de leurs parties ? *J. Cannabis Ther.* **1** , 103–132 (2001).

Article **CAS** **Google Scholar**

41. Agrawal, K., Blunden, G. et Jacob, C. Importance antivirale de l'isoquercétine (quercétine-3-O-glucoside) en particulier pour son potentiel anticoronaviral. **19** (1) (2024). https://doi.org/10.1177/1934578X231219560

42. Joshi, R. S. et al. Discovery of potential multi-target-directed ligands by targeting host-specific SARS-CoV-2 structurally conserved main protease. *J. Biomol. Struct. Dyn.* **39** (9), 3099–3114 (2021).

CAS **PubMed** **Google Scholar**

43. Hoffmann, M. et al. SARS-CoV-2 cell entry depends on ACE2 and TMPRSS2 and is blocked by a clinically proven protease inhibitor. *Cell* **181** (2), 271–280e8 (2020).

Article **CAS** **PubMed** **PubMed Central** **Google Scholar**

44. Aloo, S. O., Kwame, F. O. & Oh, D. H. Identification of possible bioactive compounds and a comparative study on in vitro biological properties of whole hemp seed and stem. *Food Bioscience*. **51**, 102329. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102329 (2023).

Article CAS Google Scholar

45. Rusmana, D. et al. Antioxidant activity of Phyllanthus niruri extract, Rutin and Quercetin. *Indonesian Biomedical J.* **9** (2), 84–90 (2017).

Article Google Scholar

46. Abarikwu, S. D. et al. Rutin, an antioxidant flavonoid, induces glutathione and glutathione peroxidase activities to protect against ethanol effects in cadmium-induced oxidative stress in the testis of adult rats. *Andrologia* **49** (7), 1–12. https://doi.org/10.1111/and.12696 (2017).

Article CAS Google Scholar

47. Ganeshpurkar, A. & Saluja, A. The Pharmacological potential of Rutin. *Saudi Pharm. J.* **25** (2), 149–164. https://doi.org/10.1016/j.jsps.2016.04.025 (2016).

Article PubMed PubMed Central Google Scholar

48. Kaur, S. & Muthuraman, A. Therapeutic evaluation of Rutin in two-kidney one-clip model of renovascular hypertension in rat. *Life Sci.* **150**, 89–94. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2016.02.080 (2016).

Article CAS PubMed Google Scholar

49. Salehi, S. et al. Martins, N. The therapeutic potential of apigenin. *Int. J. Mol. Sci.* **20** (6), 1305. https://doi.org/10.3390/ijms20061305 (2019).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

50. Huang, C. S. et al. Protection by chrysin, apigenin, and Luteolin against oxidative stress is mediated by the Nrf2-dependent up-regulation of Heme Oxygenase 1 and glutamate cysteine ligase in rat primary hepatocytes. *Arch. Toxicol.* **87**, 167–178. https://doi.org/10.1007/s00204-012-0913-4 (2013).

Article CAS PubMed Google Scholar

51. Jin, H-R., Lee, S. & Choi, S-J. Pharmacokinetics and protective effects of Tartary buckwheat flour extracts against Ethanol-Induced liver injury in rats. *Antioxidants* **9** (10), 913. https://doi.org/10.3390/antiox9100913 (2020).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

52. Bainey, K. R. & Armstrong, P. W. Clinical perspectives on reperfusion injury in acute myocardial infarction. *Am. Heart J.* **167** (5), 637–645. https://doi.org/10.1016/j.ahj.2014.01.015 (2014).

Article PubMed Google Scholar

53. Burmistrova, O., Quintana, J., Diaz, J. G. & Estevez, F. Astragalin heptaacetate-induced cell death in human leukemia cells is dependent on caspases and activates the MAPK

pathway. *Cancer Lett.* **309** (1),
71–77. https://doi.org/10.1016/j.canlet.2011.05.018 (2011).

Article CAS PubMed Google Scholar

54. Kim, Y. H., Choi, Y. J. & Kang, M. K. Astragalin inhibits allergic inflammation and airway thickening in ovalbumin-challenged mice. *J. Agric. Food Chem.* **65** (4),
836–845. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05160 (2017).

Article CAS PubMed Google Scholar

55. Miao, M. & Xiang, L. Chapter Three - Pharmacological action and potential targets of chlorogenic acid. *Adv. Pharmacol.* **87**,
71–88. https://doi.org/10.1016/bs.apha.2019.12.002 (2020).

Article CAS PubMed Google Scholar

56. Guo, X. et al. Effect of chlorogenic acid on the physicochemical and functional properties of coregonus peled myofibrillar protein through hydroxyl radical oxidation. *Molecules* **24**,
3205. https://doi.org/10.3390/molecules24173205 (2019).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

57. Castro, A. C. C. et al. Santos A. G. Green coffee seed residue: A sustainable source of antioxidant compounds. *Food Chem.* **246**,
48–57. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.153 (2018).

Article CAS PubMed Google Scholar

58. Boz, H. p-Coumaric acid in cereals: presence, antioxidant and antimicrobial effects. *Int. J. Food Sci. Technol.* **50** (20215), 2323–2328. https://doi.org/10.1111/ijfs.12898 (2015).

Article CAS Google Scholar

59. Pei, K., Ou, J., Huang, J. & Ou, S. p-Coumaric acid and its conjugates: dietary sources, Pharmacokinetic properties and biological activities. *J. Sci. Food Agricultural*. **96**,
2952–2962 (2016).

Article CAS Google Scholar

60. Lee, S. I. et al. Protective effect of Sasa quelpaertensis and p-coumaric acid on ethanol-induced hepatotoxicity in mice. *J. Appl. Biol. Chem.* **51**, 148–154 (2008).

Article CAS Google Scholar

61. Boo, Y. C. p-Coumaric acid as an active ingredient in cosmetics: A review focusing on its antimelanogenic effects. *Antioxidants* **8**, 275 (2019).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

62. Oh, C. M. et al. Identification of p-Coumaric acid and Ethyl p-Coumarate as the main phenolic components of hemp (*Cannabis sativa* L.) roots. *Molecules* **27**,
2781. https://doi.org/10.3390/molecules27092781 (2022).

Article CAS PubMed PubMed Central Google Scholar

63. Singh, B. K. & Trivedi, P. Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microb. Biotechnol.* **10** (1), 50–53. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592 (2017).

Article PubMed PubMed Central Google Scholar

64. Ahmed, B. & Hijri, M. Potential impacts of soil microbiota manipulation on secondary metabolites production in cannabis. *J. Can. Res.* **3** (25). https://doi.org/10.1186/s42238-021-00082-0 (2021).

65. Hayek, L. J., Emerson, J. M. & Gardner, A. M. A placebo-controlled trial of the effect of two preoperative baths or showers with chlorhexidine detergent on postoperative wound infection rates. *J. Hosp. Infect.* **10** (2), 165–172. https://doi.org/10.1016/0195-6701(87)90143-5 (1987).

Article CAS PubMed Google Scholar

66. Fu, Y., Zhu, S., Duan, S. & Liu, L. Bioassay-Guided Isolation and Identification of Antibacterial Components against Escherichia coli from Industrial Hemp Leaves. *Separations* **10**, 35 https://doi.org/10.3390/separations10010035 (2023).

Download references

Funding

Open Access funding enabled and organized by University of Life Sciences in Lublin SUBB.WTR.19.042.

Author information

Authors and Affiliations

1. **Department of Machinery Exploitation and Management of Production Processes, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 28 Głęboka St., 20-612, Lublin, Poland**

Magdalena Kachel-Górecka, Milan Koszel & Karolina Sokal

2. **Institute of Human Nutrition and Agriculture, The University College of Applied Sciences in Chełm, Pocztowa 54, 22-100, Chełm, Poland**

Małgorzata Stryjecka

Contributions

M.K-G. = Performing the experiments, data collection M.K-G.; M.S. and M.K. = Performing the experiments, data collection, preparing the first draft M.K.-G.; M.S. and M.K. =Data collection; M.K.-G. and M.S. = Performing experience, M.K.-G. = Revising the first draft, wrote the main manuscript text and prepared figures, M.K.-G. = Supervisor, idea generation; revising the first draft, M.K.-G.; K.S. = Supervisor; idea generation, editing and revision. All authors reviewed the manuscript.

Corresponding author

Correspondence to Magdalena Kachel-Górecka.

Ethics declarations

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Publisher’s note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Rights and permissions

Libre accès. Cet article est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 Internationale, qui autorise toute utilisation, tout partage, toute distribution et toute reproduction non commerciale sur tout support et sous tout format, à condition de mentionner l'auteur(e) original(e) et la source, de fournir un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si vous avez modifié le contenu sous licence. Vous n'êtes pas autorisé(e) par cette licence à partager du contenu adapté dérivé de cet article ou de parties de celui-ci. Les images ou autres contenus tiers contenus dans cet article sont inclus dans la licence Creative Commons de l'article, sauf mention contraire dans une ligne de crédit du contenu. Si le contenu n'est pas inclus dans la licence Creative Commons de l'article et que l'utilisation que vous prévoyez d'en faire n'est pas autorisée par la réglementation ou dépasse les limites autorisées, vous devrez obtenir l'autorisation directement auprès du détenteur des droits d'auteur. Pour consulter une copie de cette licence, rendez-vous sur http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/ .

Réimpressions et autorisations

À propos de cet article

Citer cet article

Kachel-Górecka, M., Stryjecka, M., Koszel, M. *et al.* Effet du digestat agricole sur les propriétés antioxydantes et l'activité antimicrobienne des feuilles de chanvre (*Cannabis sativa*). *Sci Rep* **15** , 22955 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-04565-5

Télécharger la citation

- Reçu28 février 2025
- Accepté27 mai 2025
- Publié02 juillet 2025
- DOIhttps://doi.org/10.1038/s41598-025-04565-5

Partagez cet article

Toute personne avec qui vous partagez le lien suivant pourra lire ce contenu :

Obtenir un lien partageable

Fourni par l'initiative de partage de contenu Springer Nature SharedIt

Mots-clés

- ***Feuilles de cannabis sativa* (chanvre industriel)**
- **Propriétés antioxydantes**
- **Polyphénols**
- **Activité antimicrobienne**
- **digestat agricole**

Sujets

- **Écologie**
- **Écologie microbienne**
- **Microbiologie**

Télécharger le PDF

- Sections
- Références
- Abstrait
- Introduction
- Matériels et méthodes
- Résultats et discussion
- Conclusions
- Disponibilité des données
- Références
- Financement
- Informations sur l'auteur
- Déclarations éthiques
- Informations Complémentaires
- Droits et autorisations
- À propos de cet article

Publicité

Rapports scientifiques (*Sci Rep*)

ISSN 2045-2322 (en ligne)

Plan du site nature.com

À propos de Nature Portfolio

- À propos de nous
- Communiqués de presse
- Bureau de presse
- Contactez-nous

Découvrir le contenu

- Journaux AZ
- Articles par sujet
- protocoles.io
- Indice de la nature

Politiques de publication

- Politiques du portefeuille Nature
- Accès libre

Services aux auteurs et aux chercheurs

- Réimpressions et autorisations
- Données de recherche
- Édition linguistique
- Édition scientifique
- Masterclasses sur la nature
- Solutions de recherche

Bibliothèques et institutions

- Services et outils de bibliothèque
- Portail des bibliothécaires
- Recherche ouverte
- Recommander à la bibliothèque

Publicité et partenariats

- Publicité
- Partenariats et services
- Kits médias

- Contenu de marque

Développement professionnel

- Carrières dans la nature
- Nature Conférences

Sites Web régionaux

- Nature Afrique
- Nature Chine
- Nature Inde
- Nature Italie
- Nature Japon
- Nature Moyen-Orient
- politique de confidentialité
- Utilisation des cookies
- Vos choix de confidentialité/Gérer les cookies
- Mentions légales
- Déclaration d'accessibilité
- Conditions générales
- Vos droits en matière de confidentialité dans l'État américain

© 2025 Springer Nature Limited