SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MODALITES DE GESTION DE LA PAILLE DE CANNE A SUCRE (SACCHARUM OFFICINARUM) ET LEURS EFFETS SUR LE CONTINUUM SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

(MARS 2023)

L'encadrant CIRAD : Antoine Versini
Les encadrants ISTOM : Inès Shili-Touzi et Jean-Marie Paillat

BEHIELS Zoé, BURBAN Axelle, CASSIN Cynthia, GAUTREAU Alexandre, GOUDESENNE Amand, GRADELER Margaux, GUILLAUME Marianna, LORHO Antonine, MONTANE Clémence et PICHOT Enzo

Remerciements

L'ensemble de l'équipe de la MJE TROPI souhaite tout d'abord remercier M. Antoine Versini (CIRAD, URP Recyclage et risque), Mme Inès Shili-Touzi (ISTOM, UR ADI-Suds) et M. Jean-Marie Paillat (CIRAD-ISTOM) pour nous avoir accompagné pendant la méthodologie de recherches bibliographiques et la phase d'écriture de cette synthèse bibliographique. Votre expertise et vos conseils nous ont été précieux dans notre travail.

Nous souhaitons également remercier Mme Alizé Mansuy (eRcane) pour ses orientations dans le choix des effets biophysiques liés à la gestion de la paille. Un grand merci à Mme Véronique Meynier (ISTOM), Mme Annie Boyer (CIRAD), Mme Marie-Claude Deboin (CIRAD) et Mme Chantal Salson (CIRAD) pour leurs conseils lors des recherches de références bibliographiques et leurs aides précieuses pour la prise en main des outils de recherche bibliographique : Agritrop, Web of Science et Scopus.

Enfin, nous remercions le CIRAD pour la confiance accordée à notre MJE dans la réalisation de ce travail de synthèse, et l'ISTOM pour l'organisation de l'exercice Mission Jeunes Experts (MJE).

Table des matières

Remerciements 2

Table des matières 3

Liste des figures 4

Liste des tableaux 5

Glossaire 6

Introduction 7

A. Méthodologie de recherche des références scientifiques 8

B. Statistiques bibliographiques 10

C. Synthèse 12

I. Modes de gestion de la paille 12

II. La décomposition de la paille 13

III. Effets sur la fertilité physique du sol 16

IV. Effets sur la fertilité chimique du sol 28

V. Effets sur la fertilité biologique du sol et la biodiversité 32

VI. Les effets sur les bioagresseurs 33

VII. Effets sur la production de canne à sucre et considérations socio-économiques 37

VIII. Effets environnementaux et sanitaires 41

Conclusion et recommandations 47

Références 51

Liste des figures

Figure 1 : Distribution des publications selon nos thématiques étudiées 10

Figure 2 : Dynamique spatiale des publications selon leur pays de publication 11

Figure 3 : Dynamique temporelle des publications (depuis 1991) selon leur année de publication 12

Figure 4 : Pourcentages d'augmentation des stocks de carbone organique dans le sol dans deux types de sol en fonction de la quantité de paille laissée 29

Figure 5 : Évolution des rendements en canne à sucre (coefficient) entre un système sans paillage puis avec paillage, selon différents auteurs..... 38

Figure 6 : Représentation des différentes pollutions de la canne à sucre et son environnement 41

Figure 7 : Recommandations des taux de paille à laisser au champ (%) selon les différents effets biophysiques étudiés (crédit : MJE Tropi) 49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales équations de recherche utilisées pour la recherche bibliographique 9

Tableau 2 : Pourcentage de la teneur totale de la paille dans les feuilles vertes (Menandro *et al*., 2017)..... 13

Tableau 3 : Vitesse de décomposition de la paille en fonction du taux de paille laissée au champ (Sousa *et al*., 2017)..... 14

Tableau 4 : Évolution de la concentration en carbone de la paille (Gmach *et al*., 2020). 15

Tableau 5 : Augmentation de la concentration en azote dans la paille selon le taux de paillage (Sousa *et al*., 2017)..... 15

Tableau 6 : Quantités de paille optimales par rapport aux différents effets étudiés 24

Tableau 7 : Stocks de COS à la couche 0-5 cm en fonction du taux de paillage (Gmach *et al*., 2020)..... 28

Tableau 8 : Énumération des principaux insectes ravageurs de la canne à sucre et leur tendance de développement de population et d'attaque liée à la présence d'un paillage 36

Tableau 9 : Concentration maximale des herbicides selon les systèmes avec ou sans paillis (issus de Selim *et al.*, 2003)..... 43

Tableau 10 : Flux de N2O mesurés (perte de N représentant 0,7 %) suite à des fertilisations azotées en 2016 et 2017 (Cabral *et al.*, 2020). 44

Tableau 11 : Résumé des flux annuels cumulés de gaz à effet de serre de CO2, N2O et CH4 (gCO2eq.m-2.an-1) (Cabral *et al.*, 2020) 46

Glossaire

Alisol : Sol profond *et al*téré, physiquement stable mais chimiquement pauvre (WSD).

Allochimique adjectif Se dit d'une substance phénolique hydrosoluble pouvant interférer directement avec la germination (Correia et Durigan, 2004).

COD : carbone organique dissous.

COS : carbone organique du sol.

Diaspore nom féminin Partie d'un végétal (graine, fruit, etc.) qui se détache du pied mère pour reproduire l'espèce après dissémination (Larousse).

Ferralsol : Sol enrichi en argile à forte activité, faible saturation de base et forte teneur en matières échangeables (WSD).

Indice de Fréquence de Traitement (IFT) : C'est un indicateur qui rend compte du nombre de doses de produits phytosanitaires appliqués par hectare pendant une campagne culturale (Sygenta, 2021). Pour chaque traitement réalisé sur la parcelle, l'IFT est obtenu en divisant la dose appliquée par la dose de référence du produit pour la culture et la cible (ravageur, maladie) considérées. L'ensemble est multiplié par la proportion de la parcelle traitée. (Chambres d'Agriculture Normandie)

Méthanotrophes Les méthanotrophes ont la capacité de se développer en présence de méthane (CH_4) comme seule source de carbone et d'énergie (Aquaportail).

Microbiocénose nom féminin Ensemble de la microfaune et de la microflore d'un milieu (Correia et Durigan, 2004).

Photoblastique adjectif Se dit de semences étant favorisées ou non par les conditions lumineuses et de température de l'environnement (Ferreira *et al*., 2010).

Saprophytes adjectif et nom masculin Se dit des végétaux supérieurs, des champignons et des micro-organismes qui se nourrissent de matière organique morte (Larousse).

Introduction

Avec plus de 26 millions d'hectares dédiés à la culture de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) dans le monde et plus d'1,8 milliards de tonnes de sucre produites, celle-ci constitue un pilier important dans les contextes des régions tropicales (FAOSTAT, 2021). Cette culture est aussi valorisée pour sa paille composée des feuilles, des racines et de l'apex (Gómez *et al.*, 2014) sous différentes formes.

La paille de canne à sucre est aujourd'hui au cœur de nouveaux enjeux. C'est une ressource convoitée pour la production de biocarburants et de bioénergies qui sont en plein essor (Cabral *et al.*, 2020), ou encore pour l'élevage (Augier *et al*., 2022). La paille rend également de nombreux services écosystémiques à ne pas négliger (Ranaivoson *et al*., 2017). Elle joue un rôle essentiel dans le maintien des fonctions du sol. Ainsi, son exportation de la parcelle pour divers usages pourrait poser certains risques. C'est pourquoi ce travail de synthèse bibliographique, vise à caractériser les effets biophysiques en lien avec la diversité de gestion de la paille de canne. Ces enjeux amènent à revoir la place de la paille dans les agrosystèmes comme par exemple au Brésil, où l'on observe actuellement une substitution des systèmes de gestion sous brûlis par des systèmes mécanisés. Ces systèmes augmentent la quantité de paille produite et peuvent permettre d'apporter des services écosystémiques aux parcelles cultivées grâce à un paillis. Un paillis est une couche plus ou moins épaisse de paille recourant le sol, celui-ci joue un rôle important dans la protection des fonctions pédologiques, en particulier sur les aspects physiques (Rasche, 2019).

L'exportation de la paille peut ainsi exacerber divers effets négatifs sur les parcelles de la canne à sucre, et plus spécifiquement sur la qualité physique du sol (Castioni *et al*., 2018). La gestion de la paille apparaît donc comme un enjeu majeur pour la santé des sols dans le monde. Le paillis a également des effets positifs sur les dynamiques hydriques du sol, notamment en diminuant l'évaporation et l'érosion, en favorisant l'infiltration et en augmentant le stock d'eau du sol de manière générale (Ranaivoson *et al*., 2017). Les parcelles paillées sont considérées comme plus résilientes en cas de déficit hydrique. La paille de canne étant partie intégrante du système cannier, elle interagie directement avec l'ensemble des macro et microorganismes, favorisant leur développement. Ces effets qui sont attribués à la présence de paillis sont directement liés à la diversité de pratique de gestion de la paille (en termes d'emplacement en interligne ou sur la totalité de la parcelle, les pratiques de récolte, le rendement en paille de la canne selon le précèdent cultural…). L'objectif de cette synthèse est d'analyser les effets sur le continuum sol-plante-atmosphère des différentes modalités de la gestion de la paille dans différents contextes géographiques, ainsi que de confronter les résultats des différentes études entre elles.

En effet, la plupart des études existantes sur le sujet ont été conçues pour comprendre les impacts isolés ou spécifiques du paillage sur les indicateurs du sol, la production de biomasse et l'incidence des ravageurs et des mauvaises herbes. Cependant, peu ont considéré l'ensemble des services écosystémiques du maintien du paillage sur le sol, comprenant le stockage de carbone dans le sol, le cycle des nutriments, la biodiversité du sol, le stockage de l'eau, l'érosion du sol, la production de biomasse et le contrôle des adventices, entre autres. La diversité des impacts de la paille sur le milieu et ses enjeux prouvent l'intérêt d'ajuster ses modes de gestion en fonction des différents milieux ou effets souhaités. Cela peut permettre également de fournir un appui pour la prise de décision des producteurs en lien avec les pratiques de gestion de la paille de canne à sucre. Cette synthèse est commanditée par le Cirad – UPR recyclage et risque ainsi que eRcane. Elle a pour objectif d'apporter une analyse plus précise de la variation de ces effets en prenant en considération la diversité des pratiques de gestion de la paille et la diversité des réponses des agrosystèmes à ces méthodes de gestion.

Pour la suite du document, la synthèse va s'organiser en trois chapitres, le premier concernera la démarche d'analyse mobilisée pour déterminer les études scientifiques ainsi que leurs caractérisations. Un deuxième chapitre qui permettra une analyse des effets sur le continuum sol-plante-atmosphère dans les systèmes canniers à travers des exemples internationaux et pour finir un dernier chapitre qui œuvre à la synthèse des différentes recommandations en lien avec la gestion de la paille.

A. Méthodologie de recherche des références scientifiques

L'élaboration de cette revue scientifique a nécessité de mettre en place une méthodologie de recherches bibliographiques. Pour cela, différentes équations de recherche ont été identifiées (Tableau 1) et utilisées pour cibler au mieux les articles adéquats. La sélection parmi les résultats de recherche a été faite grâce aux titres, aux mots clés et aux dates de publications des articles (*cf. partie B*-Statistiques bibliographiques). Ainsi, parmi les milliers d'articles référencés par les équations de recherche sur les plateformes Agritrop, Web of Science et Scopus, uniquement une centaine d'entre eux ont été sélectionnés (les plus pertinents pour l'étude).

Tableau 1 : Principales équations de recherche utilisées pour la recherche bibliographique

Thèmes	Equations de recherche
Décomposition de la paille	(sugarcane) AND straw* AND decomposition
Fertilité physique	(sugarcane) AND straw* AND soil structure (sugarcane) AND straw* AND soil compaction (sugarcane) AND straw* AND soil erosion
Flux hydriques	sugarcane AND (mulch OR straw) AND water availability sugarcane AND (mulch OR straw) AND soil moisture sugarcane AND (mulch OR straw) AND evaporation
Fertilité biochimique	(sugarcane) AND straw* AND carbon (sugarcane) AND straw* AND soil health
Biodiversité et lutte contre bioagresseur	(sugarcane) AND straw* AND weed* (sugarcane) AND straw* (AND insect OR pathogen*) (sugarcane) AND straw* AND (spittlebug OR coleoptera OR borer OR hemiptera OR thrips) (sugarcane) AND straw* AND (pathogen* OR bacter* OR fong* OR virus)
Production	(sugarcane) AND straw* AND (yield OR efficiency) (sugarcane) AND straw* AND product* (sugarcane) AND straw* AND biomass (sugarcane) AND straw* AND quality (sugarcane) AND straw* AND (sugar level OR sugar content)
Socio-économique	(sugarcane) AND straw* AND (working time OR labour OR quality of life at work) (sugarcane) AND straw* AND (income OR profitability OR investment OR subsidy)
Environnement et sanitaire	(sugarcane trash) AND greenhouse gases (sugarcane trash) AND residu*

Afin de regrouper l'ensemble des articles lus, nous avons utilisé un tableur Excel (support nommé : Tableau synthétique recherches bibliographiques MJE Tropi). Celui-ci est séparé en feuilles (F), chacune représentant un thème de l'étude, comme par exemple (F1 : 1-Disponibilité en eau ; F2 : 2-Spécificités physiques). Pour chaque feuille, les articles sont numérotés et résumés : le contexte et les modes de gestion sont détaillés ; les résultats et les conclusions des articles sont mis en évidence.

B. Statistiques bibliographiques

Lors de nos recherches bibliographiques, nous avons retenu au total 178 articles et revues scientifiques, classés selon différentes thématiques d'effets biophysiques de la paille de canne à sucre, leur lieu (pays) ou encore leur année de publication.

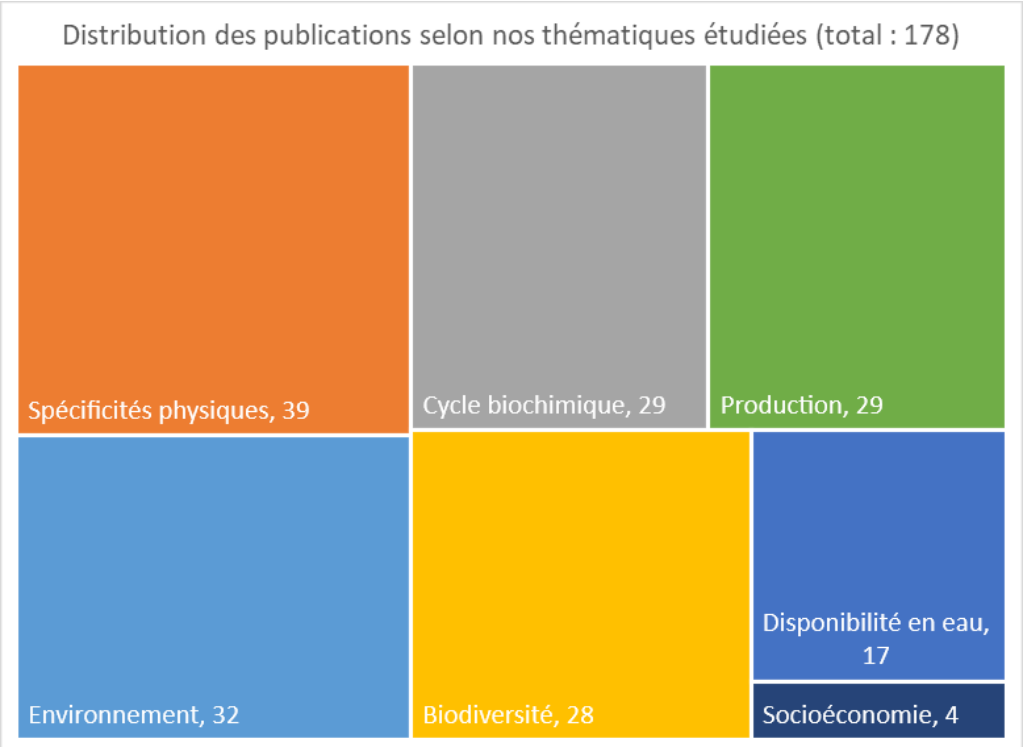


Figure 1 : Distribution des publications selon nos thématiques étudiées

Nous avons analysé des publications scientifiques traitant les effets biophysiques de la paille de canne à sucre cités sur la Figure 1. On observe une distribution du nombre d'articles relevés similaire entre les différents effets biophysiques (entre 28 et 39). Le nombre d'article est moins important sur la thématique des flux d'eau (17) et il est encore plus réduit sur les thématiques socioéconomiques (4). Ceci témoigne que la majorité des études se sont focalisées sur le continuum sol-plante-atmosphère, avec des questionnements en lien avec l'analyse des mécanismes liés au sol, la pollution et la production. En revanche, la question liée au coût de la gestion de la paille sur des indicateurs socio-économiques restent une thématique très peu abordée, pourtant les aspects coûts et disponibilité de main d'œuvre ainsi que les voies de valorisation de la paille permettent d'évaluer la performance de celle-ci.

La figure 2 montre la répartition par pays des articles scientifiques retenus. Il est à noter que la majorité des articles sont situés au Brésil avec 69,7% du total. Les autres publications citées au sein de notre synthèse sont originaires des Etats-Unis d'Amérique (7,3%), d'Australie (6,7%), de France (3,4%), d'Afrique du Sud (2,8%) et d'Inde (2,8%).

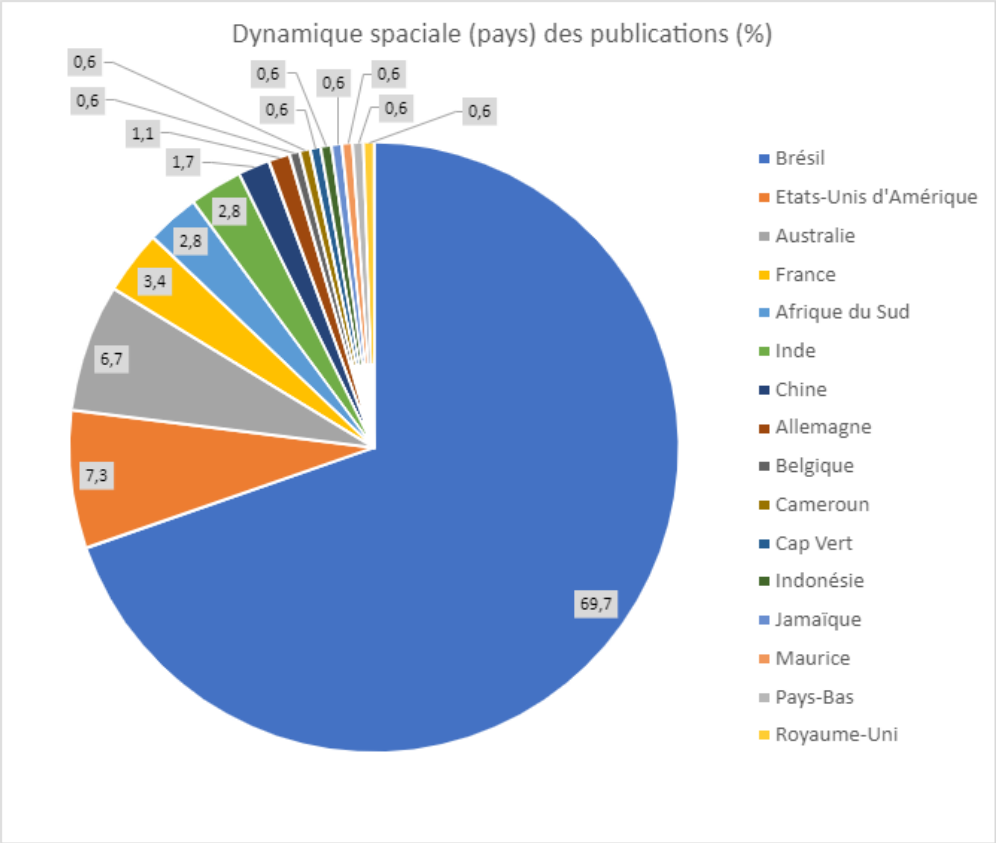


Figure 2 : Dynamique spatiale des publications selon leur pays de publication

Pour la dynamique temporelle des articles retenus (figure 3), on observe une tendance croissante de publications sur les thématiques choisies dans les années 2000, puis une forte augmentation à partir de l'année 2013. Parmi les 178 articles retenus, nous avons choisi de représenter dans la figure 3 seulement ceux à partir des années 1990, alors qu'il y a aussi des études dans notre base datant de 1962, 1973, 1982 et 1986.

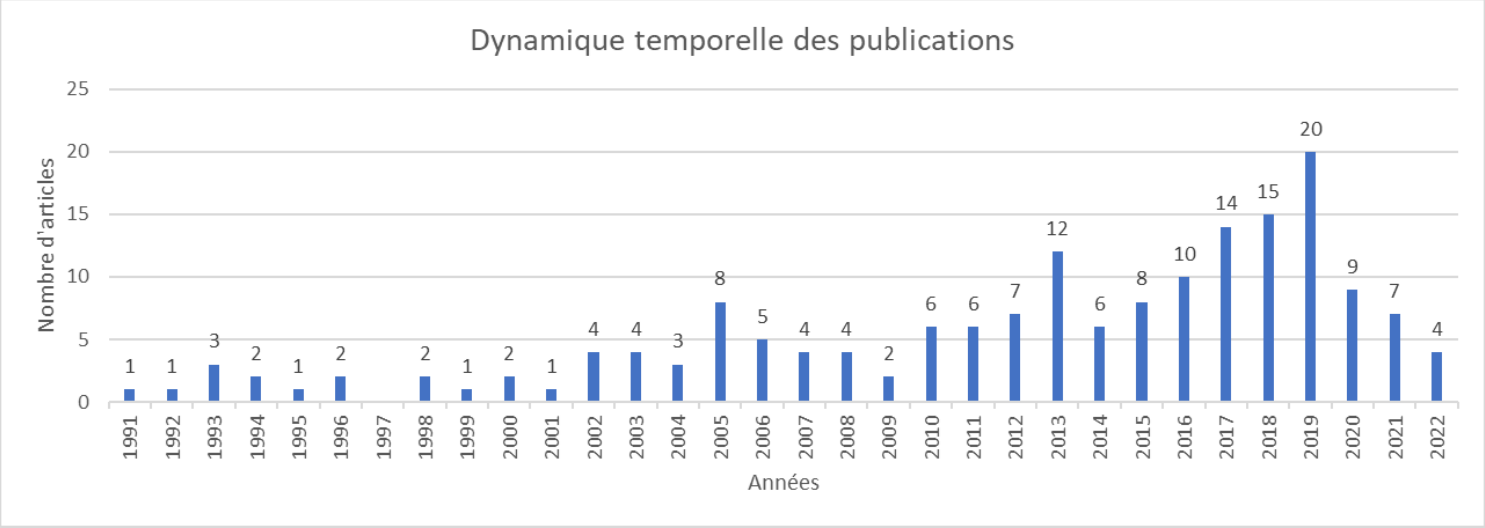


Figure 3 : Dynamique temporelle des publications (depuis 1991) selon leur année de publication

C. Synthèse

I. Modes de gestion de la paille

Lors de la lecture de l'ensemble des **178** articles retenus pour la synthèse, nous avons relevé différents modes de gestion de la paille de canne à sucre dont les spécificités sont précisées comme suit :

a) Pratiques sous brûlis : Cela consiste à brûler la paille de la canne à sucre avant la plantation d'un nouveau cycle de canne. Le résidu est transformé en cendres et laissé sur la parcelle. Dans la suite du document, les mots "brûlis" ou "brûlage" réfèrent à cette pratique.

b) Pratiques sans brûlis : Les systèmes sans brûlis sont appelés culture de « *canne verte* ». Ceux-ci produisent de la paille de la canne en quantité variant entre 10 et 20 $t.ha^{-1}$*1. Cette variation dépend de la biomasse sèche produite par la canne (feuilles, tige et apex). Lorsque cette paille est laissée au sol elle est soit fanée et répartie sur la totalité de la parcelle ou soit placée de sorte à couvrir les inter-rangs et /ou les rangs de canne.

c) Pratique d'incorporation de la paille : La paille peut être incorporée dans le sol selon les modalités de travail du sol choisies, allant du labour jusqu'au travail du sol réduit.

d) Exportation de la paille : Certains modes de gestion incluent l'exportation de la paille pour divers secteurs. La paille peut être utilisée pour l'atelier animale, la production de bioéthanol ou d'énergie. Les exportations peuvent être totales ou partielles. Généralement, les seuils étudiés sont 0%, 50% et 100% d'exportation (sol nu), avec parfois des modalités intermédiaires à 25 et 75%.

e) L'épaillage ou effeuillage manuel au cours de la culture est une pratique qui consiste à débarrasser les cannes à sucre des feuilles inférieures, cela permet de constituer ou de renouveler le paillis.

f) Les modes de récolte de la canne : Certains modes de récolte ne permettent pas de collecter la paille au champ. La culture doit être placée dans une pente douce pour permettre le passage d'engin agricoles. Par ailleurs, les coupes manuelles sans effeuillage ne produisent pas de paille.

Il est important de noter que l'ensemble des autres pratiques de gestion technique de la culture de la canne (fertilisations, d'amendements, d'herbicides ou d'insecticides) influencent aussi les effets agro-environnementaux de la paille à des degrés différents.

II. La décomposition de la paille

II.1. a. La composition de la paille

Les effets liés à la décomposition de la paille dépendent de sa propre composition (pourcentage de feuilles vertes et pourcentage de feuilles sèches). Cette différence peut influencer la gestion de l'exportation du résidu. D'après Menandro *et al*. (2017), les feuilles vertes sont six fois plus humides et ont des teneurs en nutriments plus élevées (Tableau 2) que les feuilles sèches, ce qui confèrent des propriétés de dégradations et de libération des nutriments complétement différentes.

Tableau 2 : Pourcentage de la teneur totale de la paille dans les feuilles vertes (Menandro *et al*., 2017)

Élément chimique	Azote (N)	Potassium (K)	Phosphore (P)
% de la teneur totale de la paille	61 %	75 %	78 %

D'autres éléments chimiques se trouvent en plus grande quantité dans les feuilles vertes, comme le soufre (S), le cuivre (Cu) ou le chlore (Cl) contrairement à d'autres éléments comme le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) présents en plus petites proportions. Selon les auteurs, ces différences de teneur en nutriments sont expliquées par le fait que les feuilles vertes sont un lieu de croissance et un organe puit.

Cette composition influence le rapport C:N de la paille. D'après Menandro *et al*. (2017), les rapports C:N des parties de la paille possèdent des différences. Les feuilles vertes ont un rapport C:N de 52:1 permettant une décomposition rapide. Ce rapport confère une capacité d'apport rapide en nutriments pour le sol. Il diminuera lors de sa décomposition pour s'équilibrer en humus stable (Ademe, 2014). Les feuilles vertes sont donc de bonnes sources de nutriments pour le sol.

Les feuilles sèches ont un rapport plus élevé de 130:1. La décomposition des ces éléments sera plus lente. Étant riche en cellulose et hémicellulose, les feuilles sèches peuvent être davantage exportées pour servir de biomasse à des fins de ressources énergétiques.

II.2.a La vitesse de décomposition de la paille

Sousa *et al.* (2017) ont montré que la quantité de paille laissée au champ exerce une influence sur sa vitesse de décomposition (Tableau 3).

Tableau 3 : Vitesse de décomposition de la paille en fonction du taux de paille laissée au champ (Sousa *et al*., 2017)

Paillage **en t.ha^{-1}**	3,5	7	14	21
$t_{1/2}$ **en jours**	560	402	259	262

Les résultats de cette étude, montrent qu'à partir d'un certain seuil de paille, la vitesse de décomposition ralentie. Cette diminution peut s'expliquer par une augmentation de la température entraînant la réduction de l'activité microbienne. L'apport de paille favorise l'activité microbienne par sa libération de nutriments (Portela *et al*., 2020). Les glucides (hémicellulose, cellulose) et les protéines contenues dans la paille sont consommés en premier par les microorganismes, qui constituent les espèces dégradables. Ainsi, au bout des 45 premiers jours, grâce à ces éléments chimiques facilement dégradables, 11% à 36% de la paille est décomposée. Les tanins et les lignines présents dans la paille, ne sont quant à eux, pas dégradés et s'accumulent pour stabiliser la matière organique du sol (Sousa *et al*., 2017).

La même étude a montré que les pertes de matières sèches de la paille après un an sont de 40% pour 3,5 t.ha-1 de paille laissée au champs et d'environ 65% pour 14 t.ha-1 ou 21 t.ha-1. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Pimentel *et al*. (2019) qui affirment que les pertes de matières sèches ne sont pas influencées par les taux de paille la première année. Lors de cette première année, les pertes de matières sèches sont les mêmes pour tous les taux d'extraction de la paille. Pour la deuxième année, les pertes de matières sèches sont plus élevées avec un paillis. Selon Zheng et Marschener (2017), cette différence s'explique par un effet héritage de la paille de la première année. La paille de la première année favorise l'activité biologique qui permet d'accélérer la décomposition lors du deuxième apport.

La décomposition de la paille varie également avec le travail du sol. Fortes *et al*. (2011) ont étudié deux modalités différentes :

- La paille est incorporée au sol après un labour : On observe que les pertes de matières sèches sont estimées à 72% après un an puis une stabilisation après trois ans.

- La paille est laissée sur le sol : Les pertes de matières sèches sont estimées à 45% après un an et 73% après trois ans.

II.2.b. La libération du carbone par la paille

Plusieurs études ont montré l'influence du paillage sur la décomposition du résidu. Selon Gmach *et al.* (2020), après un an de culture de canne à sucre la décomposition du carbone contenu dans la paille est plus élevée avec un apport en paille croissant : 67% pour 3 $t.ha^{-1}$ laissé au champ et 83% pour 12 $t.ha^{-1}$ laissé au champ. Les différences sont minimes au bout de deux ans entre les deux modes de gestion (70% contre 73%).

Tableau 4 : Évolution de la concentration en carbone de la paille (Gmach *et al.*, 2020).

Paillage (en $t.ha^{-1}$)	3,5	14	21
Concentration initiale en carbone (en $g.kg^{-1}$)	461	461	461
Concentration en carbone au bout d'un an (en $g.kg^{-1}$)	385	401	392

Ces résultats montrent que les concentrations en carbone dans la paille augmentent jusqu'à un paillage de 14 $t.ha^{-1}$. Cependant à 21 $t.ha^{-1}$ les concentrations diminuent laissant suggérer une libération de carbone plus importante (Tableau 4). Le travail du sol modifie les quantités de carbone libérées par la paille. Après un an, Fortes *et al.* (2012) ont observé une baisse de la concentration en carbone de 12% lorsque la paille est incorporée au sol et de 44% lorsqu'elle est laissée sur le sol. Carvalho *et al.* (2013) se sont intéressés à la libération de carbone par la paille et par les racines de la canne à sucre. La paille permet l'incorporation de 0,4 à 0,8 tonnes de carbone $ha^{-1}.an^{-1}$; pour les racines de 0,2 à 0,5 tonnes de carbone $ha^{-1}.an^{-1}$. Ainsi, les auteurs affirment qu'exporter l'ensemble de la paille ne permet pas de garantir la nutrition de la canne en carbone, l'apport des racines étant insuffisant.

II.2.c. La libération de l'azote par la paille

Sousa *et al.* (2017) ont étudié la variation de la concentration en azote dans la paille en fonction du paillage. Ils montrent que l'augmentation de la concentration en azote est proportionnelle aux taux de paillage (Tableau 5).

Tableau 5 : Augmentation de la concentration en azote dans la paille selon le taux de paillage (Sousa *et al.*, 2017)

Paillage **en $t.ha^{-1}$**	3,5	7	14	21
Augmentation de la concentration en azote dans la paille	126 %	105 %	123 %	146 %

Pimentel *et al.* (2019) ont montré que la minéralisation de l'azote de la paille est plus importante avec des taux de paille élevés. Fortes *et al.* (2012) ont estimé pour 10 $t.ha^{-1}$ de paille laissée au sol une libération de 12,7 $kg.ha^{-1}$ d'azote. En 2017, ils ont remarqué des différences pour la libération d'azote en fonction du travail du sol : la libération d'azote est de 68% lorsque la paille est incorporée dans le sol ; elle n'est plus que de 31% lorsque le résidu est laissé au champ.

Concernant les autres éléments minéraux, la libération des éléments chimiques par 10 $t.ha^{-1}$ de paille après trois ans a été estimé à 43,1 $kg.ha^{-1}$ de potassium et à 0,7 $kg.ha^{-1}$ de phosphore. Ainsi, les besoins nutritifs de la canne à sucre seraient couverts à 50% (Fortes *et al.*, 2012).

II.2.e. Le rapport C : N de la paille après sa décomposition

Le mode de gestion de la paille a une influence selon Fortes *et al.* (2012). Selon eux, le rapport C:N est de 70:1 après quatre ans avec une incorporation de la paille dans le sol. Ce rapport est plus élevé avec une valeur de 108:1 pour le cas d'un sol paillé. Sousa *et al.* (2017) ont montré que pour un rapport C:N initial de la paille de 108:1, il diminue 40:1 au bout d'un an d'étude quel que soit le taux de résidu laissé au champ. Cette réduction est due à la perte en carbone sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) et à l'enrichissement en éléments azotés de la paille par la décomposition.

III. Effets sur la fertilité physique du sol

Dans cette partie, il est question de traiter les effets de la gestion de la paille sur le sol d'un point de vue (i) physique (flux hydrique, structure, érosion, compaction) ; (ii) chimique (pH, éléments chimiques comme le carbone ou l'azote) et (iii) biologique spécifiquement sur la macrofaune du sol.

III. 1. Impacts sur les propriétés physiques du sol :

- *Lien avec la matière organique :*

Le paillage favorise à moyen et long terme la présence de la matière organique en surface. Il augmente la stabilité des agrégats dans le sol et favorise une résilience structurelle plus élevée des sols (Six *et al.*, 2000 ; Satiro *et al.*, 2017). Cela réduit la nécessité des opérations d'hersage et de travail du sol comme le labour (Braunbeck *et al.*, 2014).

Dans le système de canne sous brûlis, on observe des niveaux inférieurs de matière organique, dû au brûlage. Cependant, il a été trouvé que dans des systèmes de culture de la canne en vert, la teneur en matière organique ne diffère pas à une profondeur de 20 à 30cm, dans un sol Ferralitisol. (Souza *et al.*, 2005), corroborant les données de Mendonza *et al.* (2000).

- *La perméabilité :*

D'après Totale *et al.* (2008), le paillage améliore la perméabilité du sol. Et selon Castioni *et al.* (2018), des valeurs plus élevées de la microporosité du sol sont observées dans une profondeur de 0 à 20cm avec un taux de paille laissé en champ supérieur à 66%. Les valeurs de la macroporosité pour les parcelles ayant un faible ou une absence de prélèvement dans les couches de 0 à 20cm ne sont pas significativement différentes. Enfin, d'après Deeb *et al.* (2021), l'application de paillis peut également affecter positivement la distribution de l'air et de l'eau dans le sol, ce qui devrait à son tour influencer l'activité microbienne.

- *La taille des agrégats :*

Les agrégats présentent un diamètre important dans le système de canne en vert en comparaison avec le brûlis. Cette différence est principalement due à la présence de résidus organiques à la surface du sol, qui se décomposent sous l'action de microorganismes. Selon Hamza et Anderson (2005), cette décomposition entraîne la formation de nombreux composés lors de la cimentation et de la stabilisation des granulats. De plus, les diamètres les plus importants de ces granulats (entre 0,50 et 4,00 mm) sont positivement corrélés avec l'augmentation du stock de carbone dans la couche 0 à 20cm. L'augmentation du stock de carbone dans le sol participe donc à l'amélioration de la structure du sol. Ainsi, le maintien de la paille de canne à sucre au sol favorise l'augmentation des macro-agrégats qui favorisent la restructuration du sol (Guimaraes *et al.*, 2018).

Ces conclusions sont confirmées par Castioni *et al.* (2018). Cette étude montre une réduction d'agrégation du sol dans la couche de 10 à 20 cm, suite à quatre années de prélèvement de la paille.

Le maintien de la paille de canne à sucre en surface favorise l'augmentation de l'agrégation des sols et de la stabilisation du carbone organique (Guimaraes *et al.*, 2018).

- *La densité du sol :*

D'après Castioni *et al.*, (2018) l'exportation de la paille affecte les valeurs de la densité apparente du sol, avec un indicateur plus élevé pour les taux de paille inférieurs à 33% par rapport aux traitements comprenant un taux de paille sur champ supérieur à 66%.

Selon Lisboa *et al.*, (2018c), la densité apparente du sol n'est pas affectée par les taux d'enlèvement de la paille (jusqu'à 100%) des sols sableux, alors que l'enlèvement total de la paille réduit les scores de densité apparente dans les profondeurs de 5 à 20 cm des sols Ferralitiques.

- *La stabilité du sol :*

La stabilité globale du sol, est un élément comprenant plusieurs variables : la matière organique, les agrégats, ainsi que leur taille. En effet, Souza *et al* (2005) ont observé une plus grande stabilité à une profondeur de 0 à 10 cm dans le système de canne à sucre en vert en comparaison avec la canne à sucre en vert sans présence de paille et avec la canne à sucre brûlée.

Selon Deeb *et al.*, (2021), le retrait total de la paille est la variable qui a le plus distingué les pratiques de gestion du sol parmi la pratique de la canne en vert, le brûlage, la présence de résidus dispersés et de la fertilisation minérale sur la structure du sol. Ce facteur influence l'intensité des forces cohésives totales qui lient les particules constitutives du sol en macro et micro-agrégats. Cette stabilité est plus élevée dans les parcelles paillées et non fertilisées (Emerson *et al.*, 1986).

- *Amélioration globale de la qualité physique du sol :*

Selon les résultats de Guimaraes *et al.* (2018), le système canne à sucre sans brûlis et avec récolte mécanisée présente la meilleure structure de sols par rapport aux autres systèmes de gestion ([canne à sucre avec brûlis * récolte manuelle] et [canne à sucre avec brûlis * récolte mécanisée]).

Concernant les sols type Ferralitisols, l'exportation de 100 % de la paille diminue les scores des attributs physiques du sol dans les profondeurs de 5 à 20 cm tandis que les quantités restées au champ de 100 et 50 % améliorent l'indice de qualité du sol à toutes les profondeurs mesurées : 0 à 30 cm. Concernant les sols sableux, l'enlèvement total de la paille n'influence pas l'indice de la qualité du sol quel que soit la profondeur. L'étude constate que les effets à court terme de l'enlèvement de la paille de canne à sucre sont spécifiques au type de sol (Lisboa *et al.*, 2018c). Les résultats suggèrent que l'extraction de la paille cause une réduction plus significative de la qualité du sol pour les sols sableux (Satiro *et al.*, 2017).

Les scores globaux indiquant la qualité physique du sol suggèrent que les sols argileux et sableux sont à 34 et 55% en dessous de leur potentiel le plus élevé dans la couche 0-30 cm, sous l'effet de l'enlèvement total de la paille (Lisboa *et al.*, 2018c).

Deeb *et al.*, (2021) indiquent que le rendement élevé de la canne à sucre et la préservation de la structure du sol peuvent de nouveau être atteints en appliquant le paillage ainsi qu'une fertilisation, à condition que la quantité d'engrais soit minime pour compenser la perte de nutriments. De plus, l'apport d'engrais minéral semble accentuer les effets du brûlage, alors que l'absence d'apport accentue légèrement les effets du paillage, ce qui suggère que l'effet du paillage est plus fort en l'absence de fertilisation (Deeb *et al.*, 2021).

- *Recommandations des systèmes :*

En comparaison avec d'autres systèmes, la culture en canne en vert avec maintien de la paille au champ est celui qui impacte le moins la structure du sol. Il présente des valeurs plus élevées de matière organique, une meilleure stabilité des agrégats, une plus grande macroporosité et une teneur supérieure en eau dans le sol (Souza *et al.*, 2005).

De même avec Castioni *et al.*, (2018), indiquant que la meilleure qualité structurelle du sol est associée aux parcelles ayant un maintien de la paille de 100%.

III.2. Risque de compaction

D'après Silva *et al.* (2019) et Segnini *et al.* (2013), le compactage du sol est un problème très répandu dans les systèmes de culture mécanisés de la canne à sucre. Satiro *et al.* (2017), affirment que les fonctions physiques du sol peuvent être réduites à 58% de leurs capacités, réduisant leurs fertilités et limitant ainsi le développement des plantes. La principale cause du compactage des sols agricoles est le passage de machines dans la préparation du sol, le semis, les traitements culturaux et les opérations de récolte (Totale *et al.*, 2008). La circulation intense de machines entraîne une plus grande surface de sol piétinée provoquant un compactage du sol. À long terme, il réduit la qualité physique du sol et sa capacité à résister à l'érosion (Carvalho *et al.*, 2013).

La paille de canne peut aider le sol à résister aux phénomènes de compaction. Elle présente des caractéristiques mécaniques telles qu'une faible densité, de l'élasticité, la susceptibilité aux chocs et à la déformation. Ces propriétés permettent de dissiper une partie des pressions appliquées au sol, comme celles exercées par les machines agricoles (Braida *et al.*, 2006).

À long terme, on observe que la microfaune se développe, ce qui favorise l'aération du sol, limite sa compaction et le rend plus résilient (Braunbeck *et al.*, 2014).

Certaines études comme Cherubin *et al.* (2021) ont observé que la compaction augmente avec la présence de paille pour les sols meubles. Cependant, elle réduit l'augmentation de la densité apparente dans les sols fortement compactés. Cette étude souligne aussi une atténuation du compactage par le paillage de la canne à sucre : une réduction d'environ 5 % dans la déformation du sol précédemment compacté en raison de la présence de plus de 10 $t.ha^{-1}$ de paille. Le scénario trouvé pour le sol meuble se déformant sous un niveau de stress élevé semble être plus réaliste dans les champs de canne à sucre au début du cycle de la plante.

Ces expériences révèlent que l'enlèvement intensif de la paille favorise la compaction du sol, dégradant ses fonctions physiques ; en outre, il existe des relations significatives entre un taux d'enlèvement de la paille plus élevé et la dégradation physique du sol, créant un cercle vicieux de dégradation du sol.

Le maintien d'une quantité adéquate de matière organique dans le sol stabilise la structure du sol, le rend plus résistant à la dégradation (Cochrane et Aylmore, 1994 ; Thomas *et al.*, 1996), et diminue sa densité apparente et sa résistance (Sparovek *et al.*, 1999).

Les mécanismes suivants identifiés par Hamza et Anderson (2005) montrent que la dégradation de la paille de canne influence la structure et la compactibilité du sol : elle lie les particules minérales du sol (Thisdall et Oades, 1982 ; Zhang, 1994) ; elle réduit la mouillabilité des agrégats (Zhang et Hartge, 1992) et elle influence sur la résistance mécanique des agrégats du sol, qui est la mesure de la cohérence des liens inter-particulaires.

D’après l’expérience menée par Cherubin *et al.* (2021), la contrainte apparente de pré-compression augmente d’environ 15 kPa (c'est-à-dire une augmentation de 7 %) pour un sol paillé par rapport à un sol non paillé. Ainsi, les modèles ajustés indiquent que la plus grande quantité de paille de canne à sucre (c'est-à-dire 20 $t.ha^{-1}$) augmente légèrement la contrainte apparente de pré-compression par rapport à la quantité de paille la plus faible (5 $t.ha^{-1}$), et cet effet semble être plus important pour les sols compacts que pour les sols meubles.

Malgré cet effet tampon de la paille, l’étude montre que l'augmentation de la quantité de paille en surface est probablement insuffisante pour réduire le risque de compactage (peu de gain en capacité de charge apparente). Elle permet cependant une réduction d'environ 5% de la déformation du sol.

D'un point de vue pratique, cette augmentation de 15 kPa constitue un gain qui reste considérablement faible. Cela révèle que les effets de la paille sur la capacité de charge semblent jouer un rôle négligeable sur l'augmentation de la résistance du sol au compactage causée par la circulation des machines, en comparaison avec l'ampleur de la contrainte appliquée par des véhicules supérieure à 600 kPa (Silva *et al.*, 2019 ; Júnnyor *et al.*, 2019 ; Jimenez *et al.*, 2021). Les résultats de Cherubin *et al.* (2021) corroborent les données rapportées par Holthusen *et al.* (2018), qui observent que la présence de résidus de culture (céréales d'hiver) dans un sol sans labour conduit à une réduction de la propagation du stress. Malgré cela, les résidus de culture ne provoquent pas de changements significatifs dans la contrainte apparente de pré-compression.

Pour l’étude de Deeb *et al.* (2021), les parcelles paillées semblent avoir un sol significativement moins compacté que les autres traitements (non paillé). La résistance à la pénétration du sol est inversement proportionnelle à la teneur en eau du sol (Imhoff *et al.*, 2001). Dans la canne à sucre en vert avec et sans incorporation de paille, il y a une plus grande rétention d'eau par rapport à la canne à sucre brûlée, dans laquelle il y a moins d'infiltration d'eau et des valeurs plus élevées de densité et de matières organiques dans le sol. Ainsi, la paille peut réduire les risques de compactage du sol. Par conséquent, les effets de cette ressource dans l'atténuation des forces de pression générées par le passage des machines en mouvement sont significatives. Cependant, l’étude conclue que les bénéfices directs de la paille sont probablement insuffisants pour réduire le risque de compaction du sol (Souza *et al.*, 2005).

D'après cette même étude, l'effet à long terme de la paille sur la prévention du compactage du sol serait plus intense dans les sols sans labour et bien structurés, comme pour les cas des sols sous production céréalière (Moraes *et al.*, 2019).

Enfin, Hamza et Anderson (2005) recommandent d’augmenter la matière organique du sol par le maintien de la paille, et l'ajout de matières organiques végétales ou animales provenant de sources externes. Elles sont également importantes pour diminuer la densité apparente du sol et pour agir comme un tampon, réduisant la transmission de la compaction du sol.

III. 3. Flux hydriques

L'utilisation ou non de résidus de culture de la canne à sucre sur la parcelle impacte les dynamiques hydriques du sol de nombreuses manières, en lien avec d'autres propriétés des sols telles que sa structure et sa texture (Lisboa *et al.*, 2018b).

- *Evaporation*

Concernant les dynamiques hydriques, l'impact le plus largement observé de la paille laissée au champ concerne l'évaporation. Le paillis limite l'évaporation (Awe *et al*., 2014 ; Adetoro *et al*., 2020 ; Corrêa *et al*., 2019 ; Carvalho *et al*., 2019 ; Tominaga *et al*., 2002) par deux phénomènes. Tout d'abord, la couche de paille est une barrière physique qui bloque les rayonnements du soleil (Lal, 2008a ; Peres *et al*., 2010 ; Corrêa *et al*., 2019 ; Santos *et al*., 2021). Ensuite, il a été montré que le paillis maintient le sol à une température plus basse et limite les variations importantes de températures au cours de la journée (Moitinho *et al*., 2013 ; Corrêa *et al*., 2019 ; Santos *et al*., 2021 ; Awe *et al*., 2015). Par exemple, d'après Ranaivoson *et al.* (2017), à partir de 8 $t.ha^{-1}$ de paille, l'évaporation diminue de 30% par rapport à un sol nu. D'après Tominaga *et al*. (2002), le taux d'évaporation de l'eau du sol peut être réduit de 25 % dans les zones couvertes à 75 % de paille. Pour Peres *et al.* (2010), la couverture du sol par 15$t.ha^{-1}$ de paille de canne à sucre réduit la perte d'eau de moitié par rapport à un sol non couvert, dans la couche de 0 à 20 cm. Ainsi, en limitant l'évaporation, le paillage augmente le stock d'eau disponible dans le sol. On peut remarquer que l'effet du paillis sur l'évaporation est proportionnel à la quantité de paille laissée au champ.

- *Infiltration*

Il a également été largement montré que le paillage améliorait l'infiltration de l'eau dans le sol (Valim *et al.*, 2016 ; Cheong et Teeluck, 2016 ; Gmach *et al*, 2019 ; Ranaivoson *et al.*, 2017 ; Adetoro *et al.*, 2020). Ranaivoson *et al.* (2017) ont montré un doublement de la quantité d'eau infiltrée dans le sol par rapport à un sol nu à partir de 2 $t.ha^{-1}$ de résidus. Malgré des résultats dispersés dans cette revue de littérature, une tendance générale de l'augmentation du taux d'infiltration de l'eau dans le sol est mise en avant, proportionnelle à la quantité des résidus laissés au sol. Ainsi, une couverture totale du sol permet une multiplication par quatre de l'infiltration d'eau dans le sol par rapport à un sol nu.

Pour Gmach *et al.* (2019), la quantité d'eau drainée du sol nu est inférieure de 30 % à celle d'une parcelle avec paillis. D'après cette même étude, le maintien de la paille à la surface du sol favorise le drainage de l'eau vers les couches profondes. Leurs résultats montrent que dans un Ferralsol, 6 $t.ha^{-1}$ de paille à la surface du sol (correspondant à 50% d'exportation) est suffisant pour maintenir un niveau de drainage adéquat pour les couches profondes du sol. En revanche, pour Lustosa Carvalho *et al.* (2022), c'est le traitement avec seulement 5$t.ha^{-1}$ de paille qui obtient le meilleur score de l'indice de service écosystémique pour la fonction concernant l'infiltration et le mouvement de l'eau, devant des systèmes avec 10 et 15t de paille par ha. Pour Cheong et Teeluck (2016), un drainage accru est observé sous la couverture de résidus pendant les événements pluvieux. Le drainage cumulé pendant une période humide de quatre mois pour l'un des sites d'étude s'élève à 43 et 240 mm respectivement pour les traitements sans et avec couverture du sol.

Ces résultats peuvent être mis en lien avec une meilleure structure du sol obtenue dans des systèmes paillés notamment grâce à un apport carbone (*cf. IV.1. Le carbone du sol*), mais dû également à une compaction moindre. D'après Franzluebbers (2015), Braida *et al.* (2006) et Brady et Weil (2002), la paille assure une barrière physique qui limite l'impact des gouttes de pluie sur le sol ainsi que celui du passage des machines. (*cf. III.2. Risque de compaction*). Cela évite la compaction, favorisant ainsi la macroporosité du sol et par conséquent l'infiltration de l'eau. De la même manière, d'après Adetoro *et al. (*2020)**,** Blanco-Canqui et Lal (2008b) et Ranaivoson *et al.* (2017), le paillis limite le ruissellement de l'eau à la surface sur les parcelles en pente (concomitante à la perte des agrégats du sol par érosion). Des quantités de résidus de 1,5 à 4,5 $t.ha^{-1}$ peuvent réduire le ruissellement de l'eau d'environ 50 % par rapport au sol nu. L'efficacité avec laquelle les résidus de surface atténuent le ruissellement de l'eau augmente avec la quantité de résidus (Ranaivoson *et al.*, 2017). Cet effet sur l'érosion est approfondi dans le paragraphe III.4. (*cf. Risque érosif*).

- *Stock d'eau du sol*

Une évaporation limitée et une infiltration de l'eau dans le sol facilitée sont les deux critères majoritaires qui influencent la disponibilité en eau dans le sol. D'après la littérature étudiée, la pratique du paillage augmente le stock d'eau dans le sol (Tominaga *et al*., 2002 ; Awe *et al.*, 2014 ; Corrêa *et al.*, 2019 ; Gmach *et al.*, 2019), son humidité (Santos *et al*., 2021 ; Cheong et Teeluck, 2016) et donc sa disponibilité pour la culture (Lustosa Carvalho *et al.*, 2022 ; Anjos *et al.*, 2017). Selon Awe *et al.* (2014), l'effet du paillis est statistiquement significatif dans toutes les couches du sol pendant les deux saisons de croissance, un stock d'eau plus élevé est obtenu dans les parcelles paillées. Pour Tominaga *et al*. (2002), pendant les quatre premières semaines après la récolte et durant une période de faibles précipitations, les essais avec paillis (mais également avec les résidus brûlés) ont obtenu des teneurs en eau du sol significativement plus élevées que pour un sol nu. Elles sont de 0,296 et 0,304$m^3.m^{-3}$ pour les parcelles paillées et de 0,284$m^3.m^{-3}$ avec les résidus brûlés par rapport à 0,223$m^3.m^{-3}$ pour le sol nu.

Les bénéfices du paillage sont d'autant plus importants en sol sableux spécifiquement en périodes sèches et chaudes, en condition de stress hydrique subit par la culture (Santos *et al.*, 2021). À l'inverse, dans l'étude de Lustosa Carvalho *et al.* (2022) menée sur six mois, on remarque que la paille n'a pas d'impact positif sur les sols argileux déjà trop altérés. De même, pour Corrêa *et al.* (2019), le paillis a un impact plus réduit sur un sol avec un potentiel de rendement plus faible par rapport à un sol plus fertile avec une grande capacité de rétention en eau. D'après Gmach *et al.* (2019), les effets du paillage dépendent également de la période de récolte de la canne. En effet, ils rapportent que si la canne est récoltée plutôt en début de saison, alors le besoin en paille est plus élevé pour obtenir les mêmes bénéfices par rapport à une récolte plus tardive.

- *Variabilité des résultats*

Malgré un consensus général sur les bienfaits du paillis sur les dynamiques hydriques du sol et la disponibilité en eau pour la culture, certains résultats ne vont pas dans ce sens. Dans les parcelles avec la totalité de la paille laissée au champ ou avec une faible exportation de la paille, Santos *et al.* (2021) observent une légère diminution de l'humidité du sol dans la couche 20-40cm pour les sols argileux. Les sols argileux peuvent avoir un écoulement plus lent à des profondeurs plus faibles car l'eau dans les micropores du sol est fortement retenue par les particules d'argile. Ils observent également que le paillage peut diminuer la disponibilité en eau de la culture dans un système avec irrigation par pivot central, car la couverture du sol intercepte une partie de l'eau apportée par l'irrigation (Adetoro *et al.*, 2020).

- *Recommandations*

Au niveau de la quantité de paille minimum à laisser au champ afin d'obtenir les meilleurs résultats sur les flux d'eau, les différents articles obtiennent des quantités et pourcentages propres à chaque étude (Tableau 6). Un pourcentage qui semble rassembler les études est celui de 50% de la paille produite à laisser au champ. Pour Anjos *et al.* (2017) et Aquino *et al.* (2017a), cela correspond à 9,5t.ha^{-1}. D'après Gmach *et al.* (2019), si la canne est récoltée tardivement, 50% de la paille suffisent (ici cela correspond à 6t.ha^{-1}), si l'on est sur une récolte plus précoce alors il faut laisser plus de 50% au champ. Corrêa *et al.* (2019) recommandent quant à eux de laisser au champ la totalité de la paille produite. Pour une limitation optimale de l'évaporation, Peres *et al.* (2010) recommandent une quantité de 15t.ha^{-1}, Tominaga *et al.* (2002) préconisent de laisser 75% de la paille au champs et Ranaivoson *et al.* (2017), 8t.ha^{-1}. Au niveau des effets sur l'infiltration, le ruissellement et l'érosion, ils estiment que 2t de paille par hectare sont suffisantes pour obtenir des bénéfices significatifs.

Tableau 6 : Quantités de paille optimales par rapport aux différents effets étudiés

Etudes	Effets étudiés	Quantité de paille optimale	Type de sol
Anjos *et al.*, 2017	Disponibilité en eau	50% (9,5 $t.ha^{-1}$)	Limon-sableux
Aquino *et al.*, 2017a	Disponibilité en eau	50% (9,5 $t.ha^{-1}$)	Ferralsol
Gmach *et al.*, 2019	Stock d'eau dans le sol	50% (6$t.ha^{-1}$) et plus	Ferralsol
Tominaga *et al.*, 2002	Évaporation	75% de la paille produite	Argileux
Corrêa *et al.*, 2019	Évaporation et humidité du sol	100% de la paille produite	Sols limon-sableux et argileux
Ranaivoson *et al.*, 2017 (review)	Évaporation	8t. ha^{-1}	-
Ranaivoson *et al.*, 2017 (review)	Infiltration, ruissellement et érosion	2$t.ha^{-1}$	-
Peres *et al.*, 2010	Évaporation	15$t.ha^{-1}$	-

Ce tableau met en avant la quantité de paille optimale selon les effets étudiés. On s'aperçoit que pour chaque effet, une quantité d'au moins 50% de paille est optimale.

III.4. Risque érosif

Dans la littérature étudiée, l'érosion dans les champs de canne à sucre est corrélée au taux de couverture du sol. Filho *et al.*, (2009) ont rapporté que 50 à 100% de couverture du sol (c'est-à-dire 7 et 14 $t.ha^{-1}$ de paille) augmente l'infiltration de l'eau et, par conséquent, réduit le taux d'érosion de 68 et 89 %, respectivement, par rapport au sol nu.

D’après Silva *et al*. (2019), les sols de canne à sucre sont très sensibles à l'érosion, particulièrement en raison du travail du sol effectué pour la plantation pendant la saison des pluies. La plupart des études sur l'érosion du sol sont liées aux méthodes de récolte et aux résidus laissés sur le sol après la récolte (Thomaz *et al.*, 2022).

Dans une autre étude, Paula *et al.* (2016) visent à quantifier la perte d'argile et de phosphore soluble adsorbé par l'érosion, influencée par la présence de résidus de canne à sucre à la surface du sol. Les sédiments érodés sont enrichis par l'argile et le phosphore. Ce sont les conséquences d'une érosion qui transporte de préférence les particules aux petits diamètres et de faible densité (Martins Filho *et al.*, 2009). L'efficacité de la couverture du sol pour réduire l'érosion et indirectement la perte du phosphore est observée par Sousa *et al.* (2012). Ils ont évalué les pertes de matière organique et de nutriments du sol dans une zone de culture de canne à sucre, soumise à une récolte mécanique, en utilisant des parcelles avec différents pourcentages de couverture. Ils concluent que dans les parcelles avec 75 % et 100 % de couverture, les pertes par érosion étaient significativement réduites.

• Protection du sol :

D'après Totale *et al.* (2008), le maintien des résidus à la surface du sol améliore la résistance du sol contre l'agressivité des gouttes de pluies et l'énergie de transport des eaux de ruissellement. La quantité et la qualité des résidus de récolte dans le système de récolte sans brûlage permettent une protection efficace de la surface du sol. A contrario, la quantité des résidus du système de récolte après brûlage ne permet pas une aussi bonne protection de la surface du sol. Le sol sans protection est plus vulnérable.

La litière augmente également la rugosité de la surface du sol et diminue la vitesse de ruissellement des eaux de pluies (Smolikowshi *et al.*, 1998). Ainsi, la présence des résidus de récolte réduit l'énergie de l'eau, réduisant ainsi l'intensité des processus érosifs (Rocha Junior *et al.*, 2016 ; Silva *et al.*, 2012).

Braunbeck *et al.* (2014) expliquent que le processus d'érosion et d'interaction de la paille avec l'eau ainsi que les particules du sol se déroule en deux phases successives :

- Ameublissement, entraînement et dépôt. Dans la première phase, l'ameublissement des particules de sol agrégées résulte de l'impact des gouttes d'eau et de l'action de l'écoulement superficiel de l'eau.

- Dans une deuxième phase les particules ameublies peuvent rester près de l'agrégat ou être transportées par l'eau courante.

Le paillage intervient donc dans les deux phases du processus d'érosion, dans la première phase la paille va absorber l'énergie cinétique des gouttes de pluie et dans la deuxième phase, elle réduit la vitesse de l'écoulement superficiel et retient le déplacement des particules.

Silva (2005) utilise un simulateur de pluie sur des sols argileux, avec une pente de 9,5%, afin d'analyser l'effet des pertes de couverture du sol. Il en résulte que l'augmentation du pourcentage de couverture entraîne une réduction accentuée des pertes en sol, devenant très faible lorsque la couverture approche 100 % de la surface du sol.

• Stabilisation du sol :

Le paillis favorise l'augmentation de l'agrégation des sols et de la stabilisation du carbone organique dues aux changements de gestion de la canne à sucre, ce qui permet de réduire indirectement les effets de l'érosion (Guimaraes *et al.*, 2018). De même, Filho *et al.* (2009) ont rapporté que 50 à 100% de couverture du sol (c'est-à-dire 7 et 14 tonnes de paille par hectare) augmente l'infiltration de l'eau et, par conséquent, réduit le taux d'érosion de 68 et 89 %, respectivement, par rapport au sol nu.

• Comparaison des systèmes de cultures :

Paula *et al.* (2016) ont observé que l'augmentation de la couverture de la surface du sol a provoqué une diminution exponentielle du taux d'érosion entre les rigoles, ainsi que de la concentration en sédiments. Avec 100% de couverture, il y a 0,25 g de sédiments du sol transportés par litre d'inondation, tandis que pour le sol nu la valeur est de 9,03 $g.L^{-1}$. En plus on observe une augmentation proportionnelle de la résistance à l'écoulement évaluée par le coefficient de rugosité de Manning (n). Cette résistance réduit la concentration de sédiments dans l'eau de ruissellement. Ces résultats sont corroborés par Martins Filho *et al.* (2009), qui ont développé des études utilisant différentes conditions de couverture en sol argileux cultivé avec de la canne à sucre, en gardant la paille à la surface du sol. Ils concluent qu'en utilisant une couverture du sol, les pertes de sol par érosion sont réduites de 87% par rapport à celles d'un sol nu.

La récolte de canne verte sans récupération de la paille montre des taux d'érosion plus faibles et des teneurs en carbone organique du sol plus élevées par rapport à la méthode traditionnelle de brûlis (Diego, 2019). Cherubin *et al.*, (2019), montrent une diminution de 60% de l'érosion du sol par rapport à la canne à sucre brûlée sur un cycle de 5 ans. Thomaz *et al.* (2022) ont comparé les pertes physiques du sol entre la canne à sucre verte avec une récolte mécanisée comprenant une déperdition de 5,9 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. Avec le système de la canne à sucre brûlée et en récolte manuelle, la perte du sol est de l'ordre de 8,8 $t.ha^{-1}.an^{-1,}$ soit une augmentation de 49 % en perte de matériaux pédologiques. Pour Totale *et al.*, (2008), les parcelles avec des masses de résidus de canne supérieures à 8 $t.ha^{-1}$ présentent des quantités de résidus suffisantes pour maîtriser le ruissellement et l'érosion.

Castioni *et al.*, (2018) concluent que l'enlèvement partiel de la paille (en laissant environ $10t.ha^{-1}$ à la surface du sol) à des fins bioénergétiques peut être une stratégie appropriée pour assurer la durabilité de la production de bioénergie au Brésil, sans altérer de manière significative la qualité physique et biologique du sol. Cependant, d'après Diego (2019), les quantités de paille exportées doivent également être adaptées au type de sol.

Enfin, d'après Thomaz *et al.* (2022), en règle générale, un taux d'application de paillage de 6 à 8 $t.ha^{-1}$ a été recommandé pour réduire les pertes d'eau (évaporation) et de sol. Li *et al.* (2021) signalent que 8 $t.ha^{-1}$ réduisent les taux de perte de sol de 52%. Une utilisation accrue de machines agricoles pourrait augmenter les processus d'érosion du sol, même pour les sols ayant une teneur en eau et une couverture de paille élevée (Li *et al.*, 2021).

IV. Effets sur la fertilité chimique du sol

IV.1. Le carbone du sol

- *L'influence de la paille sur les stocks de carbone dans le sol :*

La gestion des résidus peut avoir un impact sur les stocks de carbone organique du sol (COS). De nombreuses études montrent que l'augmentation de la paille laissée au champ favorise les stocks de carbone. D'après Leite *et al.* (2018), la paille impacte de manière significative les stocks de COS avec des valeurs de carbone plus importantes dans les parties supérieures du sol. Portela *et al*. (2020) ont également observé ces résultats. Ils montrent qu'une couverture de 13,04 et 18,38 $t.ha^{-1}$ de paille augmente le taux de carbone dans le sol. Gmach *et al.* (2020) ont mesuré les stocks de carbone au niveau de la couche 0-5 cm (Tableau 7) et ont montré que les taux d'exportation de la paille influencent les résultats.

Tableau 7 : Stocks de COS à la couche 0-5 cm en fonction du taux de paillage (Gmach *et al*., 2020)

Paillage **en $t.ha^{-1}$**	0	3	6	12
Stock de COS à la couche 0-5 cm (tonnes de carbone par hectare).	16.6	17.5	17.7	18.4

D'après Lisboa *et al.* (2018b), un système sans couverture réduit les stocks de COS à la couche 0-5 cm. Des valeurs contrastées ont été trouvées par Cherubin *et al.* (2020), avec des changements de valeurs de stocks de carbone uniquement pour 42% de leurs sites expérimentaux. Ils ont tout de même noté un épuisement du carbone pour une exportation totale de la paille.

Des différences entre les sols sur les stocks de COS ont été mesurées par plusieurs auteurs. D'après Tenelli *et al.* (2019), les valeurs de carbone varient à une profondeur de 0-30 cm soit entre 13,3 à 29,4 $g.kg^{-1}$ pour un sol limoneux argileux et entre 1,9 et 7,8 $g.kg^{-1}$ pour un sol sableux. L'exportation de la paille réduit les stocks de COS à la profondeur 0-5 cm et induit un épuisement total des stocks dans les couches supérieures du sol. D'autres différences ont été observées entre les types de sol par les mêmes auteurs (Tenelli *et al.*, 2021). Les sols sableux sont plus sensibles à l'exportation que les sols argileux. Après quatre ans, une exportation totale, élevée et faible ont réduit les stocks de carbone de 18% à 48% par rapport à une couverture totale à la couche 0-10 cm. Ces valeurs étaient de 6% à 21% pour la couche 0-20 cm. Pour la couche entre 0-30 cm, cette réduction se porte entre 16% et 19% entre une exportation totale et nulle. Dans un sol argileux, les auteurs remarquent une baisse de 13% entre l'exportation totale et nulle à la couche 0-10cm. A la couche 0-30 cm, cette différence est de 11% entre ces mêmes taux d'exportation. Ainsi, les sols argileux sont moins sensibles à l'exportation de la paille puisque les sols à textures fines ont une forte capacité de sorption des surfaces minérales (Dieckow *et al.*, 2009). D'après Tenelli *et al.* (2019), après six ans, chaque tonne de paille laissée au sol a retenu 95 kg de carbone par hectare dans un sol argileux et 55 kg de carbone par hectare dans un sol sableux. Ces valeurs varient pour l'étude de Tenelli *et al.* (2021) avec 109 kg de carbone par hectare pour un sol argileux et 85 kg de carbone par hectare pour un sol sableux après quatre ans.

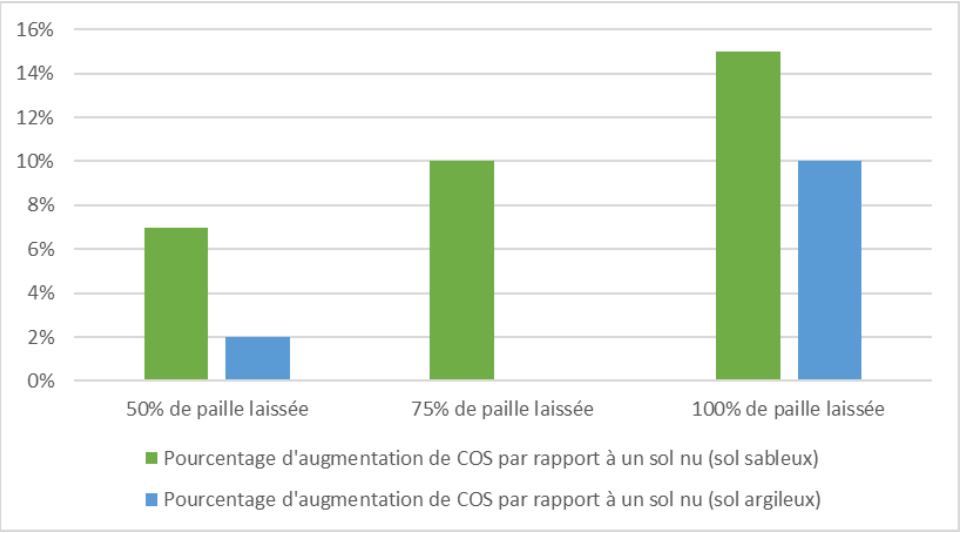


Figure 4 : Pourcentages d'augmentation des stocks de carbone organique dans le sol dans deux types de sol en fonction de la quantité de paille laissée

- *Le carbone organique dissous :*

La paille joue un rôle dans les valeurs de carbone organique dissous (COD). Elle a une influence uniquement dans la couche 10-40 cm. Ceci est justifié par le phénomène du lessivage, ce qui explique que la non prise en compte de la couche entre 0 et 10 cm (Leite *et al.*,2018). Selon Gmach *et al.*, (2020), l'exportation totale de la paille impacte les taux de COD dans la couche 0-20cm. À partir de 20 cm de profondeur, les disparités entre les taux de paille laissée au champ s'amenuisent. Les différences de COD dans les couches inférieures montrées par Leite *et al.* (2018) sont déterminantes pour la qualité du sol puisque ce carbone peut se stabiliser (Froberge *et al.*, 2007).

- *La matière organique stable :*

L'influence de la paille sur la matière organique stable a été mesurée par Leite *et al.* (2018). La teneur en acides fluviques et en acides humiques fluctuent en fonction du taux de paille dans les couches supérieures du sol. En ce qui concerne les teneurs en humines, elles sont influencées par la paille dans toutes les couches du sol. Une augmentation de ces trois parties de la matière organique montre une hausse des éléments stables et récalcitrants, induisant une minéralisation ralentie (Canellas *et al.*, 2003).

- *L'influence du travail du sol*

Le travail du sol présente des différences sur les stocks de COS. Tenelli *et al.* (2019) ont montré pour un sol sableux, une différence de 3,1 $g.kg^{-1}$ entre un travail du sol réduit sans export de paille et un travail du sol avec une élimination totale de la paille. Pour un sol argileux, cette différence s'élève à 3,7 $g.kg^{-1}$.

Dans un sol sableux, aucune différence n'est observée entre les taux d'exportation avec un travail du sol. Au contraire, dans un système à travail du sol réduit, les stocks de carbone sont inférieurs avec un enlèvement total de la paille et modérés en comparaison avec un enlèvement réduit. Pour un sol argileux, un travail réduit sans exportation a des valeurs de stocks de carbone supérieures de 5,8 $t.ha^{-1}$ par rapport à un travail réduit et une exportation totale de la paille. (Tenelli *et al.*,2019)

- *L'influence des modes de culture*

Les modes de culture influent sur les stocks de COS, notamment entre une gestion de la canne à sucre avec brûlis et sans brûlis. Ils diminuent lorsque la canne subit un brûlis avant la récolte (Souza *et al.*, 2012). Le brûlage influence le taux de carbone labile dans le sol : il est de 74% avec brûlage et 54% sans brûlage, soit une plus grande valeur de carbone récalcitrant. Le brûlage affecte également la vie du sol, puisque la biomasse microbienne est de 162,7 $mg.kg^{-1}$ pour le système en brûlis et de 328,5 $mg.kg^{-1}$ pour un système en canne verte. Cela démontre ainsi que les résidus laissés au sol permettent d'apporter de meilleures conditions favorables pour la vie microbienne (Souza *et al.*,2012).

IV.2. Les nutriments du sol

- *Teneur en azote dans le sol*

Les résidus de canne à sucre peuvent avoir des effets sur la disponibilité en éléments chimiques tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Les teneurs en azote ont été influencées par la paille. Zheng et Marschener (2016) ont montré qu'après trois ans d'incorporation de la paille dans le sol, la récupération de l'azote par les résidus était de 5,9%, 1,6% et 6,3% pour chaque année. Dans le cas d'un paillage au sol, ces pourcentages sont de 7,3%, 2,5% et 8,7%. La baisse lors de la deuxième année s'explique par des conditions météorologiques peu favorables (pluviométrie et température moins élevées), impactant l'activité microbienne (Stanford *et al.*, 1973) et induisant une baisse de la décomposition (Torres *et al.*, 2005). La récupération moyenne de 7,5% pour les deux modes de gestion de la paille induit une baisse du C:N des déchets due à l'immobilisation de l'azote par les microorganismes (Jadhav, 1996). Ce pourcentage représente 2,1% des besoins en azote de la canne à sucre. Bien que ce pourcentage soit faible après trois ans, Vallis *et al.*, (2006) ont montré qu'après vingt ans, la paille laissée au champ pourrait économiser 40 $kg.ha^{-1}.an^{-1}$ d'engrais azoté grâce à la minéralisation à long terme. Le mode de récolte aurait des effets sur la teneur en azote dans le sol. Selon Suma et Savitha (2015), la teneur en azote augmente de 3% après trois ans de culture en l'absence de pratique de brulis. Selon ces auteurs, le pourcentage faible d'augmentation est dû au rapport C:N de la paille élevé, qui entraînerait une prolifération de microbes.

- *Teneur en phosphore dans le sol*

Plusieurs études ont montré que la paille présente des effets sur la teneur en phosphore dans le sol. D'après Cherubin *et al.* (2020), l'exportation de la paille a conduit à une diminution des teneurs en phosphore après quatre ans dans un sol argileux et sableux. D'après Ball-Coelho *et al.* (1993), le phosphore du paillis est mieux assimilé par la culture parce qu'il protège le sol de la dessiccation et permet la prolifération des racines à la surface du sol. L'abondance des racines sous le paillis entraîne une absorption importante de phosphore de la couche supérieure du sol et de la couche de paillis par la culture. La paille favorise également l'immobilisation du P dérivé des résidus et du sol dans des formes organiques. Une étude s'est intéressée aux changements qu'apporte la paille sur les différentes fractions du phosphore après six ans. D'après Soltangheisi *et al.* (2021), les fractions de phosphore labile pour la couche 0-20cm sont plus élevées de 2,8 et 2 fois plus pour 5 $t.ha^{-1}$ de paille laissée au sol que pour 10 $t.ha^{-1}$ et 0 $t.ha^{-}1$. Pour ce dernier taux, une carence en phosphore est observée après les six cycles de culture. Les fractions non labiles n'ont subi aucune influence par le changement de taux de paille. Cette donnée indique que le phosphore présent dans la paille ne migre pas dans des parties du sol non disponibles pour les plantes. Cependant, Sousa *et al.* (2012) n'ont remarqué aucune différence entre les taux d'élimination de la paille sur les taux de teneurs en phosphore. Suma et Savitha (2015) ont trouvé qu'après trois ans, les teneurs en phosphores assimilables sont plus faibles dans le cas d'un système avec brulis.

- *Teneur en potassium dans le sol*

La teneur en potassium dans le sol est influencée par le taux d'exportation de la paille. Cherubin *et al.* (2020) ont montré une légère baisse de la teneur en potassium échangeable lors de l'exportation totale de la paille dans un sol argileux et sableux après quatre années de culture. Des résultats contraires sont relevés par Sousa *et al.* (2012), qui ont remarqué une diminution de la teneur en potassium avec l'augmentation du couvert en terrain pentu. Bertol *et al.* (2007) explique que cette baisse est due à la perte en potassium lors de l'érosion du sol. L'influence du type de sol est notifiée par Lisboa *et al.* (2018b) qui trouvent que le potassium dans un Alisol baisse davantage que dans un Ferralsol lors d'une exportation de paille. De plus, les modes de récolte influent sur les quantités de potassium. Suma et Savitha (2015) ont montré que la pratique de brulis réduit la disponibilité en potassium dans le sol après trois ans d'études.

- *Acidité du sol*

D'autres changements biochimiques dans le sol sont référencés dans la littérature sur la gestion de la paille. Le pH du sol a été étudié par Lisboa *et al.* (2018b) qui ont montré que l'exportation totale de la paille réduit l'indicateur dans la couche 5-10 cm dans un Ferralsol. Cependant, Cherubin *et al.* (2020) ont montré aucun changement de pH à la suite d'un paillage sur un sol argileux et sableux. Le mode de gestion du sol semble avoir une influence sur l'indicateur puisque Souza *et al.* (2012) ont remarqué une augmentation du pH lorsque la parcelle n'essuie pas de brûlage avant la récolte. Les auteurs n'ont trouvé aucune différence de capacité d'échanges cationiques entre les deux systèmes.

Les valeurs d'éléments chimiques sont influencées par les modes de gestion de la paille. Sousa *et al.* (2012) ont trouvé des résultats différents selon le taux d'exportation de la paille : des pertes de calcium sont recensées sous 0% et 25% de couverture du sol, comparées à des couvertures de 50, 75 et 100%. Le mode de gestion de sol induit des changements puisque Souza *et al.* (2012) ont montré que les teneurs dans le sol du calcium et du magnésium augmentent avec un système sans brûlage.

- *L'indice de la qualité chimique du sol*

Les effets de la paille sur le sol peuvent être remarqués, notamment sur l'indice de la qualité du sol, comprenant le pH, les teneurs en phosphore ou le carbone organique du sol. Différentes études sont menées pour déterminer l'évolution de cet indice avec l'exportation de la paille. Une exportation excessive de la paille pendant quatre années réduit l'indice sur la moitié des sites expérimentaux, tandis que les exportations faibles ou modérées ne réduisent pas la qualité du sol (Cherubin *et al.*, 2020). Lisboa *et al.* (2018b) ont également montré des différences entre les taux d'enlèvement de la paille sur un Ferralsol. Les auteurs montrent qu'entre 0-5 cm, une exportation totale réduit l'indice de qualité du sol. Un enlèvement total de la paille réduit de 4% et 8% l'indice de qualité du sol par rapport à un taux de couverture, respectivement, de 8 $t.ha^{-1}$ et 15 $t.ha^{-1}$. Au niveau de la couche 5-10 cm, les écarts sont de 3% et de 5%. Les changements de l'indice varient selon le type du sol. Cherubin *et al.* (2020) ont montré qu'après quatre ans pour un sol sableux, l'exportation totale de la paille réduit l'indice de 9% et d'entre 6 et 7% pour un sol argileux.

V. Effets sur la fertilité biologique du sol et la biodiversité

L'apport de paille contribue à la biodiversité "positive" de la parcelle de canne à sucre, et améliore l'ensemble du système, en termes de santé, nutrition et qualités physico-chimiques du sol. Menandro *et al.* (2019) ont conclu que le traitement sans exportation de paille induit une meilleure qualité du sol en améliorant l'humidité, le nombre de macropores, la teneur organique du sol et sa fertilité, ce qui conduit à une plus grande abondance de la plupart des organismes du macrofaune.

Au contraire, le retrait total de paille conduit à une plus grande compaction du sol et diminue l'abondance de macrofaune. En effet, la couche de paille fournie un refuge accru pour les microarthropodes, car elle modifie les conditions de micro-habitat et peut améliorer la diversité de prédateurs/proies dans les sols des agrosystèmes (Langellotto et Denno, 2004). La disponibilité accrue des ressources fournie par le paillis est souvent bénéfique pour la microfaune (Manwaring *et al.*, 2018). La population de vers de terre est quant à elle grandissante avec l'augmentation de la quantité de paille laissée sur le sol (Menandro *et al.* 2019). Pour la pratique du brûlis, Araújo *et al.* (2005) observent l'augmentation des espèces de coléoptères et autres arthropodes suite au passage du feu, qui sont attirés par la disponibilité en nourriture en termes de moisissures et autres déchets des sols brûlés.

Concernant les microorganismes du sol, la rétention de paille améliore la diversité α (alpha), la structure du réseau et la communauté fongique, tout en réduisant les agents pathogènes du sol et augmentant la proportion de saprophytes sur l'ensemble du profil du sol (Zhang *et al.* 2021). Morais *et al.* (2019) ont notamment observé l'augmentation de présence bactérienne et fongique après un an de maintien de paille au sol, mais après deux ans, un nombre de bactéries, archées et champignons plus élevés dans la couche de 0 à 5 cm de sol avec un retrait modéré de paille (50%). Effectivement, pour Pimentel *et al.* (2019), le retrait de 50% de paille permet de dynamiser la décomposition générale du paillis, l'occupation de niches des microbes du sol, l'interaction microbienne et la compétition la plus faible dans le système. Dans le cas d'un retrait total de la paille, il y a une altération de l'abondance de l'ensemble des microorganismes (Morais *et al.*, 2019), mais une augmentation de bactéries spécialistes et une réduction de bactéries généralistes concernant la décomposition de la paille (Pimentel *et al.*, 2019). D'autre part, lors d'un paillage, l'activité et la diversité microbienne sont stimulées par l'apport de paille et sont plus importantes dans la couche arable que dans le sous-sol (Zhang *et al.* 2019). La présence du paillis crée les conditions idéales pour l'installation d'une microbiocénose dense et diversifiée dans la couche de surface (Correira et Durigan, 2004). En effet, le paillis a non seulement amélioré les propriétés physicochimiques du sol et les activités enzymatiques, mais il a également enrichi les taxons bactériens impliqués dans la décomposition de la lignocellulose et le cycle des nutriments (C, N et P) dans tout le profil du sol (Zhang *et al.* 2019).

- *La biomasse microbienne*

Leite *et al.* (2018) ont montré que la paille a des effets sur la biomasse microbienne. Le résidu de la canne à sucre augmente la biomasse microbienne dans les parties plus profondes du sol. Cette augmentation résulte de cette influence car la paille favorise les conditions de développement des microorganismes (Araujo *et al.*, 2013). On observe un accroissement de la biomasse microbienne sous 18,38 $t.ha^{-1}$ de paille laissée au champ, ainsi que pour l'azote minéralisé sous 13,04 $t.ha^{-1}$ et 18,38 $t.ha^{-1}$. Ces résultats traduisent une plus grande activité microbienne. Ainsi, l'accroissement de la paille permet davantage d'immobiliser le carbone par les microorganismes (Portela *et al.*, 2020).

VI. Les effets sur les bioagresseurs

VI.1 Les adventices

Le paillage des parcelles de canne après récolte est couramment effectué à travers le monde comme moyen de contrôle des adventices. L'usage du brûlis, aujourd'hui peu pratiqué, entraîne une série d'inconvénients pour l'environnement en détruisant une partie de la faune et de la flore, ce qui, à long terme, implique l'altération du système productif cannier (Araújo *et al.*, 2005). La quantité de paillis appliquée à la surface du champ est un paramètre important dans la répression des mauvaises herbes. D'après Hoshino *et al.* (2017) et Monquero *et al.* (2007), l'augmentation du niveau de paille entraîne une suppression proportionnelle des adventices. Ils ont observé que les paillis à 15 $t.ha^{-1}$ et 20 $t.ha^{-1}$ ont la plus grande suppression d'adventices. Lorenzi (1993) pour sa part, a mentionné que l'entretien de 12 $t.ha^{-1}$ de paillis fourni le meilleur contrôle des mauvaises herbes. D'un autre côté, le retrait de paille provoque une augmentation de la levée d'adventices par rapport au système couvert, due à un réveil de dormance (Correia et Durigan, 2004). De plus, la paille laissée au sol provoque des dégâts physiques et biologiques sur la culture, pouvant entraîner la sélection positive ou négative de la communauté d'adventices (Gravena *et al.*, 2009).

- *Effets physiques du paillis sur la germination des adventices*

Le paillage engendre des modifications physicochimiques internes au système cannier, entraînant la survie ou la suppression des adventices selon les espèces. D'après Pitelli (1995), l'effet physique du paillis peut réduire les chances de survie de certaines mauvaises herbes à faibles quantités de réserves dans les diaspores. Le paillis permet aussi de réduire l'amplitude de la variation thermique, principalement dans les 0-5 cm du sol. Il diminue la variation de l'humidité de la couche supérieure du sol, ce qui peut interférer de façon décisive dans la germination de nombreuses espèces (Ferreira *et al.*, 2010). Le paillis permet également de limiter l'émergence d'adventices en réduisant la pénétration de la lumière jusqu'au sol. Une grande quantité de paille sur le sol permet la réduction de la germination de semences positives photoblastiques comme *Sida rhombifolia* et *Merremia cissoides* (Correia et Durigan, 2004), nécessitant une longueur d'onde particulière ou une variation de température. Cependant, Ferreira *et al.* (2010) observent aussi l'apparition de nouvelles espèces dans le système, sous l'influence de la réduction de lumière : les plantes photoblastiques négatives, telles que *Euphorbia heterophylla* et *Ipomoea hederifolia* (Correia et Durigan, 2004), qui ne dépendent pas de la lumière, ni des variations de température.

- *Effets chimiques du paillis sur la croissance des adventices*

Le paillage a aussi un impact chimique sur la flore adventice de la canne à sucre. Le processus de décomposition de la paille à la surface du sol libère des substances phénoliques hydrosolubles (acide férulique, acide vanillique et acide synringique) appelées allochimiques, pouvant interférer directement avec la germination, l'émergence et le développement de certaines mauvaises herbes (Correia et Durigan, 2004). Selon Sampietro et Vattuone (2006), la paille non brûlée dans un sol biotique est plus inhibitrice que dans un sol abiotique sur la croissance des adventices. Enfin, les résidus en décomposition rapide ont un pouvoir allélopathique intense mais de courte durée, tandis que ceux en décomposition lente ont une action allélopathique sur une plus longue période (Almeida, 1991). Cette activité dépend directement de la quantité et de la qualité du paillis, mais aussi de nombreux facteurs tels que le type de sol, l'activité microbienne, l'environnement, les conditions climatiques et les conditions du travail du sol.

- *Effets sur les pratiques de lutte : la réduction de l'usage des herbicides*

Dans une dynamique de réduction d'intrants, le paillage est un moyen de contrôle vertueux des adventices. Il rend possible la réduction à la dépendance aux herbicides, et permet de limiter la dégradation de l'environnement tout en améliorant la qualité du sol dans les champs (Ferreira *et al.*, 2011). L'efficacité des herbicides diminue à mesure que la quantité de paille augmente, jusqu'à un plateau entre 15 $t.ha^{-1}$ et 20 $t.ha^{-1}$, où l'on observe aucune différence d'efficacité de contrôle entre les différents traitements de paillage, avec ou sans herbicides (Velini et Negrisoli, 2000 ; Monquero *et al.*, 2007). Ceci s'explique par une forte interception de l'herbicide par la paille, pouvant représenter près de 99,5% de la solution appliquée. Velini et Negrisoli (2000) montrent aussi l'impact négatif de l'interaction paille/herbicide dû à la formation de micro-canaux de drainage formés par l'apport de paille sur le sol : ceux-ci facilitent la lixiviation des herbicides et augmentent la contamination des nappes phréatiques.

VI.2 Ravageurs et maladies

- *Ravageurs*

Les différents modes de gestion de la paille de canne entraînent aussi des effets sur la présence des ravageurs dans les champs de canne (Tableau 8). Pour la gestion en brûlis, l'ensemble des études confirme la prévalence de l'impact négatif du feu sur la communauté d'invertébrés et la difficulté de son rétablissement, sauf pour les ravageurs venant des zones non brûlées à proximité. Ces insectes ravageurs se réfugient aussi dans les cinq premiers millimètres du sol pendant le feu, où la température y est basse (Araújo *et al.*, 2005).

Pour ce qui est de *Diatraea saccharalis* (pyrale de la canne à sucre), sa population augmente plus rapidement en zone paillée que dans les zones brûlées, cependant on ne recense quasiment aucune trace d'attaque sous-système paillé. Le brûlage des champs de canne reste néfaste pour les ennemis naturels de *D.saccharalis*, entraînant un déséquilibre biologique (Dinardo-Miranda et Fracasso, 2013).

Hardev *et al.* (2011) ont observé que les dommages causés par *Elasmopalpus lignoselus* (petite pyrale du maïs) étaient plus faibles dans les parcelles couvertes de résidus de paille par rapport aux parcelles nues. Bennett (1962) explique que le paillis offre des conditions défavorables et augmente l'humidité du sol. Ces conditions inhibent le dépôt d'œufs et augmentent la mortalité larvaire de *E.lignoselus*. De plus, il y a un plus grand nombre d'ennemis naturels dans les champs avec couverture que dans les champs à sol découvert.

En revanche, les populations de *Telchin licus* (foreur géant) peuvent augmenter dans les zones de paillage, principalement en raison de la difficulté à lutter contre ce ravageur.

Mahanarva fimbriolata (crachoir des racines) est lui très dépendant de l'humidité et de la chaleur du sol, des conditions requises pour le bon développement de ses nymphes. Celui-ci s'est répandu dans les cultures de canne avec paillage (Dinardo-Miranda et Fracasso, 2013). Les pics d'attaques de *M.fimbriolata* sont observés dès l'augmentation des quantités de paille au sol. L'exportation de la paille réduit ses populations d'environ 85%, ce qui reste insuffisant pour écarter les autres pratiques de contrôle (Castro *et al*., 2019).

La paille favorise également les dégâts causés par *Sphenophorus levis* (sphénophore). Le brûlis est efficace contre ce ravageur. Le retrait de la paille n'influence pas la population de *S.levis* mais réduit les dégâts sur les plants de canne à sucre. Les dommages de *S.levis* sont plus élevés en sol argileux que sableux, et avec des quantités de paille plus importantes (Castro *et al*., 2019).

Dinardo-Miranda et Fracasso (2013) observent aussi la présence de *Migdolus fryanus* dans les parcelles paillées mais que la population de *Hardya tenuis* ne change pas en présence de paille.

Pour les nématodes, il y a une diminution des populations liée à l'augmentation de la matière organique due au dépôt de paille, ce qui permet la croissance d'autres microorganismes qui affectent les nématodes. De plus, des substances nématicides sont libérées lors de la décomposition de la paille, c'est pour ces raisons que la densité de population de nématodes diminue avec la profondeur (Dinardo-Miranda et Fracasso, 2013).

Meloidogyne javanica et *Pratylenchus zeae* sont retrouvées en plus grande quantité avec l'incorporation de résidus de culture, mais sept mois après paillage, les populations de *P.zeae* sont plus faibles dans un sol préalablement paillé que dans un sol sans couverture.

Enfin, *Helicotylenchus dihystera* et *Rotylenchulus parvus* ne sont pas affectés par la présence d'un paillis (Stirling *et al.*, 2011).

Tableau 8 : Énumération des principaux insectes ravageurs de la canne à sucre et leur tendance de développement de population et d'attaque liée à la présence d'un paillage

(1=Augmentation des dégâts, 2=Attaque régulée, 3=Baisse des dégâts)

Ordre	Famille	Espèce	Nom vernaculaire	Effet du paillage sur la population
Lepidoptera	Crambiae	*Diatraea saccharalis*	Pyrale de la canne à sucre	2
Lepidoptera	Pyralidae	*Elasmopalpus lignoselus*	Petite pyrale du maïs	3
Lepidoptera	Castniidae	*Telchin licus*	Foreur géant	1
Hemiptera	Cercopidae	*Mahanarva fimbriolata*	Crachoir des racines	1
Hemiptera	Cicadellidae	*Hardya tenuis*	Cicadelle	2
Coleoptera	Curculionidae	*Sphenophorus levis*	Sphénophore	2
Coleoptera	Cerambycidae	*Migdolus fryanus*	Coléoptère	2

- *Pratiques de contrôle et de lutte*

Le paillage crée un apport de biodiversité général dans le système cannier, attirant généralement plus de ravageurs mais aussi d'autres espèces pouvant naturellement contrôler ces populations de ravageurs. C'est le cas des Formicidae qui peuvent agir comme des prédateurs de plusieurs espèces de ravageurs de la canne à sucre (Souza *et al.*, 2010). En effet, les espèces *Pheidole sp.35*, *Crematogaster sp.7* et *Dorymyrmex brunnens* sont considérées comme les prédateurs majeurs de *D.saccharalis* car elles se nourrissent de leurs œufs, larves mais aussi d'insectes adultes (Oliveira *et al.*,2012 ; Souza *et al.*, 2010).

Pour les nématodes phytoparasitaires, un paillis peut diminuer leur abondance dans le sol (Manwarning *et al.*, 2018). Pour le contrôle de *M.fimbriolata*, des solutions contenant des nématodes *Heterorhabditis sp*. et *Steinernema sp*. connus pour être virulents contre ce ravageur, sont appliquées à un paillis. *Heterorhabditis sp.* régule 74% des insectes. Le champignon *Metarhizium anisopliae (Metsch) Sorokin* a aussi été efficace contre *M.fimbriolata* (Leite *et al.*, 2005). Stirling *et al.* (2011) ont aussi observé des oomycètes *Myzocytium* parasiter et limiter la présence de nématodes libres. Enfin, le paillage peut entraîner une augmentation de l'abondance des acariens prédateurs, notamment des *Mesostigmata*, ce qui peut réduire le nombre de nématodes nuisibles et d'insectes ravageurs (Manwarning *et al.*, 2018).

D'autres pratiques de contrôle des ravageurs sont efficaces et peuvent être mises en place. C'est le cas de la fertilisation au silicate, qui améliore la résistance aux différents stress, augmente la résistance physique de la canne en épaississant la couche de cuticule et en durcissant le tissu végétal. Cette fertilisation est une méthode de lutte efficace contre les attaques de *Scirpophaga excerptalis* (foreur supérieur blanc de la canne à sucre). La canne à sucre absorbe plus de silicium que n'importe quel autre nutriment (jusqu'à 380 $kg.ha^{-1}.an^{-1)}$. Ainsi le compost de riz est plus efficace pour la résistance de la canne contre *S.excerptalis* (Rahardjo *et al.*, 2020). Leite *et al.* (2005) ont aussi noté que l'insecticide chimique thiamethoxan (Actara 200 WG) à 1 $kg.ha^{-1}$ et appliqué à un paillis a fortement réduit la population de *M.fimbriolata* (67%).

VII. Effets sur la production de canne à sucre et considérations socio-économiques

La gestion du paillage des parcelles de canne à sucre est étudiée dans une perspective d'évaluer les avantages et les contraintes agronomiques que cette pratique peut engendrer. Ces effets agronomiques ont une répercussion sur les performances agronomiques de la canne, et donc sur les rendements en quantité de tige, quantité de paille, mais aussi sur sa qualité industrielle (richesse en sucre).

VII.1 Rendement en canne

La majorité des études ont montré que les rendements sont plus élevés avec présence de paille (Figure 5), mais certains ont aussi trouvé que la paille gênait la production de biomasse cannière (Carvalho *et al.*, 2016). Ball-Coelho *et al.* (1993) observent une augmentation de 43% du rendement en canne à sucre lorsqu'elle est cultivée sous paillis. Resende *et al.* (2006) concluent que le maintien de la paille permet une augmentation de 28% de la production de tiges sur 12 ans. Avec le même raisonnement, l'exportation totale ou de 75% de la paille du champ réduit la production de canne à sucre d'environ 47% selon Aquino *et al.* (2017b). L'export important de paille provoque des pertes de rendements cumulées allant jusqu'à 10% pour Bordonal *et al.* (2018b). Oliveira *et al.* (2016) ont souligné que l'enlèvement de paille peut entraîner des pertes de rendements d'environ 5 $t.ha^{-1}.an^{-1}$. La gestion des parcelles par brûlage réduit la productivité de la culture de 49% (Aquino *et al.*, 2017b).

Au contraire, un certain nombre d'études font état d'une réduction de rendement avec paillage, allant jusqu'à 16% de la production finale (Campos, 2010 ; Awe *et al.*, 2015). Le brûlage de la paille peut aussi être associé à une augmentation du rendement en tige (Wiedenfeld, 2009 ; Arceneaux et Selim, 2012).

Dans de nombreuses études, le fait d'enlever 50% de la paille (10 t.ha^{-1}) est suffisant pour améliorer la croissance des plantes et augmenter la production de 47% (Aquino *et al.*, 2017b). Pour Lisboa *et al.* (2018a), le rendement augmente de 29% en laissant 50% de paille au champ (entre 4 et 9 t.ha^{-1}), par rapport à un système en brûlis. Pour Aquino et Medina (2014) et Aquino *et al.* (2017b), le maintien de 50% de paille (10 t.ha^{-1}) suffit à développer la masse des racines de la canne, augmentant ainsi le rendement en tiges.

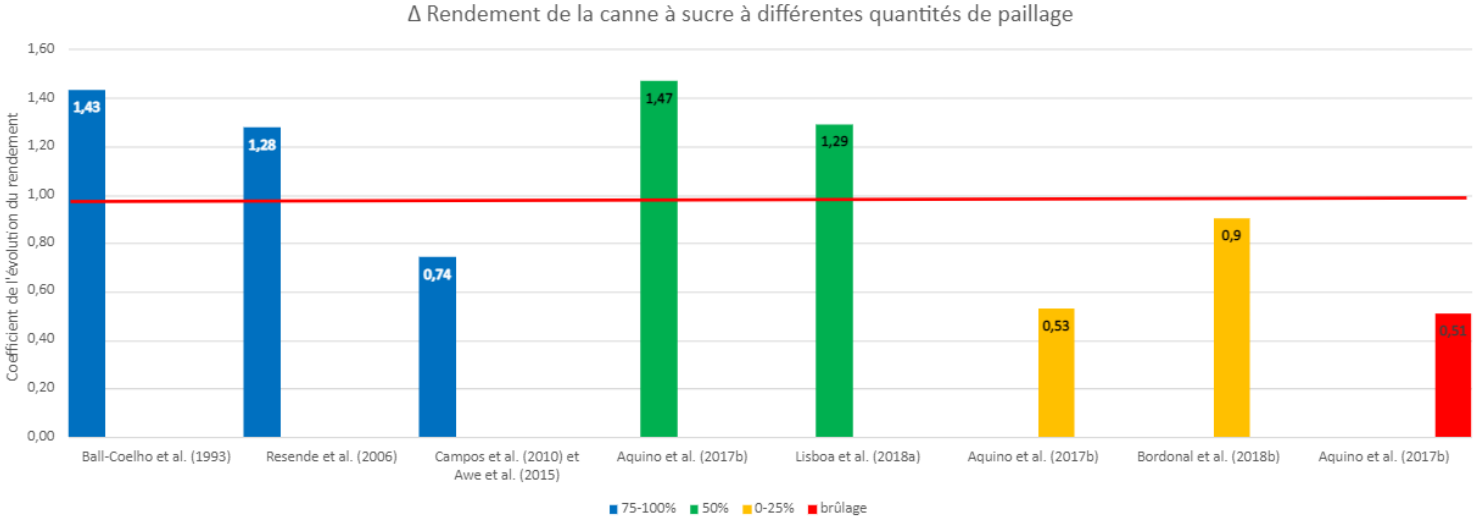


Figure 5 : Évolution des rendements en canne à sucre (coefficient) entre un système sans paillage puis avec paillage, selon différents auteurs.

Satiro *et al.* (2018) expliquent que le rendement en tige et en paille peut être prédit en utilisant les données des attributs du sol, à 0-20 cm (volume de sol exploré par le système racinaire). En effet, les valeurs de carbone (C), Magnésium (Mg), Potassium (P), Calcium (Ca), de pH, de pénétration et de densité apparente, expliquent entre 47 et 58% du rendement en tiges. Les valeurs d'Azote (N), Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Potassium (P) et de résistance expliquent 42% du rendement en paille. Lisboa *et al.* (2019) observent une corrélation entre la qualité du sol et le rendement pour un Ferralsol, mais pas pour un Alisol. Shukla *et al.* (2022) ont étudié l'inoculation du paillis avec une solution de *Trichoderma* dilué à 1/100 de CFU 1010. Le paillage avec *Trichoderma* améliore l'absorption de NPK, ce qui influence l'activité physiologique de la canne, sa photosynthèse et induit indirectement une augmentation des rendements en canne. Un travail du sol réduit avec une couverture modérée (50%) peut être durable en termes de système de production (Tenelli *et al.*, 2019).

Dans le même registre, les résultats de Vallis *et al.*, (1996) montrent que le passage à un système paillis entraîne une augmentation rapide des niveaux de carbone dans le sol et des taux de minéralisation de l'azote. Après 50 ans, les taux de minéralisation de l'azote et les niveaux de carbone dans le sol sont similaires à ceux du traitement continu par paillis. La plupart des augmentations du carbone du sol et de la minéralisation de l'azote se sont produites au cours des 20 premières années après le début du traitement par couverture de résidus. Le rendement des cannes a également suivi un schéma similaire, avec une augmentation rapide du rendement après le début du traitement par paillis.

La couche de paille peut agir comme une barrière physique à la germination de la canne, ce qui peut interférer dans le développement de la culture et entraîner une réduction de la production (Campos *et al*., 2010 ; Ramburan et Nxumalo, 2017). Dinardo-Mirlanda, (2013) et Hassuani *et al*. (2005), affirment que la rétention de résidus peut aggraver le salissement de la parcelle en adventices et engendrer l'augmentation des populations de ravageurs. Cependant, cela peut aussi favoriser l'installation de leurs ennemis naturels dans le système cannier en leur créant un microclimat idéal (température et humidité).

Les résultats des essais sont contrastés sur le rendement en canne en condition de déficit hydrique. Marin *et al.* (2014) concluent que la culture de canne répond négativement à l'enlèvement de la paille et que les pertes de rendement sont accentuées en période de déficit hydrique. Aquino *et al.* (2017c) expliquent que le passage d'un système sur brûlis à un paillage augmente les rendements en stress hydrique. Les traitements avec 50 et 75% de paille donnent un rendement supérieur de 76% à celui de la canne brûlée et 29% de plus que les traitements de 0, 25 et 100% de paillis (Aquino *et al.*, 2017c). Le fait de conserver 50% de paille dans le champ (10 $t.ha^{-1}$) peut augmenter la production dans des conditions de sécheresse. Resende *et al.* (2006) ont quant à eux constaté une augmentation de 25% des rendements en canne sous un paillis, durant les mêmes conditions de sécheresse. D'autre part, Lisboa *et al.* (2018a) observent que les différents niveaux de retrait de paille n'ont pas affecté le rendement en tiges pendant la saison humide.

Le climat et la température influent également sur le rendement de la canne en parcelle paillée, mais les études en régions froides obtiennent des résultats contradictoires. Ramburan et Nxumalo (2017) expliquent que l'élimination de la paille peut améliorer la repousse de la canne et ainsi augmenter les rendements en tiges tandis que Campos *et al.* (2010) disent le contraire. En contexte tropical, Tavares *et al.* (2010) signalent que le maintien de la paille améliore le rendement en tiges par rapport aux zones de brûlis. En conditions subtropicales, aucune réduction de rendement n'est observée dans des parcelles avec paillis, par Olivier et Singels (2012).

VII.2 Tallage et Rendement en paille

Les conditions de développement du tallage influencent directement la quantité et la qualité de production de la canne, mais aussi la quantité exploitable de paille. Sur l'ensemble du cycle de la canne, Lisboa *et al*. (2018a) et Cherubin *et al.* (2017) affirment que le maintien de paille au sol augmente le tallage. Néanmoins, les auteurs expliquent que de grandes quantités de paillage ont un effet négatif sur le tallage précoce (90 jours après récolte en saison sèche et 180 jours en saison humide) ainsi qu'à la fin du cycle de la canne. Les précipitations et les températures élevées favorisent le tallage et la croissance des plantes pendant la saison humide par rapport à la saison sèche (Lisboa *et al.*, 2018a). Tavares *et al.* (2010) confirment que la conservation de la paille au sol augmente le tallage en conditions tropicales. Cependant, le maintien d'une quantité modérée de paille en conditions subtropicales entraine une réduction du tallage pour Olivier et Singels (2012). D'autre part, le maintien d'une grande quantité de paille au champ, notamment en culture mécanisée, entraîne une augmentation du risque d'incendie (Rossetto *et al.*, 2008). Satiro *et al.* (2018) expliquent que l'azote total dans la couche de sol 0-30 cm est corrélé positivement au rendement en paille. L'apport de paille au sol améliore aussi l'Indice de Surface Foliaire (LAI) du tallage sur la totalité du cycle de culture (Anjos *et al.*, 2017).

Les travaux de Vallis *et al.* (1996) montrent une augmentation de rendements de la canne dès lors que l'on combine paillis et fertilisation azotée. Les rendements maximums de la canne sont atteints avec des apports d'engrais de 160 $kgN.ha^{-1}$. Dans d'autres situations avec des niveaux d'engrais plus faibles, la même étude montre que la paille de canne augmente le rendement, l'efficacité de l'utilisation de l'eau et le taux de minéralisation de l'azote dans le sol, ce qui démontre les effets très positifs de la paille sur les performances agronomiques en production de biomasse de la canne.

VII.3 Qualité industrielle de la canne

Resende *et al.* (2006), Lisboa *et al.* (2018) et Aquino *et al.* (2017b) ont observé que le maintien de paille n'affecte pas la qualité industrielle de la canne à sucre. Souza *et al.* (2005) ont quant à eux conclu que l'incorporation de 70% de paille au sol jusqu'à 30 cm de profondeur réduit les sucres totaux et le saccharose apparent de la canne. Au contraire, Aquino *et al.* (2017b) considèrent que la production de sucre est favorisée en période de sécheresse par l'augmentation de productivité de la culture sous 50% de paillage. Les tiges récoltées pendant la saison humide sont de qualité industrielle inférieure à celles récoltées pendant la saison sèche (Lisboa *et al.*, 2018a). Avec un paillis et durant les 180 premiers jours du cycle, les solides solubles moyens, le Pol, les sucres totaux, la pureté apparente, les sucres réducteurs et le taux de sucre augmentent. Une augmentation des solides solubles totaux (°Brix), du Pol, de la pureté apparente et du taux de sucre à partir de 180 jours et jusqu'à la récolte a aussi été constaté (Aquino *et al.*, 2017c). Le mûrissement de la canne (accumulation de saccharose dans les tiges) est affecté en partie par la teneur en azote du sol, la réduction de la température et la disponibilité en eau. Le paillage améliore ces conditions et participe ainsi à l'amélioration du mûrissement de la canne (Heerden *et al*., 2014 ; Cardozo et Sentelhas, 2013).

VII. 4 Effets socio-économiques

Au niveau des effets socio-économiques des différents modes de gestion de la paille, ce sont surtout leurs impacts sur les coûts et la main d'œuvre qui ont été étudiés.

Cardoso *et al.* (2018) et (2017) s'accordent sur le fait que les systèmes avec coupe manuelle ont un meilleur niveau de création d'emploi car ces systèmes nécessitent bien plus de main d'œuvre que les systèmes en coupe mécanique. Ces derniers ont cependant des coûts de production de canne inférieurs. D'autre part, les scénarios de mécanisation de la récolte sont liés à de meilleures conditions de travail, puisque l'on observe moins d'accidents du travail et des salaires moyens plus élevés (Cardoso *et al.*, 2017). Cet article conclue que la mécanisation des parcelles en canne verte, associée à une récupération (valorisation économique) de la paille présente des meilleurs résultats pour les aspects économiques, environnementaux et sociaux, par rapport à un système en brûlis. L'analyse environnementale de Cardoso *et al.* (2017) montre que la récolte mécanique de la canne verte avec récupération de la paille présente, en général, le meilleur équilibre comparatif des impacts environnementaux ainsi que des meilleures performances de durabilité.

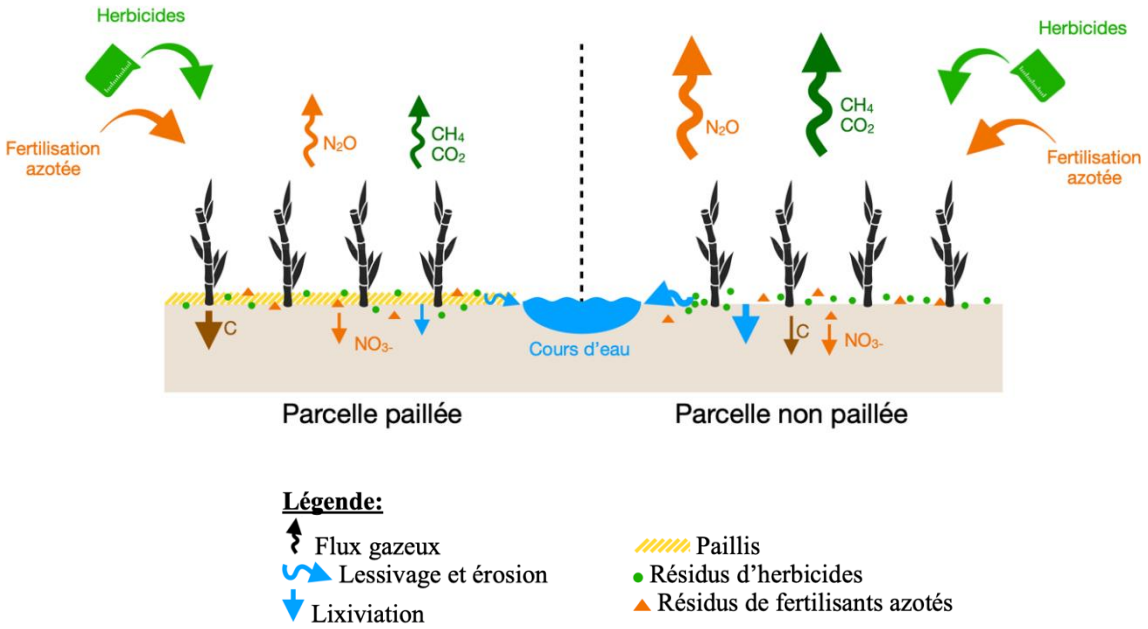
Selon Mansuy *et al.* (2019), un système avec paillis après fanage réduit l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) de 19% par rapport à un sol nu, bien que cette valeur ne soit pas totalement significative. Cette pratique réduit également le temps de travail consacré au désherbage de 5%, grâce à un taux de recouvrement des adventices réduit de 33%. Cela diminue également les rendements et la richesse en sucre de la canne de 9% (valeur significative) et 1% (résultat non significatif) respectivement.

La pratique de l'épaillage réduit la pression adventive, permet de renouveler le paillis et réduit la quantité de paille exportée du champ avec la canne (Mansuy *et al.*, 2019). Cela peut jouer sur les revenus des producteurs canniers selon la méthode de calcul du prix de rachat de la canne, au poids ou au taux de sucre et à la qualité de la canne, par exemple. D'un point de vue organisationnel, l'opération d'épaillage "est l'occasion d'arracher manuellement les mauvaises herbes mal maîtrisées, notamment les grandes graminées (Rottboellia, Panicum, Sorghum) et les lianes (Ipomoea, Momordica, etc.)" (Mansuy *et al.*, 2019). Cela peut donc participer à une réduction de la consommation d'herbicides. Un autre avantage à cette pratique est la plus grande facilité de récolte des parcelles épaillées.

Pour Suma et Savitha (2015), dans le contexte indien, le mode de gestion en canne verte et avec le maintien de la paille sur le sol, est plus économique. En effet, malgré un coût de production supérieure de 3,2%, le revenu brut du producteur augmente de 13,9% grâce à une augmentation des rendements de 8,5% par rapport au système sous brûlis.

VIII. Effets environnementaux et sanitaires

La production végétale dépend de plus en plus de sources exogènes de nutriments. Les engrais chimiques complètent le cycle naturel des nutriments dans le sol et remplacent les nutriments exportés par les produits récoltés et les résidus de culture (Borges *et al.*, 2020). Certaines particules sont transportées par l'érosion superficielle du sol, elles peuvent aussi subirent l'évaporation, le lessivage ou la lixiviation (Figure 6). Ces phénomènes favorisent la pollution et l'envasement des rivières (Pinheiro *et al.*, 2013). Ils diminuent la fertilité des sols et provoquent l'accumulation de polluants et de pesticides chimiques, endommageant la flore et la faune aquatiques (Ramos *et al.*, 2012) avec des conséquences sur les ressources en eau qui peuvent être irréversibles à l'échelle d'un territoire. La figure 6 ci-dessous représente ces différents modes de pollution de l'environnement, en système avec ou sans paillis.



- Épaisseur des flèches en fonction de la quantité -

Figure 6 : Représentation des différentes pollutions de la canne à sucre et son environnement

La suite de cette partie se focalisera sur l'analyse des pollutions liées à la gestion agricole de la canne (herbicides, fertilisants...) ainsi que les flux de gaz à effet de serre en lien avec des systèmes de canne en présence du paillis.

- *Lixiviation des substances herbicides*

Les produits chimiques agricoles appliqués sont des contributeurs à la pollution de l'eau. La paille présente plusieurs avantages pour la conservation du sol grâce à ses effets sur les flux hydriques comme l'infiltration, le drainage et le ruissellement (*cf. III.3. Flux hydriques*). Elle permet aussi de diminuer la lixiviation et indirectement le mouvement des herbicides dans le sol. Des quantités significatives d'herbicides appliqués sont interceptées par le paillis (Selim *et al*., 2003). Sans cette couverture, l'excès de produits chimiques pulvérisé en surface est absorbé et dispersé dans le sol. Le paillis présente d'autres avantages sur l'efficacité des herbicides. En effet, sa vitesse de décomposition lente du paillis permet une libération continue de l'herbicide et peut fournir un contrôle prolongé des repousses ou de la croissance des adventices. L'efficacité accrue de ces herbicides avec paillis peut mener à une réduction potentielle des intrants chimiques (Selim *et al*., 2003).

La capacité du paillis à retenir les substances des herbicides sera différente en fonction de leur type (Tableau 9), en voici quelques exemples :

- Atrazine [2-chloro- 4-(isopropylamino)-6-ethylamino-s-triazine] : Selim *et al*. (2003) montrent qu'une grande partie de l'atrazine est interceptée par le paillis de canne à sucre (40% une semaine sans pluie après l'application). L'atrazine est influencée par la température du sol ainsi que la teneur en humidité. En l'absence de paillis, la quantité retenue d'atrazine par la couche superficielle du sol est de 2,4mg.kg-1, contre seulement 1,2 mg.kg-1 avec paille (Selim *et al*., 2003).

- Pendiméthaline [N-(ethylpropyl)-3,4-dimethyl-2,6-dinitroaniline] : Cet herbicide a été appliqué avec l'atrazine dans la même solution. Les profils des concentrations de pendiméthaline en fonction du temps dans le sol et des résidus de paillis sont similaires à ceux de l'atrazine. La présence de paillis entraîne une réduction de 50 % de la concentration de pendiméthaline dans la couche superficielle du sol (Selim *et al*., 2003).

- Métribuzine [4-amino-6- (1,1-dimethylethyl)-3-(methylthio)-1,2,4-triazin-5(4H)-one] : Contrairement à l'atrazine et à la pendiméthaline, le métribuzine est appliqué comme herbicide alternatif une seule fois, au printemps. Pour les cultures de canne avec paillis, les concentrations de métribuzine sont initialement comprises entre 12 et 14 mg.kg-1. Elles diminuent pour atteindre des valeurs d'environ 1mg.kg-1 en 10 semaines. Ces résultats indiquent également une concentration supérieure de l'herbicide dans le paillis par rapport à celle retenue dans la couche superficielle du sol. Cette constatation est conforme aux résultats antérieurs obtenus pour l'atrazine et la pendiméthaline (Selim *et al*., 2003).

Tableau 9 : Concentration maximale des herbicides selon les systèmes avec ou sans paillis (issus de Selim *et al.*, 2003)

Concentration maximale ($\mu g.L^{-1}$)	Atrazine	Pendiméthaline	Métribuzine
Système avec paillis	80	3 à 4	10
Système sans paillis	160	11 à 12	10

Les résultats de ruissellement de la pendiméthaline indiquent des valeurs beaucoup plus faibles que celles de l'atrazine. Deux raisons peuvent être à l'origine de cette différence : (i) une faible solubilité et (ii) une forte rétention ou affinité avec le sol ainsi qu'avec la paille.

Le métribuzine est détecté à des concentrations extrêmement faibles dans les eaux de ruissellement (système avec ou sans paille). Un ruissellement est observé à 47 jours de l'étude. Après une si longue durée, ces faibles concentrations sont dues à la diminution des concentrations de métribuzine retenues par le sol ainsi que par le paillis (Selim *et al*., 2003).

- *Effets sur l'efficacité des fertilisants azotés et la pollution*

Les pertes par lixiviation du nitrate sont faibles avec des niveaux d'engrais azoté inférieurs à 120 kgN.ha-1 dans un système paillé et à 160 kgN.ha-1 dans un système en brûlis. La lixiviation de l'azote augmente rapidement au-dessus de ces niveaux d'engrais. En général, ces résultats suggèrent que l'augmentation des niveaux de fertilisation azoté au-dessus de 160 kgN.ha-1.an-1 entraîne principalement une augmentation des pertes de nitrate et une augmentation minimale du rendement en canne (Vallis *et al*., 1996).

Vallis *et al*. (1996) suggèrent qu'une réduction du niveau de fertilisation en azote réduit aussi considérablement les pertes par lixiviation des nitrates et aurait peu d'impact (moins de 1% de diminution) sur le niveau de production des plantes, après 21 ans de système avec paillis. La paille permet une minéralisation supplémentaire de l'azote qui réduit les besoins en engrais azoté de la canne.

Après environ 20 ans de couverture par la paille de canne, les applications d'engrais azotés ont pu être réduites de 40 kgN.ha-1 sans perte de rendement. Cette réduction des engrais azotés diminue de 29 % la lixiviation annuelle moyenne de nitrate, avec une faible baisse du rendement de la culture (< 2 %). Cela s'explique par la réduction du phénomène de volatilisation par rapport au système en brûlis (Vallis *et al*., 1996).

- *Les effets de la paille sur flux polluants des cycles biogéochimiques azote : le protoxyde d'azote ou monoxyde de diazote (N2O)*

En l'absence de l'effet de la fertilisation, la moyenne des flux de N_2O est de 0,44 $mgN_2O.m^{-2}.jour^{-1}$ (Cabral *et al.*, 2020). Des émissions accrues associées à des quantités plus importantes de paille de canne à sucre ont été repérées par Pitombo *et al.* (2017) alors que les résultats de Cabral *et al.* (2020) ont indiqué que la présence de paille ne change pas les émissions de N_2O par rapport au sol nu (Tableau 10).

Tableau 10 : Flux de N2O mesurés (perte de N représentant 0,7 %) suite à des fertilisations azotées en 2016 et 2017 (Cabral *et al.*, 2020).

	2016	2017
Quantité de fertilisation azotée	80 $kgN.ha^{-1}$ (NH_4)	100 $kgN.ha^{-1}$ (NH_4NO_3)
Flux total mesuré (Cycle 70jours)	129,0 $mgN_2O\text{-}N.m^{-2}$	70,3 $mgN_2O\text{-}N.m^{-2}$

D'après le tableau 10, sur une même période (70 jours), le flux total mesuré en 2017 est 46 % de moins que l'année précédente malgré la plus grande quantité de N appliquée (Cabral *et al*., 2020). Ces résultats sont conformes à l'augmentation observée des processus de nitrification et de dénitrification favorisés par la forme liquide des engrais organiques (entraîne une augmentation des flux de N2O et CO2 (Carmo *et al*., 2013). La fertilisation sous forme de NH4NO3 est moins susceptible de subir des pertes par volatilisation (Cantarella *et al*., 2008) dans les sols bien aérés. La nitrification est généralement le processus dominant de la production de N2O.

La nitrification est très sensible à la température bien que l'augmentation de l'humidité du sol soit considérée comme le principal facteur contrôlant les flux de N2O du sol (Pitombo *et al*., 2017 ; Bento *et al*., 2018), en particulier pour la dénitrification (Denmead *et al*., 2010), ce qui entraîne des taux d'émission plus élevés (Cabral *et al*. 2020). De meilleures pratiques de gestion peuvent être adoptées afin de réduire significativement les émissions de N2O pendant la production de canne à sucre, comme placer l'engrais azoté (N) sous la couche de paille (Borges *et al*., 2019b).

- *Les effets de la paille sur flux polluants des cycles biogéochimiques carbone*

Le dioxyde de carbone (CO_2)

D'après l'analyse de l'article Cabral *et al.* (2020), la décomposition de paille déposée sur le sol après les récoltes s'est élevée à 431,2 $gC.m^{-2}$ et 387,6 $gC.m^{-2}$ d'une année à une autre (2017 et 2018). L'activité microbienne du sol produit de la matière organique et du CO_2 (Soong *et al.*, 2015) mais les fractions sont incertaines. Carmo *et al*. (2013) ont rapporté que la présence de paille de canne (1,4 $kg.m^{-2}$) a augmenté l'efflux de CO_2 de 69% par rapport au sol nu. Robertson et Thorburn (2007) ont considéré que la plupart du carbone des déchets est absorbé par la biomasse microbienne et ne participe plus au cycle biogéochimique sous forme de CO_2, qui contribue à la respiration de l'agrosystème.

Dans Cabral *et al.* (2020), les flux quotidiens cumulés de l'échange net de CO_2 dans l'écosystème (NEE) sont calculés. Lorsque l'assimilation du carbone par la photosynthèse est devenue supérieure à la respiration de l'agrosystème, le signe des flux est passé de positif à négatif. Ces périodes de flux positifs se situent dans la phase de germination et de tallage de la canne, dite “phase croissance”, qui couvre les 150 jours depuis le début du cycle (environ 20 $gCO_2.m^{-2}.jour^{-1}$). La phase suivante, la “grande croissance” (150-240 jours) montre des pics d'assimilation autour de -45 $gCO_2.m^{-2}.jour^{-1}$ en été alors que les flux ont été réduits en hiver. Cette réduction est due à la diminution de la photosynthèse lorsque les plantes approchent de la maturité (240-360 jours). La décomposition de la paille n’émet du CO2 dans l’atmosphère que lors des 150 premiers jours du cycle de la canne.

Le méthane (CH_4)

Les flux nets quotidiens de CH4 sont faibles et très variables : en moyenne 30,9 mgCH4-CO2eq.m-2.jour-1. Les valeurs négatives obtenues indiquent l'oxydation du CH4 en CO2 par les bactéries méthanotrophes (Cabral *et al*., 2020). La consommation de CH4 dans les sols est liée à la diversité de ces microorganismes qui est plus faible dans l'agriculture par rapport à la végétation naturelle (Levine *et al*., 2011). La réduction de la capacité d'oxydation du CH4 du sol conduit donc généralement à une réduction du puits ou de la source de méthane (Zona *et al*., 2013).

Signor *et al*. (2014) ont observé une augmentation des émissions de CH4 avec le maintien de la paille de canne à sucre. En revanche, diverses études n'ont pas pointé de changement dans les émissions de CH4 des sols recouverts de paille (Carmo *et al*., 2013)

Cherubin *et al*. (2017) affirme que l'impact de la gestion du paillis sur les émissions de gaz à effet de serre du sol n'est pas encore totalement compris et nécessite davantage d'études sur le terrain. En général, la récolte des résidus réduit les émissions de CO2 et de N2O produites par la décomposition et n'a aucun effet sur les émissions de CH4. Cependant, l'épuisement progressif des stocks de C et de N dans le sol, associé au remplacement de l'azote par des engrais minéraux, pourrait induire un bilan négatif de C et des émissions plus élevées de N2O dans les zones où les résidus sont récoltés.

Le tableau 11 résume les flux annuels cumulés de gaz à effets de serre, tiré de l’étude de Cabrel *et al*. (2020). On observe des bilans de gaz à effet de serre plus réduits de 40% avec le système avec paille en comparaison avec un système non paillé.

Tableau 11 : Résumé des flux annuels cumulés de gaz à effet de serre de CO2, N2O et CH4 (gCO2eq.m-2.an-1) (Cabral *et al.*, 2020)

Les valeurs positives indiquent que le système est une source pour l'atmosphère et les valeurs ± représentent les incertitudes. Le bilan net du carbone de l'écosystème (NECB) représente le bilan des gaz à effet de serre (GES).

	Année 1 (Système sans paille)	Année 2 (Système avec paille)
CO_2	- 7 643.0 ± 129.0	- 4 615.0 ± 124.0
N_2O	62.4 ± 1.3	52.3 ± 1.8
CH_4	12.1 ± 1.7	10.4 ± 1.6
Bilan GES	-7 569.0 ± 129.0	- 4 552.0 ± 124.0
NECB	-2 646.0 ± 458.7	- 623.0 ± 352.0

Le bilan net de carbone de l'écosystème (NECB) est calculé à partir des totaux annuels cumulés de GES sur les périodes où tous les gaz ont été mesurés simultanément. Le NECB diminue de 76 % entre la première et la deuxième année. Les émissions N2O et CH4 sont réduites de 15% et le bilan de CO2 de 60 %. Cette dernière mesure inclut les flux de la paille en décomposition (CO2 de la respiration hétérotrophe) ce qui explique une si grande différence. (Cabral *et al*., 2020).

Les résultats du Tableau 11 indiquent que le CO2 assimilé compense les prélèvements de carbone de la tige récoltée ainsi que la décomposition des résidus restant sur le sol. Cette compensation s'est produite malgré la grande variation entre les cycles, ce qui souligne l'importance de l'équilibre du CO2 (photosynthèse contre respiration). Les émissions nettes de gaz à effets de serre de N2O et de CH4, exprimées en CO2 équivalent, ont également été compensées par le carbone gagné. (*cf. IV. Fertilité chimique du sol*) (Cabral *et al.*, 2020).

- *Les effets de la paille sur flux polluants des cycles biogéochimiques du phosphore.*

La proportion de nutriments des engrais qui est utilisée par une culture au cours de la même saison de croissance est généralement faible, en particulier pour le phosphore (P) dans les situations tropicales (Withers *et al*., 2018). Les sols acides, très altérés et riches en fer (Fe) lient rapidement les phosphates aux surfaces minérales, limitant ainsi l'accès aux racines des plantes (Borges *et al*., 2019b). Le stock élevé de phosphore peut répondre à la demande des cultures par le biais du renouvellement naturel. Cependant, ce stock favorise des pertes par lixiviation plus élevées. La lixiviation du phosphore devient la principale cause de pollution de l'eau et de problèmes de qualité de l'eau dans le monde (Borges *et al*., 2020).

D. Conclusion et recommandations

A travers cette revue scientifique, une tendance générale positive s'observe sur l'ensemble du continuum sol-plante-atmosphère, liée à des apports agro-systémiques du paillage. La paille apporte une amélioration globale des conditions de culture de la canne à sucre, favorisant l'ensemble de la production sur les aspects physicochimiques du sol, d'apport de biodiversité du sol, de contrôle des nuisibles, mais aussi relatif à une hausse des conditions économiques, sociale et environnementale. La gestion de la paille est un facteur clé de gestion de la fertilité et de durabilité du système cannier.

En effet, la paille a un intérêt positif sur l'aspect physique du sol car elle atténue la compaction, ralentit l'érosion et préserve les structures pédologiques. Les articles scientifiques étudiés préconisent un paillage important proche de 100% pour optimiser au mieux les bénéfices de la paille sur l'aspect physique du sol.

De plus, et en partie grâce à cette amélioration de la structure du sol, le paillis a des effets positifs sur les dynamiques hydriques du sol. Cette pratique permet notamment de diminuer l'évaporation, de favoriser l'infiltration et de limiter le ruissellement. La présence de paille sur une parcelle augmente le stock d'eau du sol et la rend donc plus résiliente en cas de déficit hydrique. Les quantités de paille laissées au champ sont à ajuster selon la topographie, le type de sol, ainsi que les effets à prioriser, mais le fait de laisser 50% de la paille produite semble être une quantité appropriée concernant l'amélioration des conditions hydriques de la parcelle.

Le paillage contribue aussi à l'amélioration générale de la fertilité chimique des sols, notamment sur l'indice de la qualité du sol qui comprend le pH, les teneurs en phosphore ou encore le carbone organique du sol. Différentes études ont été menées pour déterminer l'évolution de cet indice avec l'exportation de la paille. Une exportation excessive de la paille réduit l'indice, tandis que les exportations faibles à modérées n'ont pas d'effet sur la réduction de la qualité du sol. Les changements de l'indice varient selon le type du sol. Les sols sableux sont plus sensibles à l'exportation de la paille que les sols argileux.

A propos de la qualité des sols canniers, plusieurs études ont montré l'efficacité de la paille pour le stock de carbone dans le sol. La présence des résidus de canne favorise l'accroissement de la biomasse microbienne du sol, permettant indirectement une plus grande immobilisation du carbone. Ainsi, la paille permet au sol d'être plus riche en matières organiques, qui ont un rôle important dans le stockage du carbone organique du sol et dans les réductions des émissions de gaz carbonique (Ademe, 2014). La fertilité des sols est donc optimisée par l'apport de paille. Un paillis de 10 t.ha-1 permet une meilleure gestion du sol et une amélioration de ses propriétés biochimiques. Cependant, il faut prendre en compte les conditions de culture telles que le type de sol, faisant varier le choix des quantités optimales de paillage.

La présence de paille modifie aussi le développement de la biodiversité à l'échelle de la parcelle de canne. En effet, le paillage limite la présence d'un grand nombre d'adventices par ses effets physicochimiques sur le sol (limitation de la luminosité, lixiviation de substances phénoliques, augmentation de l'humidité, réduction de la température). Mais ces conditions peuvent aussi favoriser de façon spécifique certaines espèces. La paille peut aussi remplacer ou compléter l'utilisation d'herbicides dans la gestion des mauvaises herbes. Une recommandation de 12 t.ha-1de paillis est établie par Lorenzi (1993) concernant la lutte contre les adventices. La présence de paille augmente également la quasi-totalité des populations de micro et macroorganismes, bénéfiques ou néfastes pour la culture de la canne à sucre. Le paillage attire un grand nombre de ravageurs, mais aussi les espèces pouvant contrôler et réduire leur population. Le brûlis reste la meilleure pratique contre les ravageurs mais fragilise également l'ensemble de la biodiversité. La décomposition de la paille améliore aussi de façon importante la vie du sol. En général, pour optimiser la biodiversité bénéfique et contrôler l'ensemble des bioagresseurs, une quantité de 50% de paille laissée au sol (environ 10 t.ha-1) est préconisée.

Concernant la productivité de la canne, un paillage modéré entraîne une augmentation de la production de la canne à sucre et de la quantité et qualité des tiges et du tallage. Cette hausse de production est due à une amélioration globale des conditions agronomiques de culture mais est dépendante des conditions édapho-climatiques de la parcelle, principalement de la température et de l'humidité. Un optimum global de 50% de paille laissée au champ est observé, entre 50 et 75% en conditions de stress hydrique. Au niveau socio-économique, la récolte mécanisée est associée à de meilleurs résultats économiques ainsi que de meilleures conditions de travail. Concernant la récupération de la paille pour sa valorisation économique, cela semble dépendre du contexte. En effet, bien que pour Cardoso *et al*. (2017) celle-ci présente un bon équilibre comparatif des impacts environnementaux et des bonnes performances de durabilité, pour Suma et Savitha (2015), le paillis permet une augmentation du revenu brut du producteur de 13,9% grâce à une augmentation des rendements.

Enfin du point de vue environnemental, de nombreuses études soulignent l'influence des propriétés du sol, les phénomènes naturels qui peuvent favoriser la pollution et l'envasement des rivières. Le paillis présente de nombreux avantages étant une barrière naturelle pour empêcher l'absorption et la dispersion dans le sol des produits chimiques agricoles. Le paillage permet également la réduction des pertes par ruissellement des herbicides appliqués, il réduit aussi les phénomènes d'érosion, de lessivage et de lixiviation.

Les différentes recommandations de quantité optimale de paille à laisser au champ pour les principaux aspects étudiés sont représentées dans la figure 7 qui suit.

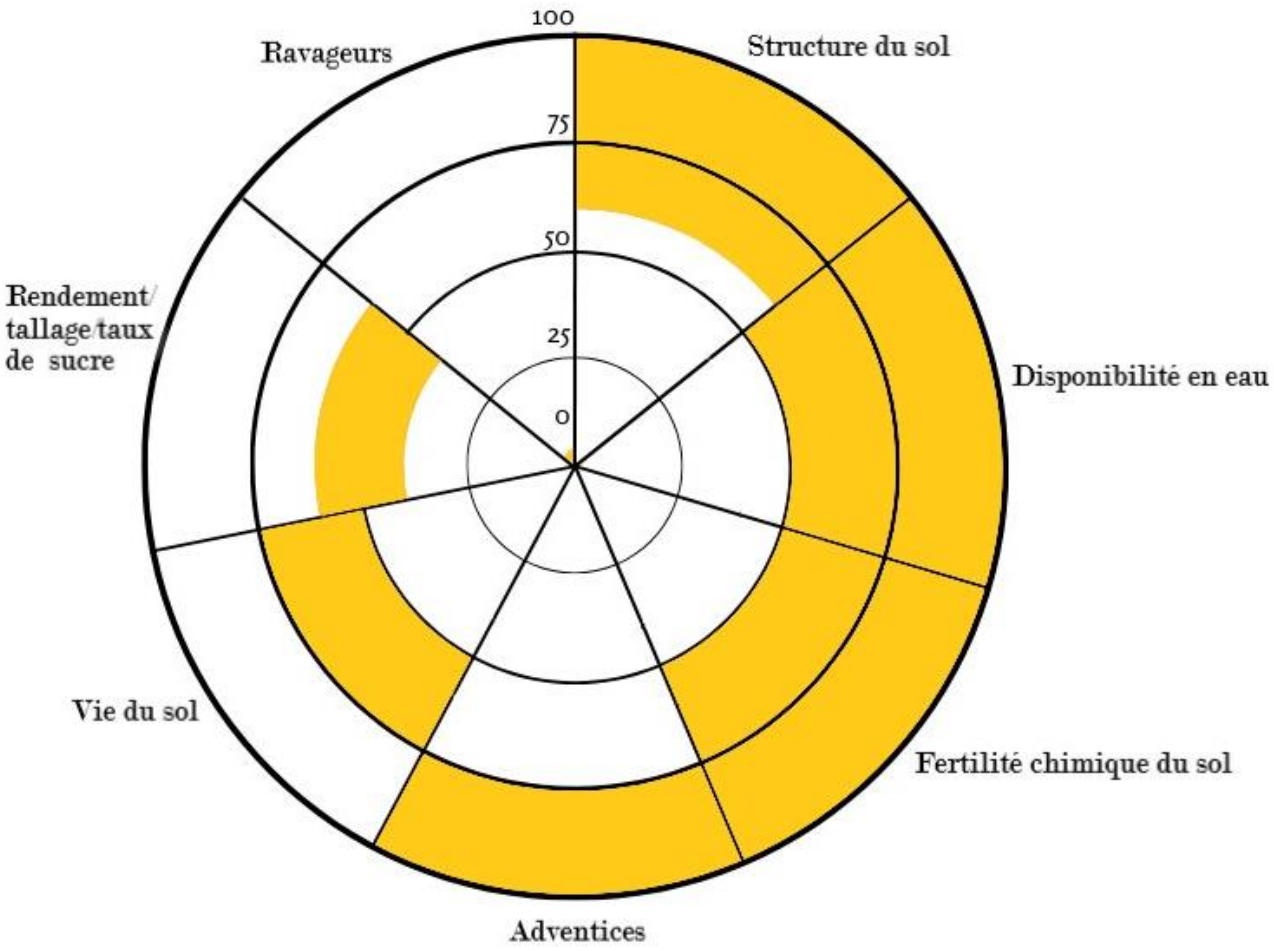


Figure 7 : Recommandations des taux de paille à laisser au champ (%) selon les différents effets biophysiques étudiés (crédit : MJE TROPI)

Sur l'ensemble des effets biophysiques étudiés dans cette synthèse, la paille de canne à sucre joue un rôle essentiel en termes de fertilité du sol et de durabilité du système cannier. Néanmoins, le paillage peut être combiné avec d'autres pratiques agroécologiques comme la réduction du travail du sol, l'utilisation de plantes de service, le contrôle biologique des bioagresseurs, l'utilisation de variétés adaptées et d'amendements organiques, la réduction de la fréquence du passage des machines, etc. Ces pratiques permettent de compléter les avantages agronomiques du paillage, mais également d'augmenter la résilience de l'agrosystème. Etant donné l'importance des enjeux autour de cette ressource paille et la dégradation des sols dans le monde, des études plus complètes et à long-terme sont nécessaires. Elles permettraient d'approfondir la compréhension des interactions sol-paille-canne-atmosphère et de formuler des recommandations adaptées à des contextes variés.

La gestion de la paille est un choix difficile pour les agriculteurs par sa diversité de voies de valorisation. Les planteurs doivent osciller entre la durabilité de leur sol et les enjeux de valorisations du résidu autre que l'agrosystème (concurrence de l'élevage, production d'énergie, bioéthanol, etc.). Ce choix est d'autant plus difficile dans le contexte mondial actuel, en recherche de solutions durables et d'augmentation de la demande en bioénergie. Les contextes politiques peuvent aussi orienter les diverses voies de valorisation sans intégrer les analyses liées à la paille. Une confrontation de cette bibliographie à un cas concret de terrain pourrait mettre en avant la réalité des usages et le contexte dans lesquels ils s'opèrent.

Références

Sites internet :

Chambres d'Agriculture Normandie. Indice de Fréquence de Traitement. [en ligne]. [22/02/2023]. <URL : https://normandie.chambres-agriculture.fr/conseils-et-services/preserver-lenvironnement/maec/indice-de-frequence-de-traitement/ >.

FAOSTAT. 2021. Crops and livestock products. [en ligne]. [09/01/2023]. <URL : https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL >.

Larousse, 2023. Encyclopédie et dictionnaires en ligne. France : Larousse. [en ligne 25/02/2023]. < URL : https://www.larousse.fr/ >

Sygenta. 2021. Comprendre et calculer l'Indicateur de Fréquence de Traitement. [en ligne]. [22/02/2023]. <URL : https://www.syngenta.fr/agriculture-durable/proteger-eau-et-air/article/comprendre-et-calculer-ift >.

Références issues d'articles :

Ademe, 2014. Connaitre et Agir. Carbone organique des sols. France : Ademe. [en ligne 01/02/2023] : https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-22284-sols-agricoles.pdf

Brady N.C., Weil R.R. 2002. The Nature and Properties of Soils. 13th edn. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Efile J.C., Oriol P., Boisne-Noe R., Roques D., Daugrois J.H. 2009. Amélioration variétale et maintien de l'état sanitaire des plantations. France : CIRAD, p 1-50. [03/01/2023]. <https://agritrop.cirad.fr/556043/1/document_556043.pdf>.

Hassuani S.J., Leal M.R.L.V., Macedo I.C. 2005. Biomass power generation: sugarcane bagasse and trash. Brésil : Centro de Tecnologia Canavieira et United Nations Development Programme. [24/02/2023]. <https://pdfs.semanticscholar.org/1c8f/cebf7aef193b4f9a0de509f9ed84d84bdf9a.pdf>

INRAE, 2022. Comment l'agriculture de conservation peut améliorer la qualité des sols. France : INRAE. [en ligne 25/02/2023] < URL : https://www.inrae.fr/actualites/comment-lagriculture-conservation-peut-ameliorer-qualite-sols.

Pitelli, R.A. 1995. Dinâmica de plantas daninhas no sistema de plantio direto. Brésil : Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, Congresso brasileiro da ciência das plantas daninhas, p 50-61. [24/02/2023].

Articles scientifiques et reviews :

Adetoro A.A., Abraham S., Paraskevopoulos A.L., Owusu-Sekyere E., Jordaan H., Orimoloye I.R. 2020. Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production : The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. Afrique du Sud : Groundwater for Sustainable Development, vol 11, p 1-7. [02/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100464>.

Almeida, F.S. 1991. Controle de plantas daninhas em plantio direto. Brésil : IAPAR, vol 67. [24/02/2023].

Anjos J.C.R.D., Andrade A.S.D.J., Bastos E.A., Noleto D.H., Melo F.D.B, Brito R.R.D. 2017. Water storage in a Plinthaqualf cultivated with sugarcane under straw levels. Brésil : Pesquisa Agropecuaria Brasileira, vol 52, p 464-473. [19/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600010>.

Aquino G.S.D, Medina C.D.C. 2014. Productivity and biometric and physiological indices of sugarcane grown under different amounts of straw. Brésil : Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol 49, p 173- 180. [24/02/2023].

Aquino G.S.D., Medina C.D.C., Costa D.C.D., Shahab M., Santiago A.D. 2017a. Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. Brésil : Industrial Crops and Products, vol 102, p 58-64. [22/10/2022]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.018>.

Aquino G.S.D., Medina C.D.C., Porteira A.L.J., Santos L.O., Cunha A.C.B., Kussaba D.A.O., Santos . J.H.D.J., Almeida L.F., Santiago A.D. 2015. Root system and productivity of sugarcane ratoon associated to different quantities of straw. Brésil : Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol 50, p 1150-1159. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200004>

Aquino G.S.D., Medina C.D.C., Shahab M., Santiago A.D., Cunha A.C.B., Kussaba D.A.O., Carvalho J.B., Moreira A. 2017b. Does straw mulch partial-removal from soil interfere in yield and industrial quality sugarcane? A long term study. Brésil : Industrial Crops and Products, vol 111, p 573-578. [20/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.026>.

Aquino G.S.D., Medina C.D.C., Silvestre D.A., Gomes E.C., Cunha A.C.B., Kussaba D.A.O., Almeida L.F., Shahab M., Santiago A.D. 2017c. Straw removal of sugarcane from soil and its impacts on yield and industrial quality ratoons. Brésil : Scientia Agricola, vol 75, p 526-529. [11/01/2023]. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0093>.

Araujo A.S.F., Cesarz S., Leite L.F.C., Borges C.D., Tsai, S.M., Eisenhauer N. 2013. Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. Brésil : Soil Biology Biochemestry, vol 66, p 175-181. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.013>.

Araujo R.A., Araujo M.S., Gonring A.H.R., Guedes R.N.C. 2005. Impacto da queima controlada da palhada da cana-de-açúcar sobre a comunidade de insetos locais. Brésil : Proteção de Plantas, vol 34, p 649-658. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000400016>.

Arceneaux A.E., Selim H.M. 2012. Mulch management strategies and sugarcane yield. Etats-Unis : Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists, vol 32, p 28-37. [24/02/2023].

Augier P. *et al*. 2022. Mémento 2022, La Réunion. [en ligne] France : Agreste. 20p. [11/2022]. <URL: https://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/20221025_memento_2022_site_internet.pdf> .

Awe G.O., Reichert J.M., Timm L.C., Wendroth O.O. 2014. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field. Brésil : Plant and Soil, vol 387, p 395-411. [19/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2304-5>.

Awe G.O., Reichert J.M., Wendroth O.O. 2015. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. Brésil : Soil and Tillage Research, vol 150, p 93-106. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.013>.

Ball-Coelho, B., Tiessen H., Stewart J.W.B., Salcedo I.H., Sampaio E.V.S.B. 1993. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in northeastern Brazil. Brésil : Agronomy Journal, vol 85, p 1004-1008. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500050009x>.

BarretoL.V., Barros F.M., Bonomo P., Rocha F. A., Amorim J. S. 2013. Eutrofização em rios brasileiros. Brésil : Enciclopédia biosfera, Centro Cientifico Conhecer, vol 16, p 2166-2181. [28/02/2023]. <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2013a/biologicas/EUTROFIZACAO.pdf>.

Bennett F.D. 1962. Outbreaks of Elasmopalpus lignosellus (Zeller) (Lepidoptera: Phycitidae) in sugarcane in Barbados. Jamaica and St. Kitts : Tropical Agriculture, vol 39. [24/02/2023]. <https://journals.sta.uwi.edu/ojs/index.php/ta/article/view/4062/0>.

Bento C.B., Filoso, S., Pitombo, L.M., Cantarella H., Rossetto R., Martinelli L.A., Carmo J.C. 2018. Impacts of sugarcane agriculture expansion over low-intensity cattle ranch pasture in Brazil on greenhouse gases. Brésil : J. Environ. Manag., 206, 980–988. [28/02/2023]. <10.1016/j.jenvman.2017.11.085>

Bertol I., Engel F.L., Mafra A.L., Bertol O.J., Ritter S.R. 2007. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. Brésil : Soil Tillage Research, vol 94, p 142-150. [01/02/2023] <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.008>.

Blanco-Canqui H., Lal R. 2009. Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality. Etats-Unis d'Amérique : Critical Reviews in Plant Sciences, vol 28, p 139-163. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1080/07352680902776507>.

Bordonal R.D.O., Carvalho J.L.N., Lal R., Figueiredo E.B.D., Oliveira B.G.D., Scala N.L.J. 2018. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. Brésil : Agronomy for Sustainable Development, vol 38, p 1-23. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.

Bordonal R.D.O., Menandro L.M.S., Barbosa L., Lal. R, Milori D.M.B.P., Kölln O.T., Franco H.C.J., Carvalho J.L.N. 2017. Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. Pays-Bas : Geoderma, vol 328, p 79-90. [24/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.003>.

Borges B.M.M.N., Abdala D.B., De Souza M.F., Viglio L.M., Coelho M.J.A., Pavinato P.S., Franco H.C.J. 2019a. Organomineral phosphate fertilizer from sugarcane byproduct and its effects on soil phosphorus availability and sugarcane yield. Bréil : Geoderma, vol 339, p 20-30. [28/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.036>.

Borges C.D., Carvalho J.L.N., Kölln O.T. 2019b. Can alternative N-fertilization methods influence GHG emissions and biomass production in sugarcane fields ?. Brésil : Biomass and Bioenergy, vol 120, p 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.017>.

Braida J., Reichert J., Veiga M., Reinert D. 2006. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. Brésil : Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol 30, p 605-614. [22/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400001>.

Braunbeck O., Magalhaes P.S.G. 2014.Technological evaluation of sugarcane mechanization. Brésil : Edgar Blücher, vol 89, p 451-464. [15/01/2023]. <http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEBIOETHANOL_42>.

Campos L.H.F. 2010. Soil management systems influence biomass accumulation and productivity of sugarcane (var. RB855453). Brésil : Acta Scientiarum. Agronomy, vol 32, p 345-350. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.3703>.

Canellas L.P., Velloso A.C.X., Marciano C.R., Ramalho J.F.G.P., Rumjanek V.M., Rezende C.E., Santos G.A. 2003. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. Brésil : Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol 27, p 935-44. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018 >.

Cantarella, H., Trivelin, P.C.O., Contin, T.L.M., Dias, F.L.F., Rossetto, R., Marcelino, R., Coimbra, R.B., Quaggio, J.A. 2008. Ammonia volatilisation from urease inhibitor- treated urea applied to sugarcane trash blankets. Brésil : Scientia Agricola, vol 65, p 397-401. [15/02/2023]. < https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000400011> .

Cardoso T.F., Watanabe M.D.B., Souza A., Chagas M.F., Cavalett O., Morais E.R., Nogueura L.A.H., Leal M.R.L.V., Braunbeck O.A., Cortez L.A.B., Bonomi A. 2017. Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. Brésil : Biofuels, Bioproducts and Biorefining, vol 12, p 68-82. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1002/bbb.1829>.

Cardoso T.F., Watanabe M.D.B., Souza A., Chagas M.F., Cavaletta O., Morais E.R., Nogueira L.A.H., Leal M.R.L.V., Braunbeck O.A., Cortez L.A.B., Bonomi A. 2018. A regional approach to determine economic, environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil. Brésil : Biomass and Bioenergy, vol 120, p 9-20. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.018>.

Cardozo N.P., Sentzlhas P.C. 2013. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. Brésil : Scientia Agricola, vol 70, p 449-456. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600011>.

Carmo J.B.D., Filoso S., Zotelli L.C., Sousa E.R.D.N, Pitombo L.M., Duarte-Neto P.J., Vargas V.P., Andrade C.A., Gava A.G.J.C., Rossetto R., Cantarella H., Neto A.E., Martinelli L. 2013. Inflied greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil : effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. Brésil : Blackwell publishing Ltd, vol 5, p 267-280. [15/02/2023]. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x>.

Carvalho J.L.N., Nogueirol R. C., Menandro L. M.S. 2017. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. Brésil : GCB Bioenergy, vol 9, p 1181–1195. [25/10/2022]. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.

Carvalho J.L.N., Otto R., Franco H.C.J., Trivelin P.C.O. 2013. Input of sugarcane post-harvest residus into the soil. Brésil : Scientia Agricola, vol 70, p 336-344. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500008>.

Carvalho J.N.L., Hudiburg T.W., Franco H.C.J., DeLucia E.H. 2016. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. Royaume-Uni : GCB Bioenergy, vol 9, p1333-1343. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12411>.

Carvalho K.S., Vianna M.S., Nassif D.S.P., Costa L.G., Folegatti M.V., Marin F.R.. 2019. Effect of soil straw cover on evaporation, transpiration, and evapotranspiration in sugarcane cultivation. Brésil : Australian Journal of Crop Science, vol 13, p 1362-1368. [19/01/2023]. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.08.p1814>.

Castioni G.A., Cherubin M.R., Menandro L.M.S., Sanches G.M., Bordonal R.D.O., Barbosa L.C., Franco H.C.J., Carvalho J.L.N. 2018. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. Brésil : Soil and Tillage Research, vol 184, p 301-309. [22/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>.

Castro S.G.Q., Miranda L.L.D., Fracasso J.V., Bordonal R.O., Menandro L.M.S., Franco H.C.J., Caevalho J.L.N. 2019. Changes in Soil Pest Populations Caused by Sugarcane Straw Removal in Brazil. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 878-887. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10019-4>.

Cerri C.C., Galdos M.V, Maia S.M.F., Bernoux M., Feigl B.J., Powlson D., C.E.P. 2010. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil : an examination of existing data. Royaume-Uni : European Journal of Soil Science, vol 62, p 23-28. [09/01/2023]. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x>.

Cheong L.R.N., Teeluck M.. 2016. The Practice of Green Cane Trash Blanketing in the Irrigated Zone of Mauritius: Effects on Soil Moisture and Water Use Efficiency of Sugarcane. Maurice : Sugar Tech, vol 18, p 124–133. [26/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12355-015-0374-1>.

Cherubin M.R., Bordonal R.O., Castioni G.A., Guimarães E.M., Lisbonne I.P., Moraes L.A.A., Menandro L.M.S., Tenelli S., Cerri E.P., Karlen D.L., Carvalho J.L.N. 2020. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. Etats-Unis d'Amérique : Industrial Crops and Products, vol 163, p 1-12. [30/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113315>.

Cherubin M.R., Da Silva Oliveira D. M., Feigl B. J. 2017. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. Brésil : Sciencia Agricola, vol 75, p 255-272. [25/10/2022]. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0459 >.

Cherubin M.R., Franchi M.R.A., Lima R.P.D., Moraes M.T.D., Luz F.B.D. 2021. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. Brésil : Soil and tillage Research, vol 212, p 1-8. [19/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105066>.

Cherubin M.R., Lisboa I.P., Silva A.G.B., Varanda L.L., Bordonal R.O., Carvalho J.L.N., Otto R., Pavinato P.S., Soltangheisi A., Cerri C.E.P. 2019. Sugarcane Straw Removal: Implications to Soil Fertility and Fertilizer Demand in Brazil. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 888-900. [02/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10021-w>.

Cochrane H.R., Aylmore L.A.G. 1994. The effects of plant roots on soil structure. Australie : Proceedings of 3rd Triennial Conference ‘‘Soils 94’’, p 207–212. [28/01/2023]. <https://www.researchgate.net/profile/Graham-Aylmore/publication/284060912_The_effects_of_plant_roots_on_soil_structure/links/5a22694b4585155dd41b0826/The-effects-of-plant-roots-on-soil-structure.pdf>.

Corrêa S.T.R., Barbosa L.C., Menandro L.M.S., Scarpare F.B., Reichardt K., De Moraes L.O., Hernandes T.A.D., Franco H.C.J., Carvalho J.L.N.. 2019. Straw Removal Effects on Soil Water Dynamics, Soil Temperature, and Sugarcane Yield in South-Central Brazil. Brésil : Bioenergy Research, vol 12, p 749–763. [19/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09981-w>.

Correia N.M., Durigan J.C. 2004. Emergência de plantas daninhas em solo coberto com palha de cana-de-açucar. Brésil : Planta daninha, vol 22, p 1-7. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000100002>.

Deeb M, Grimaldi M., Aroui H., Mthimkhulu S., Antwerpen R.V., Podwojewski P. 2021. Long-term effect of sugarcane residue management and chemical fertilization on soil physical properties in South Africa. France : Soil Science Society of American Journal, vol 85, p 1–18. [05/02/2023]. <https://doi.org/10.1002/saj2.20326>.

Denmead, O.T., Macdonald, B.C.T., Bryant, G., Naylor, T., Wilson, S., Griffith, D.W.T., Wang, W.J., Salter, B., White, I., Moody, P.W. 2010. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. Australie : Agricultural and Forest Meteorology, vol 150, p 748–756. [15/02/23]. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.018>.

Dieckow J., Bayer C., Conceição P.C., Zanatta J.A., Martin-Neto L., Milori D.B.M., Salton J.C., Macedo M.M., Mielniczuk J., Hernani L.C. 2009. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. Brésil : European Journal of Soil Science, vol 60, p 240– 249. [21/11/2023]. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01101.x>.

Dinardo-Miranda L.L., Fracasso J.V. 2013. Sugarcane straw and the populations of pests and nematodes. Brésil : Scientia Agricola, vol 70, p 1-6. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500012>.

Emerson W.W, Foster R.C., Oades J.M. 1986. Organo-mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. Australie : Interactions of soil minerals with natural organics and microbes, vol 17, p 521–548. [25/01/2023]. <https: //doi.org/10.2136/sssaspecpub17.c14>.

Ferreira E.A., Procopio S.O., Galon L., Franca A.C., Concenço G., Silva A.A., Aspiazu I., Silva A.F., Tironi S.P., Rocha P.R.R. 2010. Manejo de plantas daninhas em cana-crua. Brésil : Biofuels, Bioproducts and Biorefining, vol 12, p 68-82. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1002/bbb.1829>.

Ferreira R.V., Contato E.D., Kuva M.A., Ferraudo A.S., Alves P.L.C.A., Magario F.B., Salgado T.P. 2011. Organizaçao das comunidades infestantes de plantas daninhas na cultura da cana-de-açucar em agrupamentos-padrao. Brésil : Planta Daninha, vol 29, p 363-371. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000200014>.

Filho M.V.M., Liccioti T.T., Pereira G.T., Marques J.J., Sanchez R.B. 2009. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. Brésil : Engenharia Agrícola, vol 29, p 8-18. [28/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>.

Fortes C., Trivelin P.C.O., Vitti A.C. 2012. Long-term decomposition if sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. Royaume-Uni : Biomass and Bioenergy, vol 42, p 189-198. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.011>.

Franzluebbers A.J. 2015. Farming strategies to fuel bioenergy demands and facilitate essential soil services. Etats Unies d'Amérique : Geoderma, vol 259, p 251-258. [15/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.007>.

Fröberg M., Jardine P. M., Hanson P. J., Swanston C. W., Todd D. E., Tarver J. R., Garten C. T. 2007. Low dissolved organic carbon input from fresh litter to deep mineral soils. Etats Unis d'Amérique : Soil Science Society of America Journal, vol 71, p 347–354. [24/01/2023]. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0188>.

Gmach M.R., Kaiser K., Cherubin M.R., Cerri C.E., Lisbonne I.P., Vasconcelos A.L., Neto M.S. 2021. Soil dissolved organic carbon responses to sugarcane straw removal. Chine : Soil Use and Management, vol 37, p 126-137. [24/01/2023]. <https://doi.org/10.1111/sum.12663>.

Gmach M.R., Scarpare F.V., Cherubin M.R., Lisboa I.P., Santos A.K.B.D., Pellegrino Cerri C.E., Cerri C.C. 2019. Sugarcane straw removal effects on soil water storage and drainage in southeastern Brazil. Brésil : Journal of Soil and Water Conservation, vol 74, p 466-476. [14/01/2023]. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.5.466>.

Gomez E.O., de Souza R.T.G., Rocha G.J. M., de Almeida E., Cortez L.A.B. 2014. Sugarcane trash as feedstock for second generation processes. Australia : Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability, vol 1, p 637-660. [25/02/2023]. <10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEBIOETHANOL_56>.

Gravena R., Rodrigues J.P.R.G., Spindola W., Pitelli R.A., Alves P.L.C.A. 2004. Controle de plantas daninhas através da palha de cana-de-açúcar associada à mistura dos herbicidas trifloxysulfuron-sodium + ametrina. Brésil : Planta daninha, vol 22, p 419-427. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000300012>.

Guimaraes M., Oliveira J., Telles T.,Machado W., Brabosa G., Filho J. 2018. Soil aggregation and carbon stabilization in burn and no-burn sugarcane management systems. Brésil : Academia Brasileira de Ciências, vol 90, p 2459-2467. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170772>.

Hamza M., Anderson W. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Australie : Soil and Tillage Research, vol 82, p 121-145. [25/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.

Heerden P.D.R., Eggleston G., Donaldson R.A. 2014. Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. Afrique du sud : Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch4>.

Holthusen, D., Brandt, A.A., Reichert, J.M., Horn, R., Fleige, H., Zink, A., 2018. Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. Brésil : Soil and Tillage Research, vol 184, p 78-92. [15/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.009>.

Hoshino A.T., Hata F.T., Aquino G.S.D., Menezes A.D.O.J, Ventura M.U., Medina C.D.C. 2017. Mulching with Sugarcane Straw Reduces Weed Density in Sugarcane Crop. Brésil : International Journal of Agriculture and Biology, vol 19, p 121-124. [03/01/2023]. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0252>.

Imhoff S., Silva A.P.D., Dias M.D.S.J., Tormena C.A. 2001. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. Brésil : Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol 25, p 11-18. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100002>.

Jimenez, K.J., Rolim, M.M., Gomes, I.F., de Lima, R.P., Berrío, L.L.A., Ortiz, P.F., 2021. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. Brésil : Soil and Tillage Research, vol 206, p 104-117. [11/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104847>.

Júnnyor, W.D.S.G., Diserens, E., Maria, I.C.D., AraujoJunior, C.F., Farhate, C.V.V., Souza, Z.M.D., 2019. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. Brésil : Science of The Total Environment, vol 681, p 424-434. [03/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.009>.

Lal R. 2008a. Managing soil water to improve rainfed agriculture in India. Inde : Journal of Sustainable Agriculture, vol 32, p 51-75. [03/02/2023]. <https://doi.org/10.1080/10440040802121395>.

Lal R. 2008b. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production. Chine : Soil and Tillage Research, vol 102, p 233-241. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.003>.

Langellotto G.A., Denno R.F. 2004. Responses of invertebrate natural enemies to complex-structured habitats: a meta-analytical synthesis. Etats-Unis : Oecologia, vol 139, p 1-10. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1497-3>.

Leite L., Sagrilo E., de Araújo A.S.F., Souza H.A.D, 2018. Short-Term Effect of Sugarcane Straw on Soil Organic Carbon Pools. Canada : Journal of Agricultural Science, vol 10, p 405-416. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n8p405>.

Leite L.G., Machado L.A., Goulart R.M., Tavares F.M., Filho A.B. 2005. Screening of entomopathogenic nematodes (Nemata : Rhabditida) and the efficiency of Heterorhabditis sp against the sugarcane root spittlebug Mahanarva fimbriolata (Fabr.) (Hemiptera : Cercopidae). Brésil :Neotropical Entomology, vol 34, p 1-6. . [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000500010>.

Levine, U.Y., Teal, T.K., Robertson, G.P., Schmidt, T.M., 2011. Agriculture's impact on microbial diversity and associated fluxes of carbon dioxide and methane. Etat Unis d'Amérique : The ISME Journal, vol 5, p 1683-1691. [03/02/2023]. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.40>.

Li R., Li Q., Pan L. 2020. Review of organic mulching effects on soil and water loss. Chine : Archives of Agronomy and Soil Science, 67, 136-151. [25/01/2023]. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1718111>

Lisboa I.P., Cherubin M.R., Lima R.P., Ceri C.C., Satiro L.S., Wienhold B.J., Schmer M.R., Jin V.L., Cerri C.E.P. 2018a. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. Brésil : Industrial Crops and Products, vol 111, p 794-806. [14/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.049>.

Lisboa I.P., Cherubin M.R., Satiro L.S., Siqueira-Neto M., Lima R.P., Gmach M.R., Wienhold B.J., Schmer M.R., Jin V.L., Cerri C.C., Cerri. C.E.P. 2018b. Apllying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. Etats-Unis d'Amérique : Industrial Crops and Products, vol 129, p 175-184. [24/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.004>.

Lisboa I.P., Damian J.M., Cherubin M. R., Barros P.P.S., Fiorio P.R., Cerri C.C., Cerri C.E.P. 2018c. Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. Brésil : Agronomy, vol 8, p 185-196. [22/10/2022]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090196>.

Lorenzi H. 1993. Efeito da palha da cana no controle das plantas daninhas. Brésil : Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, Congresso brasileiro de herbicidas e plantas daninhas, vol 19, p 28-29. [24/02/2023].

Lustosa Carvalho M., Bonini da Luz F., Lima R.P.D, Cavalieri-Polizeli K.M.V., Carvalho J.L.N., Cherubin M.R.. 2022. Assessment of Soil Physical Quality and Water Flow Regulation under Straw Removal Management in Sugarcane Production Fields. Brésil : Sustainability, vol 14, p 841-859. [20/01/2023]. <https://doi.org/10.3390/su14020841>.

Mansuy A., Marotte P., Martin J, Roux E., Chouteau R., Wilt M., Soubadou G. 2019. CanécoH : mise au point de leviers pour une Canne à sucre économe en Herbicide à La Réunion. France : Innovations Agronomiques, vol 76, p 103-119. [03/01/2023]. <https://doi.org/10.15454/tskwve>.

Manwaring M., Wallace H.M., Weaver H.J. 2018. Effects of a mulch layer on the assemblage and abundance of mesostigmatan mites and other arthropods in the soil of a sugarcane agro-ecosystem in Australia. Australie : Experimental and Applied Acarology, vol 74, p 291-300. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s10493-018-0227-1>.

Marin F.R., Thorburn P.J., Costa L.G.D., Otto R. 2014. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. Brésil : Sugar Tech, vol 16, p 164–173. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0265-2>.

Menandro L.M.S., Cantarella H., Franco H.C.J., Kölln O.T., Pimenta M.T.B., Sanches G.M., Rabelo S.C., Carvalho J.L.N. 2017. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. Etats-Unis d'Amérique : Biofuels, Bioproducts and Biorefining, vol 11, p 488-504. [30/01/2023]. <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>.

Menandro L.M.S., Moraes L.O., Borges C.D., Cherubin M.R., Castioni G.A., Carvalho J.L.N. 2019. Soil Macrofauna Responses to Sugarcane Straw Removal for Bioenergy Production. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 944-957. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10053-2>.

Mendonza H.N.S., Lima E., Anjos L.H.C., Silva L.A., Ceddia M.B., Antunes M.V.M. 2000. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. Brésil : Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol 24, p 201-207. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100022>.

Monquero P.A., Amaral L.R., Silva A.C., Silva P.V., Binha D.P. 2007. Eficacia de herbicidas em diferentes quantidades de pajha de cana-de-açucar no controle de Euphorbia heterophylla. Brésil : Planta Daninha, vol 25, p 613-619. [05/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000300022>.

Moraes M.T.D., Luz F.B.D., Debiasi H., Franchini J.C., Silva V.R.D. 2019. Soil load support capacity increases with time without soil mobilization as a result of age-hardening phenomenon. Brésil : Soil and Tillage Research, vol 186, p 128-134. [18/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.009>.

Morais M.C., Ferrari B.M., Borges C.D., Cherubin M.R., Tsai S.M., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Feigl B.J. 2019. Does Sugarcane Straw Removal Change the Abundance of Soil Microbes?. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 901-908. [14/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10018-5>.

Oliveira M.A., Zucareli C., Neves C.S.V.J., Domingues A.R., De Conti Medina C., De Assis Moraes L.A. 2016. Agronomic performance of sugarcane cultivated under different amounts of sugarcane straw on the soil surface. Brésil : Ciencias Agrarias, vol 37, p 3983-3996. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n6p3983>.

Oliveira R.F., Almeida L.C., Souza D.R., Munhae C.B., Bueno O.C., Morini M.S.C. 2012. Ant diversity (Hymenoptera: Formicidae) and predation by ants on the different stages of the sugarcane borer life cycle Diatraea saccharalis(Lepidoptera: Crambidae). Brésil : European Journal of Entomology, vol 109, p 381-387. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.14411/eje.2012.049>.

Olivier F.C., Singel, A. 2012. The effect of crop residue layers on evapotranspiration, growth and yield of irrigated sugarcane. Afrique du Sud : Water SA, vol 38, p 77-86. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i1.10>.

Paula D.T.D., Filho M.V.M., Farias V.L.D.S., Siqueia D.S. 2016. Clay and phosphorus losses by erosion in oxisol with sugarcane residues. Brésil : Engenharia Agricola, vol 36, p 1063-1072. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1063-1072/2016>.

Peres J.G., Souza C.F., Lavorenti N.A.. 2010. Evaluation of the effects of sugarcane straw coverage in moisture and water loss of soil. Brésil : Engenharia Agrícola, vol 30, p 875-886. [01/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000500010>.

Pimentel L.G., Cherubin M.R., Oliveira D.M.S., Cerri C.E.P., Cerri C.C. 2018. Decomposition of sugarcane straw: Basis for management decisions for bioenergy production. Royaume-Uni : Biomass and Bioenergy, vol 122, p 133-144. [30/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.027>.

Pimentel L.G., Gumiere T., Oliveira D.M.S, Cherubin M.R., Andreote F.D., Cerri C.E.P., Cerri C.C. 2019. Soil Bacterial Community Changes in Sugarcane Fields Under Straw Removal in Brazil. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 830-842. [14/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10010-z>.

Pinheiro A., Kaufmann V., Shneiders D., Gotardo, R. 2012. Transporte de sedimentos e espécies químicas em áreas de reflorestamentos e pastagem com base em chuva simulada. Brésil : Revista Ambiente & Água, vol 8, p 109-123. [28/02/2023]. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1106>.

Pitombo L.M., Cantarella, H.C., Packer, A.P.C., Ramos, N.P., Carmo, J.B. 2017. Straw preservation reduced total N2O emissions from a sugarcane field. Brésil : Soil Use Manag., 33, 583–594. <https://doi.org/10.1111/sum.12384>

Portela M.G.T., Leite L.F.C., Ranyellson Pires Barbosa R.P. 2020. Microbiological attributes of the soil under cultivation of sugar cane with and without burning straw. Colombie : Acta Agronomica, vol 69, p 1-10. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n4.88317>.

Rahardjo B.T., Achadian E.M., Taufiqurrahman A.F., Hidayat M.R. 2020. Silica Fertilizer (Si) Enhances Sugarcane Resistance to The Sugarcane Top Borer Scirpophaga excerptalis Walker. Indonésie : Agrivita Journal of Agricultural Science, vol 43, p 1-6. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v1i1.2654>.

Ramburan S., Nxumalo N. 2017. Regional, seasonal, cultivar and crop-year effects on sugarcane responses to residue mulching. Afrique du Sud : Field Crops Research, vol 210, p 136-146. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.001>.

Ramos Y.S., Ribeiro G.N., Rocha R.N.R. 2012. Erosão laminar e atributos físico-químicos de solos próximos a Usina Hidrelétrica Luiz Gonzaga/PE. Brésil : Agropecuária Científica no Semiárido, vol 8, p 74-84. [28/02/2023]. <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/5720>.

Ranaivoson L., Naudin K., Ripoche A., Affholder F., Rabeharisoa L. Corbeels M. 2017. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. France : Agronomy for Sustainable Development, vol 37, p 1-17. [25/10/2022]. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z>.

Rasche L., Diego R.S.D. 2020. Pros and Cons of Sugarcane Straw Recovery in São Paulo. Allemagne : BioEnergy Research, vol 13, p 147–156. [10/02/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10078-7>.

Resende A.S., Xavier R.P., Oliveira O.C., Urquiaga S., Alves B.J.R., Boddey R.M. 2006. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. Brésil : Plant and Soil, vol 281, p 339–351. [24/02/2023]. <https://www.jstor.org/stable/24123886>.

Robertson, F.A., Thorburn, P.J., 2007. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. Australie : Australian Journal of Soil Research, vol 45, p 1–11. [22/12/2022]. <https://doi.org/10.1071/SR06079>.

Rocha P.R.D.J., Bhattarai R., Fernandes R.B.A., Kalita P.K.K., Andrade F.V. 2016. Soil surface roughness under tillage practices and its consequences for water and sediment losses. Brésil : Journal of soil science and plant nutrition, vol 16, p 1065-1074. [28/01/2023]. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000078>.

Rossetto R., Cantarella H., Dias F.L.F., Landell M.G.A., Vitti A.C. 2008. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. Brésil : Informações Agronômicas, vol 124, p 8–13. [24/02/2023]. <https://www.researchgate.net/publication/238782907>.

Sampietro D.A., Vattuone M.A. 2006. Nature of the Interference Mechanism of Sugarcane (Saccharum officinarum L.) Straw. Brésil : Plant and Soil, vol 280, p 157-169. [03/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-2856-5>.

Sandhu H.S., Nuessly G.S., Cherry R.H., Gilbert R.A., Webb S.E. 2011. Effects of Harvest Residue and Tillage on Lesser Cornstalk Borer (Lepidoptera: Pyralidae) Damage to Sugarcane. Etats-Unis d'Amérique : Journal of Economic Entomology, vol 104, p 155-163. [28/01/2023]. <https://doi.org/10.1603/EC10212>.

Santos A.K.B.D., Popin G.V., Gmach M.R., Cherubin M.R., Neto M.S., Cerri C.E.P.. 2021. Changes in soil temperature and moisture due to sugarcane straw removal in central-southern Brazil. Brésil : Scientia Agricola, vol 79, p 1-12. [19/10/2022]. <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0309>.

Satiro L.S., Cherubin M.R., Lisboa I.P., Noia R.D.S.J., Cerri C.C., Cerri C.E.P. 2018. Prediction of Sugarcane Yield by Soil Attributes under Straw Removal Management. Brésil : Agronomy Journal, vol 111, p 14-23. [04/01/2023]. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0021>.

Satiro L.S., Cherubin M.R., Safanelli J.L., Lisboa I.P., Rocha P.R.D.J., Cerri C.E.P., Cerri C.C. 2017. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. Brésil : Geoderma Regional, vol 11, p 86-95. [13/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.005>.

Segnini A., Carvalho J.L.N., Bolonhezi D., Milori D.M.B.P., da Silva W.T.L., Simões M.L., Cantarelle H., de Maria I.C., Martin-Neto L. 2013. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. Brésil : Scientia Agricola, vol 70, p 321-326. [30/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500006>.

Shukla S.K., Sharma L., Tiwari R., Pathak A.D., Gaur A., Awasthi S.K., Srivastava A. 2022. Trash management and Trichoderma harzianum influencing photosynthesis, soil carbon sequestration, and growth and yield of sugarcane ratoon in subtropical India. Inde : European Journal of Agronomy, vol 141, p 126-137. [03/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126631>.

Silva A., Lisboa I., Cherubin M., Cerri C. 2019. How Much Sugarcane Straw is Needed for Covering the Soil?. Brésil : BioEnergy Research, vol 12, p 858–864. [05/02/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10008-7>.

Silva D.D., Pruski F.F., Schaefer C.E.G.R., Amorim R.S.S., Paiva K.W.N. 2005. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um argissolo vermelho-amarelo utilizando simulador de chuva. Brésil : Engenhari de Agua e Solo, vol 25, p 409-419. [15/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000200014>.

Silva G.R.V.D., Souza Z.M.D., Filho M.V.M., Barbosa R.S., Souza G.S.D. 2012. Soil, water and nutrient losses by interrill erosion from green cane cultivation. Brésil : Brasileira de Ciencia do Solo, vol 36, p 963-970. [09/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300026>.

Six J., Elliott E.T., Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. Etats Unis d'Amérique : Soil Biology and Biochemistry, vol 32, p 2099-2103. [05/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6>.

Six J., Feller C., Denef K., Ogle S.M., Sa J.C.D.M., Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. Etats Unis d'amérique : Agronomie, vol 22, p 755-775. [20/01/2023]. <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>.

Smolikowski B., Roose E., Lopez J.M., Querbes M., Antono Q., Barry O. 1997. Utilisation du paillage léger et de la haie vive dans la lutte contre l'érosion en zone semi-aride de montagne (Cap-Vert). Cap-Vert : Science et changements planétaires / Sécheresse, vol 9, p 13-21. [11/01/2023]. <https://www.researchgate.net/publication/32969755_Utilisation_du_paillage_et_de_la_haie_vive_dans_la_lutte_contre_l'erosion_en_zone_semi-aride_de_montagne_Cap_Vert>.

Soltangheisi A., Haygarth P.M., Pavinato P.S., Cherubin M.R., Teles A.P.B., Bordonal R. de O., Carvalho J.L.N., Withers P.J.A., Martinelli L.A. 2021. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics. Chine : Soil and Tillage Research, vol 208, p 104-115. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104898>.

Soong, J.L., Parton, W.J., Calderon, F., Campbell, E.E., Cotrufo, M.F., 2015. A new conceptual model on the fate and controls of fresh and pyrolized plant litter decomposition. Etats Unis d'Amérique : Biogeochemistry, vol 124, p 27–44. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0079-2>.

Sousa G.B., Filho M.V.M, Matias S.S.R. 2012. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba - SP. Brésil : Engenharia Agrícola, vol 32, p 490-500. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300008>.

Sousa J.G.D.A., Cherubin M.R., Cerri C.E., Cerri C.C., Feigl B.J. 2017. Sugarcane straw left in field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. Australie : Soil Research, vol 55, p 758-768. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1071/SR16310>.

Souza D.R.D., Stingel E., Almeida L.C.D., Lazarini M.A., Minhae C.D.B., Bueno O.C., Archangelo C.R., Morini M.S.D.C. 2010. Field methods for the study of ants in sugarcane plantations in Southeastern Brazil. Brésil : Scientia Agricola, vol 67, p 651-657. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000600006>.

Souza R.A., Telles T.S., Machado W., Hungria M., Filho J.T., Guimarães M.D.F. 2011. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. Chine : Agriculture, Ecosystems & Environment, vol 155, p 1-6. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.012>.

Souza Z.M.D., Prado R.D.M., Paixao A.C.S., Cesarin L.G. 2005. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. Brésil : Pesquisa Agropecuária Brasileira, vol 40, p 271-278. [21/12/2022]. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300011>.

Sparovek G., Lambais M.R., Silva A.P.D., Tormena C.A. 1999. Earthworm (Pontoscolex corethrurus) and organic matter effects on the reclamation of an eroded Oxisol. Brésil : Pedobiologia, vol 43, p 698-704. [15/01/2023]. <https://repositorio.usp.br/item/001072583>.

Stanford G., Frere M.H., Shwaninger D.H., 1973. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. Etats Unis d'Amérique : Soil Science, vol 115, p 321– 323. [01/02/2023].

Stirling G.R., Halpin N.V. and Bell M.J., 2011. A surface mulch of crop residues enhances suppressiveness to plant-parasitic nematodes in sugarcane soils. Australie : Biological Crop Protection, vol 41, p 109-121. [28/01/2023]. <http://era.daf.qld.gov.au/id/eprint/6885/>.

Suma R., Savitha C.M. 2015. Integrated Sugarcane Trash Management: A Novel Technology for Sustaining Soil Health and Sugarcane Yield. India : Advances in Crop Science and Technology, vol 3, p 1-4. [25/01/2023]. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000160>.

Tavares O.C.H., Lima E., Zonta E.2010. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. Brésil : Acta Scientiarum, Agronomy, vol 32, p 61-68. [24/02/2023]. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.2051>.

Tenelli S., Bordonal R.D.O., Barbosa L.C., Carvalho J.L.N. 2019. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed ?. Etats Unis d'Amérique : BioEnergy Research, vol 12, p 764-777. [12/01/2023]. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09996-3>.

Tenelli S., Bordonal R.O., Cherubin M.R., Cerri C.E.P., Carvalho J.L.N. 2021. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. Royaume-Uni : GCB Bioenergy, vol 17, p 1099-1111. [21/11/2022]. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12832>.

Thisdall J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soil. Australia : Journal of Soil Science, vol 33, p 141–163. [08/01/2023]. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.

Thomas G.W., Haszler G.R., Blevins R.L. 1996. The effect of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the proctor test. Royaume-Uni : Soil Science, vol 161, p 502-508. [25/01/2023]. <https://doi.org/10.1097/00010694-199608000-00005>.

Thomaz E.L., Marcatto F.S., Antoneli V. 2022. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. Brésil: Geography and Sustainability, vol 3, p 129-138. [02/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.05.001>.

Tominaga T.T., Cássaro F.A.M., Bacchi, O.O.S., Reichardt K., Oliveira J.C.M., Timm L.C.. 2002. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. Australian Journal of Soil Research, vol 40, p.605–614. [24/01/2023]. <https://doi.org/10.1071/sr01020>.

Torres J. L. R., Pereira M.G., Andrioli I., Polidoro J.C., Fabian A.J. 2005. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado (Revista Brasileira de Ciência do Solo, volume 29. p609–618. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400013>.

Totale E., Yongue-Fouateu R., Boli Baboule Z., Bilong P. 2008. Potentiel et effets des résidus de culture de canne à sucre pour la conservation des sols ferrallitiques d'une exploitation agricole de la région de Mbandjock (sud Cameroun). Cameroun : Etude et gestion des sols, vol 15, p 113-129. [21/12/2022]. <https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_15_2_tolale.pdf>.

Trivelin P.C.O., Franco H.C.J., Otto R., Ferreira D.A., Vitti A.C., Fortes C., Faroni C.E., Oliveira E.C.A., Cantarelle H. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. Brésil : Scientia Agricola, vol 70, p 345-352. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500009>.

Vallis I., Parton W.J., Keating B.A., Wood A.W. 1996. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. Australia : Soil and Tillage Research, vol 38, p 115-132. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01014-8>.

Velini E.D., Negrisoli E. 2000. Controle de plantas daninhas em cana-crua. Brésil : Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, Congresso brasileiro da ciência das plantas daninhas, 22, 148-164. [24/02/2023].

Versini A., Poultney D., Bachir H. 2020. Effect of Nitrogen Fertilisation on Sugarcane Root Development and Nitrogen Accumulation in Ratoon Crops of Reunion Island. France : Sugar Tech, vol 12, p 1110-1121. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00863-6>.

Vu E., Schaumann G.E., Buchmann C. 2022. The contribution of microbial activity to soil–water interactions and soil microstructural stability of a silty loam soil under moisture dynamics. Allemagne : Geoderma, vol 417, p 1-10. [02/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115822>.

Wiedenfeld B. 2009. Effects of green harvesting vs burning on soil properties, growth and yield of sugarcane in south Texas. Etats-Unis d'Amérique : Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists, vol 29, p 102-109. [24/02/2023]. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103022483>.

Withers P.J.A., Rodrigues M., Soltangheisi A., De Carvalho T.S., Guilherme L.R.G., Benites V.D.M., Gatiboni L.C., De Sousa D.M.G. Nunes R.D.S., Rosolem C.A., Andreote F.D., Oliveira A.D., Coutinho E.L.M., Pavinato P.S. 2018. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Brésil : Scientific reports, vol 8, p 1-13. [21/02/2023]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z>.

Zhang C., Lin Z., Que Y., Fallah N., Tayyab M., Li S., Luo J., Zhang Z., Abubakar A.Y., Zhang H. 2021. Straw retention efficiently improves fungal communities and functions in the fallow ecosystem. Chine : BMC Microbiology, vol 21, p 1-13. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02115-3>.

Zhang C., Tayyab M., Abubakar A.Y., Yang Z, Pang Z., Islam W., Lin Z., Li S., Luo J., Fan X., Fallah N., Zhang H. 2019. Bacteria with Different Assemblages in the Soil Profile Drive the Diverse Nutrient Cycles in the Sugarcane Straw Retention Ecosystem. Chine : Diversity, vol 11, p 1-17. [28/01/2023]. <http://dx.doi.org/10.3390/d11100194>.

Zhang H. 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. Allemagne : Soil and Tillage Research, vol 31, p 263-275. [11/01/2023]. <https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90085-X>.

Zhang, H., Hartge, K., 1992. Effect of differently humified organic matter on the aggregate stability by reducing aggregate wettability. Allemagne : Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde, vol 155, p 143-149. [22/01/2023]. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do;jsessionid=D436CBF6B30B89947A50B642ADD01621?request_locale=fr&recordID=DE92X0377&query=&sourceQuery=&sortField=&sortOrder=&agrovocString=&advQuery=&centerString=&enableField=>.

Zheng B., Marschner P. 2017. Previous residue addition rate and C/N ratio influence nutrient availability and respiration rate after the second residue addition. Pays-Bas : Geoderma, vol 285, p 217-224. [01/02/2023]. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.007>.

Zona, D., Janssens, I.A., Aubinet, M., Gioli, B., Vicca, S., Fichot, R., Ceulemans, R. 2013. Fluxes of the greenhouse gases (CO2, CH4 and N2O) above a short-rotation poplar plantation after conversion from agricultural land. Belgique : Agricultural and Forest Meteorology, vol 169, p 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.008>.